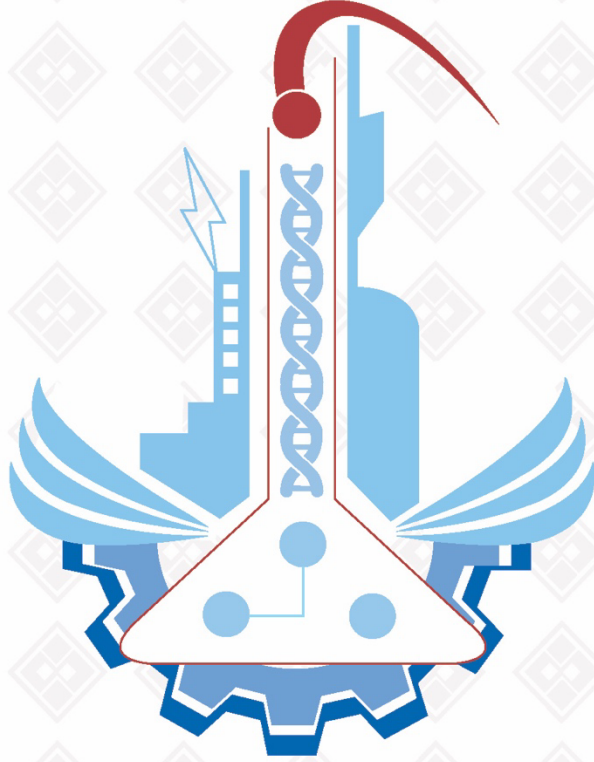


ISSN: 1308-9064

Cilt: 35 / Sayı: 1 / Yıl: 2023

FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi (FBD)
Cilt:35, Sayı:1, Yıl:2023
ISSN: 1308 - 9064

İletişim

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilim@firat.edu.tr

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski Adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Derginin Eski ISSN Numarası: 1300-2708

<http://dergipark.gov.tr/fufbd>

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi (FBD)

Sahibi

Prof. Dr. Fahrettin GÖKTAŞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Burhan ERGEN
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Baş Editör

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat UÇAR
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Prof. Dr. Emrah YILMAZ
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

DANIŞMA KURULU

Leyla AÇIK	Gazi Ü., Biyoteknoloji	Turgay SEÇKİN	İnönü Ü., Kimya
Haluk KORALAY	Gazi Ü., Fizik	İbrahim KARATAŞ	Selçuk Ü., Kimya
Mahmut ELP	Kastamonu Ü., Su Ürünleri	Zihni DEMİRBAĞ	K.T.Ü., Biyoloji
Yusuf AYVAZ	S.Demirel Ü., Biyoloji.	Seyfettin ÇAKMAK	S.Demirel Ü., Fizik
Mikail ET	Fırat Ü., Matematik	Orhan ERMAN	Fırat Ü., Biyoloji
Hikmet GEÇKİL	İnönü Ü., Biyoloji	Ömer AKIN	T.O.B.B. Matematik
Kenan GÜLLÜ	Muğla S.K.Ü. Su Ürünleri	Sinan AKPINAR	Fırat Ü., Fizik
Mehmet KAYA	Fırat Ü., Kimya	Ahmet ŞAHİN	Erciyes Ü., Biyoloji
İlhami KIZIROĞLU	Hacettepe Ü., Biyoloji	Kadir DEMİRELLİ	Fırat Ü., Kimya
S.Güneş KÜRKÇÜOĞLU	Osmangazi Ü., Fizik	Kenan GÜLLÜ	Muğla Ü., Su Ürünleri
Dursun ŞEN	Fırat Ü., Su Ürünleri	Vedat ASİL	Fırat Ü., Matematik
Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal. Müh.	Ertan GOKALP	K.T.Ü. Harita. Müh.
İzzet KARA	Pamukkale Ü., Fizik	Ekrem ARTUNÇ	S.Demirel Ü., Fizik

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (FBD)
35-1, 2023

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Cu-23.10Al-2.50Be (%at.) Şekil Hafızalı Alaşımının Termodinamik ve Yapısal Parametreleri Üzerine Işınlama Süresinin Etkisi**
Effect of Irradiation Time on Thermodynamic and Structural Parameters of Cu-23.10Al-2.50Be (%at.) Shape Memory Alloy
Şahide Nevin BALO 1-6
2. **Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile CoNiCrFeMnMo Bileşimine Sahip Yüksek Entropili Alaşımın Üretimi**
Production of High Entropy Alloy with CoNiCrFeMnMo composition by Mechanical Alloying Method
Canan AKSU CANBAY, İskender ÖZKUL 7-12
3. **Çok Etmenli Sistemler için Olay Tetiklemeli İşbirlikçi Kontrol**
Event-Triggered Cooperative Control for Multi-Agent Systems
Neslihan KARAS, Janset DAŞDEMİR..... 13-27
4. **Farklı Kurutma Yöntemleriyle Meyve Kabuğu Tozu Elde Edilmesi: Fiziksel Özellikler, Toz Ürün Özelliği ve Kurutma Yöntemlerinin Enerji Verimliliği Yönünden İncelenmesi**
Obtaining Fruit Peel Powder by Different Drying Methods: Investigation of Physical Properties, Powder Properties and Energy Efficiency of Drying Methods
Safiye DİRİM, Eylül Elif METİNER, İrem BIYIKLI, Nilay YÜCEL, Tuğçe TÜRKOĞLU 29-37

Cu-23.10Al-2.50Be (%at.) Şekil Hafızalı Alaşımının Termodinamik ve Yapısal Parametreleri Üzerine Işınlama Süresinin Etkisi

Ş. Nevin BALO^{1*}

¹ Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
*¹ nbalo@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 28/02/2023;

Kabul/Accepted: 28/03/2023)

Öz: Bu çalışmada Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) şekil hafızalı alaşım (SHA) numuneleri farklı sürelerde Co-60 gama radyasyon kaynağı ile ışınlanmıştır. Gama radyasyon kaynağı ile ışınlanmış Cu-23.10Al-2.50Be şekil hafızalı alaşım numunelerinin ışınlama süresinin dönüşüm sıcaklıkları, termodinamik parametreler ve yapısal değişimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Işınlama süresine bağlı olarak, alaşım numunelerinin dönüşüm sıcaklıklarını ve termodinamik parametrelerini belirlemek için diferansiyel taramalı kalorimetrisi (DSC), yapısal değişimlerini belirlemek için, oda sıcaklığında X-ışını kırınım (XRD) ölçümleri ile incelenmiştir. Artan ışınlama süresi ile alaşım numunelerinin kristalit boyutunda meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: CuAlBe şekil hafızalı alaşım, ışınlama süresi, kristalit boyutu.

Effect of Irradiation Time on Thermodynamic and Structural Parameters of Cu-23.10Al-2.50Be (%at.) Shape Memory Alloy

Abstract: In this study, Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) shape memory alloy (SMA) samples were irradiated with a Co-60 gamma radiation source at different times. The effect of irradiation time on transformation temperatures, thermodynamic parameters and structural changes of Cu-23.10Al-2.50Be shape memory alloy samples irradiated with gamma radiation source was investigated. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to determine the transformation temperatures and thermodynamic parameters of the alloy samples depending on the irradiation time, and X-ray diffraction (XRD) measurements at room temperature were used to determine their structural changes. The changes in the crystallite size of the alloy samples with increasing irradiation time were determined.

Key words: CuAlBe shape memory alloy, irradiation time, crystallite size.

1. Giriş

Şekil hafızalı alaşımlar (SHA), uygulamaları için son yıllarda önemli teknolojik gelişmeler geçirmiştir. Bununla birlikte, çok sayıda incelenmiş SHA'na rağmen, endüstriyel uygulamalar için yalnızca Ti-Ni ve Cu-bazlı SHA'ları olarak iki sınıf dikkate alınmıştır [1-4]. Bu alaşımların potansiyel uygulanabilirlikleri, alaşımlar hakkında derin bir bilgi edinme anlamına gelir ve özellikle martensitik dönüşümün özellikleri yani dönüşümün yeniden üretilebilirliği, sıcaklıkları, histerezisi ve termoelastikliği yüksek düzeyde kontrol edilmelidir. Şekil hatırlama, süperelastik ve psödoelastik etkilere dayanan SHA'nın fonksiyonel davranışı, yüksek sıcaklıktaki bir β -fazı (austenit fazı) ile düşük sıcaklıktaki bir martensit fazı arasındaki birinci dereceden yer değiştiren ve difüzyonsuz martensitik dönüşüm ile ilgilidir [5-8].

Termoelastik martensitik dönüşümde, örgü kayması tarafından üretilen deformasyon, elastik enerji olarak depolanır ve dönüşüm bölgesinde, kimyasal Gibbs serbest enerjisi farkı (austenit ve martensit fazları arasında) ile depolanan elastik enerji ve sürtünme kuvvetleri tarafından dağıtılan enerji arasında yerel bir denge vardır [9,10]. Elastik enerji austenit fazından martensit fazına geçiş (yani ileri dönüşüm) sırasında depolanır, martensit fazından austenit fazına (yani ters dönüşüm) sırasında salınır. Elastiklik ileri dönüşüme karşı çıkar ve ters dönüşümü destekler. Bu enerji nedeniyle martensitik dönüşüm bir sıcaklık aralığında ilerler.

İkili CuAl alaşım sisteminin ötektoid noktası yakınında, düzensiz austenit (β) fazı 565 °C'nin üzerinde kararlıdır. Bu sıcaklığın altında, denge fazları yüz merkezli kübik α fazı ve Cu₉Al₄- γ 2 fazıdır. Hızlı soğutma

* Sorumlu yazar: nbalo@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5632-9559

sırasında, yüksek sıcaklıktaki β -fazı, DO3-sıralı bir yapıya (metastabil β 1-fazı) dönüşebilir ve ayrıca 18R mikro yapısının bir martensit fazına dönüşebilir [11-14].

İkili CuAl alaşım sistemine üçüncü elementin (X) eklenmesi, Cu ve X atomlarının örgü konumlarında birbirinin yerine geçebildiği ve Cu'nun baskın olduğu (CuX)₃Al yakınlarındaki kimyasal bileşimler için DO3 sıralı mikro yapıyı destekler. X konsantrasyonu artarsa, mikro yapı bir Cu₂XAl stokiyometrisi ile Heusler L21 tipine doğru gelişir. Bu nedenle, ilgili kimyasal bileşimlerine göre bazı üçlü CuAlX alaşımları, bir DO3 veya bir L21 sırasını benimser [10].

CuAlBe alaşımları, diğer Cu-bazlı şekil hafızalı alaşımlarinkine benzer özellikler ortaya koymuştur. Berilyum ilavesi, martensit dönüşümünün, yani M_s sıcaklığının olağanüstü düşüşünden sorumluyken, alüminyum bileşimi ve β faz kararlılığı önemli ölçüde etkilenmez. Bu, martensitik dönüşümün aynı mekanizmayı sürdürmesine izin verir [15-17].

Gama radyasyonu metal ve alaşımların yapısal özelliklerini değiştirebilecek nitelikte bir radyasyon çeşidi olduğu için, bu tür malzemelerin gama radyasyonu ile ışınlanması ve ışınlamaya mağruz kalma süresine tepki olarak kristal yapılarında oluşan kusurlar nedeniyle birçok fiziksel ve yapısal özellikleri değişir. Mikro yapısal değişiklikler malzeme veriminin bozulmasında önemli rol oynar. Işınlama sonucu, matris faz ve dislokasyon düzeninde değişikliklere neden olarak orijinal mikro yapı değişebilir. Bu nedenle nükleer reaktör sistemleri için, çok daha yüksek sıcaklıklarda ve dozlarda çalışabilen malzemeler geliştirmek malzeme bilimciler için çok önemlidir [18-19].

Nükleer tesislerin güvenliğini, izleme ve denetim süreçlerinde akıllı malzeme teknolojilerinin kullanılmasından yararlanılabilmek için 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 [20].

Bu çalışmada Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) ŞHA kullanıldı. Alaşımlar Co-60 gama radyasyon kaynağı ile ışınlandı. Işınlama süresinin termodinamik parametrelere ve mikro yapıya etkisi incelendi.

2. Deneysel Metod

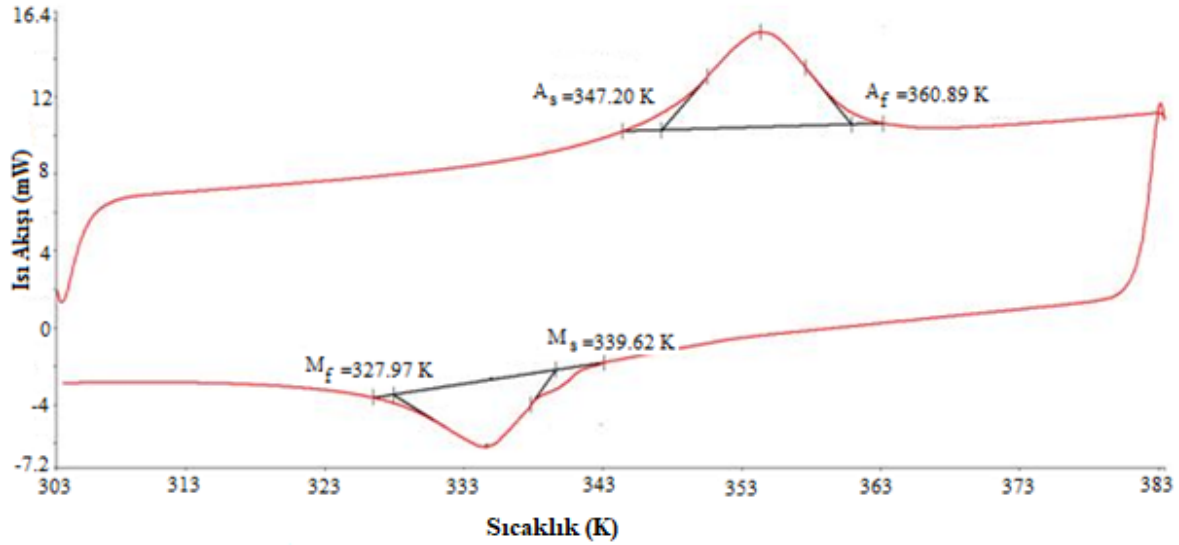
Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) şekil hafızalı alaşım Trefimetaux Company tarafından sağlandı. Bu alaşımdan kesilen parçalar beta faz bölgesindeki bir sıcaklıkta (650 °C'de 30 dakika) tavllanmış daha sonra kademeli soğutma (önce 5 dakika kaynayan suda daha sonra oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur) uygulanmıştır. Bu örneklerden bazıları, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde (SANAEM) farklı sürelerle (1.10x10⁴ s, 2.20x10⁴ s, 3.30x10⁴ s, 4.40x10⁴ s, 5.50x10⁴ s) ışınlanmıştır. Işınlama doz hızı 1634 Gy/h'dir. Işınlama dozu, ışınlama sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edildi. Homojen ve ışınlanmış numunelerin dönüşüm sıcaklıkları, Perkin Elmer 8000 diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) kullanılarak belirlendi. DSC ölçümleri atmosferik basınç altında 10°C/dak ısıtma/soğutma tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Termodinamik parametreler belirlenmiştir. Örneklerin 30°-75° aralığında X-ışını kırınım desenleri Bruker D8 Advance Model difraktometre ile alınmıştır. Farklı dozlarda ışınlanmış alaşım numunelerinin X-ışını analizi, oda sıcaklığında CuK α radyasyonu ile yapılmıştır. X-ışınının dalga boyu 1.54060 Å'dir. Işınlama süresiyle kristalit boyutundaki değişimler hesaplandı.

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. DSC ölçümleri

Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) ŞHA'nın homojen (ışınlanmamış) numunesinin DSC eğrisi Şekil-1 de görülmektedir. Işınlanmamış ve farklı sürelerle gama radyasyonu ile ışınlanmış numunelerinin DSC ölçüm sonuçları Tablo-1 de verilmiştir. Işınlama süresinin artmasıyla A_s (austenite başlama sıcaklığı) ve A_f (austenite bitiş sıcaklığı) sıcaklıklarındaki artış belirgindir. M_s (martensit başlama sıcaklığı) sıcaklığındaki artış daha küçüktür. M_f (martensit bitiş sıcaklığı) sıcaklığındaki değişim daha kararsız görünmekle birlikte 5.50x10⁴ s ışınlanma sonucunda azalmıştır. Artan ışınlama süresi ile ileri ve ters dönüşüm sıcaklıklarının arttığını belirledik. Bunun yerine, martensit faz stabilizasyonunun anlaşılmasında daha önemli olan ve $\Delta T = A_f - M_s$ olarak hesaplanan

sıcaklık histeresisindeki değişimler Tablo-1'de gösterilmektedir. Artan ışınlama süresiyle sıcaklık histeresisindeki değişim düzenli bir artma eğilimi göstermiştir. Işınlanmamış numunenin hem $A_f - A_s$ hem de $M_s - M_f$ değerleri, 5.50×10^4 s süreyle ışınlanan numunenin $A_f - A_s$ hem de $M_s - M_f$ değerlerinden daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. İleri ve ters dönüşüm fazları arasındaki denge sıcaklığı ve ters dönüşüm sırasındaki entropi değişimi [21-23] çalışmalarda verilen denklemlerle hesaplandı. Işınlama süresindeki artışa bağlı olarak T_0 denge sıcaklığı artma eğilimi gösterirken (Tablo-1), entropideki değişim azalma eğilimi göstermiştir (Tablo-2).



Şekil 1. Işınlanmamış CuAlBe ŞHA'nın DSC eğrisi

Tablo 1. Farklı sürelerle ışınlanmış CuAlBe ŞHA'nın dönüşüm ve denge sıcaklıkları

Doz (kGy)	Işınlama Süresi (s)	A_s (K)	A_f (K)	$A_f - A_s$ (K)	M_s (K)	M_f (K)	$M_s - M_f$ (K)	$A_f - M_s$ (K)	T_0 (K)
0	0	347.20	360.89	13.69	339.62	327.97	12.00	21.27	350.25
5	1.10×10^4	352.25	365.53	13.28	341.81	324.23	17.58	23.72	353.67
10	2.20×10^4	350.95	364.50	13.55	340.88	328.14	12.74	24.62	352.69
15	3.30×10^4	351.75	365.49	13.74	340.92	328.04	12.88	24.57	353.20
20	4.40×10^4	350.35	365.88	15.53	341.15	327.86	13.29	24.73	353.51
25	5.50×10^4	353.23	370.02	16.79	341.29	325.56	15.73	28.73	355.65

Tablo 2. Farklı sürelerle ışınlanmış CuAlBe ŞHA'nın termodinamik parametreleri ve kristalit boyutu

Doz kGy	Işınlama Süresi (s)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/kg)	$\Delta S^{M \rightarrow A}$ (J/kgK)	$\Delta G^{A \rightarrow M}$ (J)	ΔG_e (J)	Kristalit boyutu (nm)
0	-	3843.8	10.97	-116.61	131.64	24.201
5	1.10×10^4	870.8	2.46	-29.17	43.24	34.413
10	2.20×10^4	759.4	2.15	-25.39	27.39	32.307
15	3.30×10^4	678.5	1.92	-23.57	24.72	24.834
20	4.40×10^4	1395.5	3.94	-48.69	52.36	23.542
25	5.50×10^4	812.3	2.28	-32.74	35.86	22.767

3.2. XRD analiz sonuçları

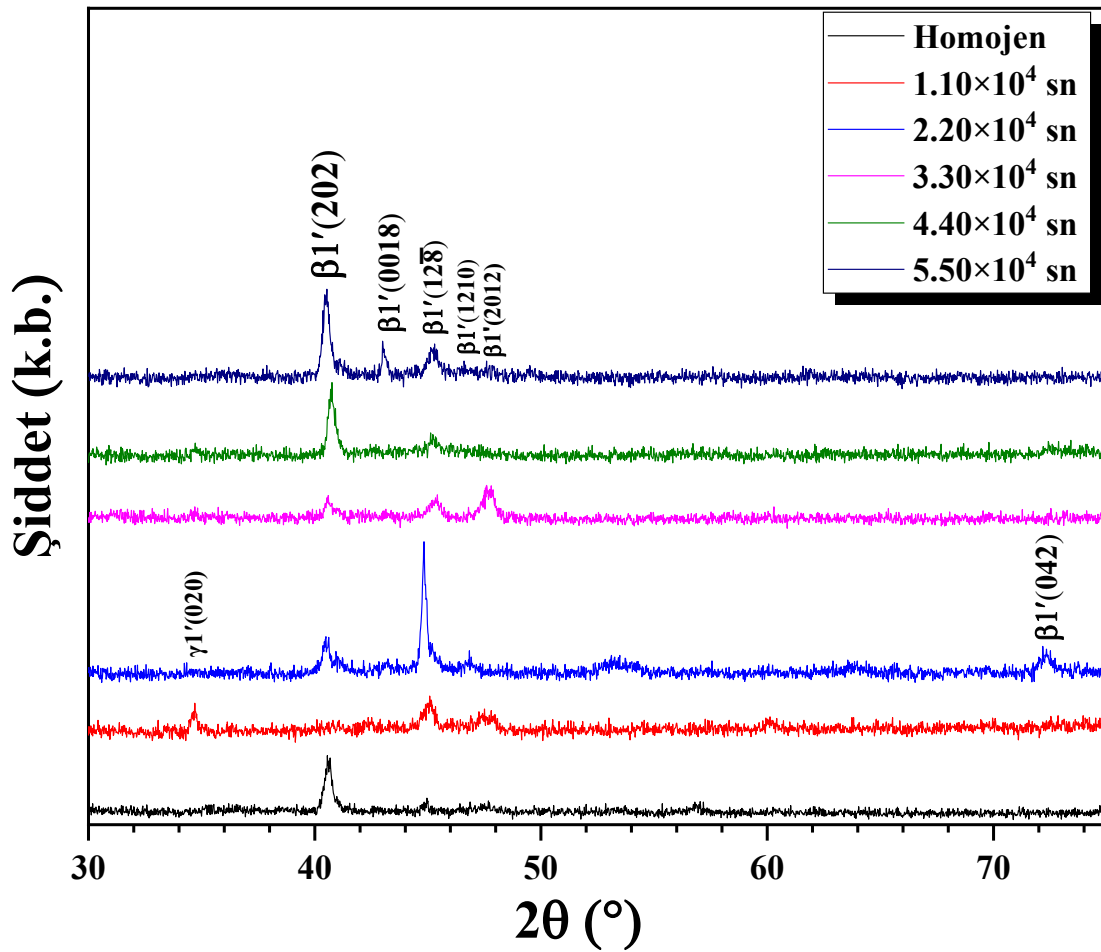
Işınlanmamış ve farklı sürelerle Co-60 gama radyasyon kaynağıyla ışınlanmış CuAlBe şekil hafızalı alaşım numunelerinin XRD desenleri Şekil-3 de verilmiştir. Işınlanmamış numunenin XRD deseninde (202) β_1 ' ve

(128) β_1' martensit pikleri görülmektedir. Işınlama süresinin artmasıyla pik şiddetlerinde değişimler gözlenmiştir. Ayrıca martensit yapıya ait yeni pikler oluşmuştur [24-29].

Alaşım numunelerinin kristalit boyutunu aşağıda verilen Debye-Scherrer eşitliği ile hesaplanmıştır [30-31].

$$D = \frac{0.9\lambda}{FWHM \cos\theta}$$

Eşitlikte D; kristalit boyutunu, λ ; X-ışını dalga boyunu, FWHM; maksimum tepe noktasının yarısında tam genişliği ve θ Bragg açısını gösterir. Işınlanmamış ve farklı sürelerle ışınlanmış alaşım numuneleri için kristalit boyutları Tablo-2 de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, 1.10×10^4 s gama radyasyonu ile ışınlanmış CuAlBe alaşım numunesinin kristalit boyutu artmıştır. CuAlBe alaşımının kristalit boyutu, ışınlama süresine bağlı olarak kristalit boyutu küçülmüştür.



Şekil 2. Homojen ve farklı sürelerle ışınlanmış CuAlBe ŞHA'nın XRD desenleri

4. Tartışma

Co-60 gama radyasyon kaynağıyla ışınlanmış CuAlBe ŞHA numunelerinin stabilizasyonunu ifade eden ΔT histerisis genişliği ve T_0 denge sıcaklığı ışınlama süresiyle artmıştır. Bunun yanı sıra düzensizliği ifade eden entropi, ışınlama süresinin artmasıyla azalmıştır. Düzensizliğin azalmasıyla elastiklik enerji değerleri de azalmıştır.

Işınlanmamış CuAlBe ŞHA numunesinin XRD sonuçları, alaşımın martensit yapıda olduğunu ve ışınlanmış numunelerde de yapının martensit olduğunu ve ışınlama süresinin artmasıyla yapının değişmediği, sadece pik şiddetlerinde bir değişim olduğunu ve ilave β' piklerinin meydana geldiğini göstermektedir.

Cu-23.10Al-2.50Be (% at.) ŞH alaşım nükleer reaktörler gibi yapıların amaçlarını yerine getirebilmesi için veya radyasyon içeren farklı ortamlarda amaca yönelik teknolojik uygulamaların tasarımında mühendisler tarafından farklı bir malzeme olarak değerlendirilebilir.

Kaynaklar

- [1] Recarte V, Pérez-Landazábal JI, Rodríguez PP, Bocanegra EH, Nó ML, San Juan J. Thermodynamics of thermally induced martensitic transformations in Cu–Al–Ni shape memory alloys. *Acta Mater* 2004; 52(13): 3941-3948.
- [2] Duerig TW, Melton KN, Stöckel DWCM. Engineering aspects of shape memory alloys. Butterworth-heinemann 2013.
- [3] Elrasasi TY, Daróczy L, Beke DL. Calculation of elastic energy contributions in single crystalline Cu-11.5 wt% Al-5.0 wt% Ni shape memory alloy. In *Materials Science Forum* Trans Tech Publications Ltd. 729: 37-42.
- [4] Alaneme KK, Anaele JU, Okotete EA. Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review. *Scientific African* 2021;12: e00760.
- [5] Alaneme KK, Okotete EA. Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options—A review of copper and iron based shape memory metallic systems. *Eng Sci Technol Int J* 2016; 19(3): 1582-1592.
- [6] Shchyglo O, Salman U, Finel A. Martensitic phase transformations in Ni–Ti-based shape memory alloys: The Landau theory. *Acta Mater* 2012; 60(19): 6784-6792.
- [7] Miyazaki S, Otsuka K. Development of shape memory alloys. *ISIJ International* 1989; 29(5): 353-377.
- [8] Sutou Y, Koeda N, Omori T, Kainuma R, Ishida K. Effects of ageing on bainitic and thermally induced martensitic transformations in ductile Cu–Al–Mn-based shape memory alloys. *Acta Mater* 2009; 57(19): 5748-5758.
- [9] Warlimont H, Delaey L. *Progr Mater Sci*;18:1. 1974
- [10] Chentouf SM, Bouabdallah M, Cheniti H, Eberhardt A, Patoor E, Sari A. Ageing study of Cu–Al–Be hypoeutectoid shape memory alloy. *Mater Charact* 2010; 61(11): 1187-1193.
- [11] Lara-Rodriguez GA, Gonzalez G, Flores-Zúñiga H, Cortés-Pérez J. The effect of rapid solidification and grain size on the transformation temperatures of Cu–Al–Be melt spun alloys. *Mater Charact* 2006; 57(3): 154-159.
- [12] Montecinos S, Cuniberti A, Castro ML, Boeri R. Phase transformations during continuous cooling of polycrystalline β -CuAlBe alloys. *J Alloys Compd* 2009; 467: 278-283.
- [13] Belkahla S, Zúñiga HF, Guenin G. Elaboration and characterization of new low temperature shape memory CuAlBe alloys. *Mater Sci Eng A* 1993; 169(1-2): 119-124.
- [14] Castro ML, Romero R. Isothermal decomposition of the Cu-22.72 Al-3.55 Be at.% alloy. *Mat Sci Eng A* 2000; 287: 66-71.
- [15] Albuquerque VHC de, Melo TADA, Gomes RM, Lima SJG de, Tavares JMR. Grain size and temperature influence on the toughness of a CuAlBe shape memory alloy. *Mater Sci Eng A* 2010; 528(1): 459-466.
- [16] Dunne D, Morin M, Gonzalez C, Guenin G. The effect of quenching treatment on the reversible martensitic transformation in CuAlBe alloys. *Mater Sci Eng A* 2004; 378(1-2): 257-262.
- [17] Medina CD, Herrera RA, Beltran JF. Improvement of superelasticity conditions in Cu-based shape memory alloys for seismic control applications. *Eng Struct*, 2023; 274 (115151): 1-11.
- [18] Mansur LK, Bloom EE. Radiation effects in reactor structural alloys. *J Met* 1982; 23-31.
- [19] Balo ŞN, Orhan A. Co-60 ile Işınlanan Cu-Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımların Termal Parametreleri ve Yapısal İncelemeleri. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed and Refereed* ISSN 2667-6702, 2021; 8 (18): 151-164
- [20] Giurgiutiu V, Zagrai A. The use of smart materials technologies in radiation environment and nuclear industry. SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials and 5th International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure; 5-9 March 2000; Newport Beach, CA. 3985-103.
- [21] Wayman C, Tong H. On the equilibrium temperature in thermoelastic martensitic transformations. *Scr Metall* 1977; 11(5): 341-343.
- [22] Balo ŞN, Eşkil M. Thermodynamic and crystallographic properties of gamma radiated shape memory Cu-Al-Be alloy. *Appl Phys A* 2021; 127(8): 1-10.
- [23] Romero R, Pelegrina JL. Change of entropy in the martensitic transformation and its dependence in Cu-based shape memory alloys. *Mater Sci Eng A* 2003; 354: 243-250.
- [24] Balo ŞN, Yakuphanoglu F. The effects of Cr on isothermal oxidation behavior of Fe-30Mn-6Si alloy. *Thermochim Acta* 2013; 560: 43-46.
- [25] Mallik US, Sampath V. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. *J Alloys Compd* 2009; 469(1-2): 156-163.
- [26] Yang S, Zhang F, Wu J, Zhang J, Wang C, Liu X. Microstructure characterization, stress–strain behavior, superelasticity and shape memory effect of Cu–Al–Mn–Cr shape memory alloys. *J Mater Sci* 2017; 52: 5917–5927.

- [27] Saud SN, Hamzah E, Abubakar T, Bakhsheshi-Rad HR. Thermal aging behavior in Cu-Al-Ni-xCo shape memory alloys. *J Therm Anal Calorim* 2015; 119: 1273-1284.
- [28] Karaduman O, Özkul I, Canbay CA. Shape memory effect characterization of a ternary CuAlNi high temperature SMA ribbons produced by melt spinning method. *Adv Eng Sci* 2021; 1: 26-33.
- [29] Canbay CA, Gudeloglu S, Genc ZK. Investigation of the Enthalpy/Entropy Variation and Structure of Cu–Al–Mn–Fe Shape Memory Alloys. *Int J Thermophys* 2015; 36: 783-794.
- [30] Cullity BD. *Elements of X-ray diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1978.
- [31] Balo ŞN, Manguri HSA. Observation of Physical Parameters in Cu-based SMA Aged Under Constant Pressure. *JMED* 2021; 3: 19-25.

Mekanik Alaşım Yöntemi ile CoNiCrFeMnMo Bileşimine Sahip Yüksek Entropili Alaşımın Üretimi

Canan AKSU CANBAY^{1*}, İskender ÖZKUL²

¹ Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Elazığ, TÜRKİYE

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Mersin, TÜRKİYE

¹caksu@firat.edu.tr

²iskender@mersin.edu.tr

(Geliş/Received: 23/02/2023;

Kabul/Accepted: 28/03/2023)

Öz: Yüksek entropili alaşımlar son yıllarda farklı bir alaşım tasarım yaklaşımı içeren şaşırtıcı özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu malzemeler literatürde oldukça popüler olmuş çok fazla tasarım kombinasyonuna sahip olsa da bilindik ve güvenilir alaşım türleri etrafında yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların öncüsü sayılabilecek olan Cantor alaşımı yine sıklıkla çalışılan alaşım türlerinden biridir. Farklı türde alaşımlama elementleri oluşturulan bu alaşım türünün yeni ve farklı bir versiyonunu düşündüğümüz bir türü üretilerek bu çalışmada yapısal olarak karakterizasyonu yapılmış ve raporlanmıştır. CoNiCrFeMnMo bileşimine sahip alaşımı üretmek için mekanik alaşımlama yöntemi kullanılmıştır. Uygun oranlarda karıştırılmış metal tozları 100 saat mekanik alaşımlanmıştır. İşlem sonunda elde edilen numunelerden alınan SEM ve XRD analizleri alaşımın başarıyla üretildiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek entropili alaşım, CoNiCrFeMnMo, mekanik alaşımlama, karakterizasyon.

Production of High Entropy Alloy with CoNiCrFeMnMo composition by Mechanical Alloying Method

Abstract: High entropy alloys are materials that exhibit surprising properties in recent years, including a different alloy design approach. Although these materials have many design combinations that have been very popular in the literature, they are concentrated around familiar and reliable alloy types. Cantor alloy, which can be considered as the pioneer of these studies, is one of the alloy types that is frequently studied. A new and different version of this alloy type, in which different types of alloying elements are formed, has been produced, and its structural characterization has been made and reported in this study. Mechanical alloying method was used to produce the alloy with CoNiCrFeMnMo composition. Metal powders mixed in appropriate proportions were mechanically alloyed for 100 hours. SEM and XRD analyzes taken from the samples obtained at the end of the process showed that the alloy was produced successfully.

Key words: Electronics, instructions for authors, manuscript template.

1. Giriş

Yüksek entropili alaşımlar nispeten yakın zamanda ortaya çıkmış farklı bir alaşım tasarım anlayışına sahip alaşım türüdür. Ana matris metal elementi üzerine kurulu alaşımlama tipinden eşmolar veya bir birlerine yakın sayılabilecek seviyede alaşımlama elementlerinin yer aldığı bir anlayışı içermektedir. Geleneksel alaşım anlayışında Bu 5–35 at.% civarında 5 veya daha fazla element içeren bu sıradışı alaşım tasarımına sahip malzeme grubu çok farklı özellikler sergilemektedir. Bu malzemelerin oluşturulması temel hedefler mukavemet ve tokluk, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, çevresel korozyon, hafif malzeme, işlenebilirlik, manyetiklik, yeşil malzeme (özellikle geri dönüştürülebilir Cd ve Cr⁺⁶ içeriği olmayan) ve sayılan bu durumların kombinasyonları olarak nitelendirilebilir [1]. Bu alanlarda yapılabilecek deneysel çalışmalar nükleer santralden, spor enstrümanlarına kadar geniş bir yelpaze de kullanım alanı bulacaktır ve bulmuştur [2]. Yapı içerisindeki tekil fazların etkisinin yanından diğer fazların malzeme üzerindeki etkileri, karmaşık bir durumdur.

* Sorumlu yazar: caksu@firat.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5151-4576, ² 0000-0003-4255-0564

İkincil ve diğer fazların etkilerinin araştırılması, bunların modellenmesi güncel konular arasında popülerliğini devam ettirmektedir [3]. Termodinamik ilkelerinde sistem Gibbs serbest enerjisini izotermal ve izobarik şartlarda indirgemeye çalışır ve denge durumundaki en küçük karışım serbest enerjisinin (ΔG_{mix}) tahmin edilmesinde sistemin karışım entalpisinin (ΔH_{mix}), entropisinin (ΔS_{mix}) (Termal entropiden farklı olarak konfigürasyonel entropinin sıcaklıkta değişiminin olmadığı unutulmamalıdır!) ve sıcaklığın (T) bir biri ile olan bağıntısı aşağıda verilen denklemde gösterilmiştir [1].

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} \quad (1)$$

Bu durum çok elementli alaşımlarla elde edilmiş yüksek entropili alaşımlar için Boltzmann'ın ünlü denklemi ile ifade edilmiştir [4].

$$\Delta S_{konf} = -R\ln(n) \quad (2)$$

Denklem 2 de verilen “n” sayıdaki alaşım içeren karışımlar için kullanılmış karışım entropi değerinin R gaz sabiti ile ilişkilendirilmiş hali yüksek entropili alaşımlar Konfigürasyonel entropi (ΔS_{konf}) için $\Delta S_{konf} \geq 1.5R$ şartı belirlenmiştir [1, 5].

Faz içindeki yapıların belirlenmesi zaten karmaşık olan fazların etkilerinin değerlendirilebilmesi için nispeten önemli bir özelliktir. Bu durum yüksek entropili alaşım tasarım kurgusunda önemlidir. Hume-Rothery kurallarına uygun hazırlanmış alaşımların değerlik elektron konsantrasyonu değerlerinde 6.87 değeri oldukça kritik bir nokta olarak sayılabilir. Bu değerinde altındaki değerlerde tek bir yapı hacim merkezli kübik gözlemlenirken 6.87 ile 8 değerleri arasındaki elektron konsantrasyonu hacim ve yüzey merkezli kristal kafeslerin bir arada olduğunu ifade etmektedir [6]. Yüksek entropili alaşımların bir çok tasarım kombinasyon değerine sahip olsa da literatürdeki çalışmalar Ye ve arkadaşları tarafından raporlandırılmıştır [7]. Bu çalışmalar içerisinde Cantor alaşımı olarak bilinen CrMnFeCoNi denenmiş ve daha sonrasında bu alaşım üzerine bir çok çalışma yapılmıştır [8, 9]. Bu değerli görülen ve bir çok malzeme ile sentezlenerek varyasyonları üretilen Cantor alaşımını geliştirerek var olan bilgilerimize göre yeni sayılabilecek CoNiCrFeMnMo alaşımının üretimini yaparak üretim aşamaları bu çalışmada raporlanmıştır.

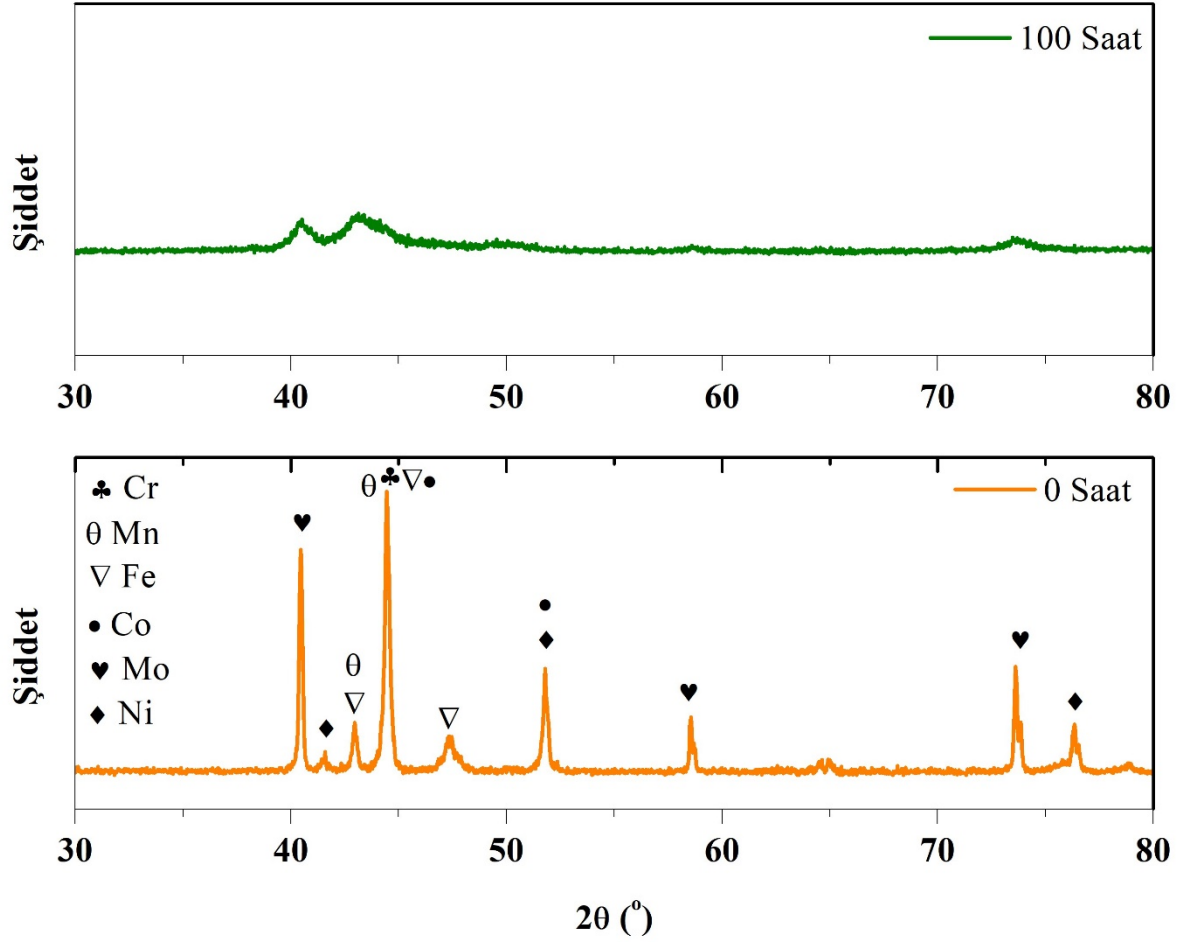
2. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada ticari olarak temin edilen Co (Merck), Ni (Merck), Cr (Merck), Fe (Alfa Aesar), Mo (Merck) ve Mn (Nanografi) tozları kullanılmıştır. Üretilen numunenin bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de verilen oranlara göre tozlar karışımı hazırlanmış ve mekanik alaşımlama yöntemiyle alaşımlar üretilmişlerdir. Mekanik alaşımlama işleminde Retsch PM100 marka cihaz kullanılmış, işlem argon atmosferi altında 100 saat yapılmıştır. Mekanik alaşımlama devri 400 dev/dak, bilye/toz oranı 15/1 olarak seçilmiş, 12 mm ‘lik çelik bilye kullanılmıştır.

Tablo 1. Numunenin kimyasal bileşimi

Element	At.% oranı	Ağ. % oranı
Cr	29.95	26.34
Ni	16.54	16.42
Fe	16.47	15.55
Co	15.55	15.50
Mo	8.97	14.56
Mn	12.52	11.63

Mekanik alaşımlama sırasında farklı sürelerde alınan numuneler X-Ray difraksiyon (XRD) ve Scanning Electron Microscopy (SEM) incelemelerine tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Farklı üretim saatlerinde öğütülmüş CoNiCrFeMnMo alaşımlarının XRD desenleri

Kafes boyutu, kafes gerilimi ve dislokasyon yoğunluğu XRD analizlerinden elde edilmiştir. Kafes boyutu denklemi 3’de verilen Debye-Scherrer formülünden hesaplanmıştır.

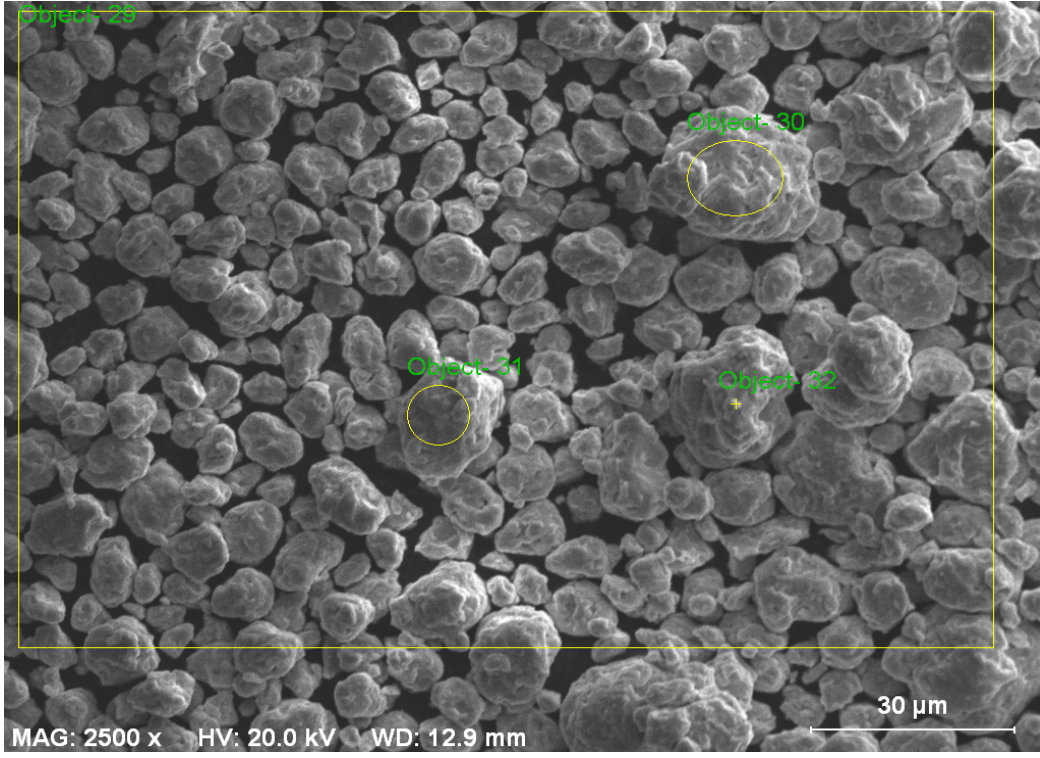
$$D = \frac{K\lambda}{W \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

Burada, D = Kafes boyutu (nm), K= boyutsuz şekil faktörü, λ = X-Ray dalga boyu, W= Maksimum yarı genişlikte, θ = Bragg açısı olarak verilmiştir. Mekanik olarak alaşımlanmış tozlardaki dislokasyon yoğunluğu ise eşitlik 4’deki denkleme göre hesaplanmıştır,

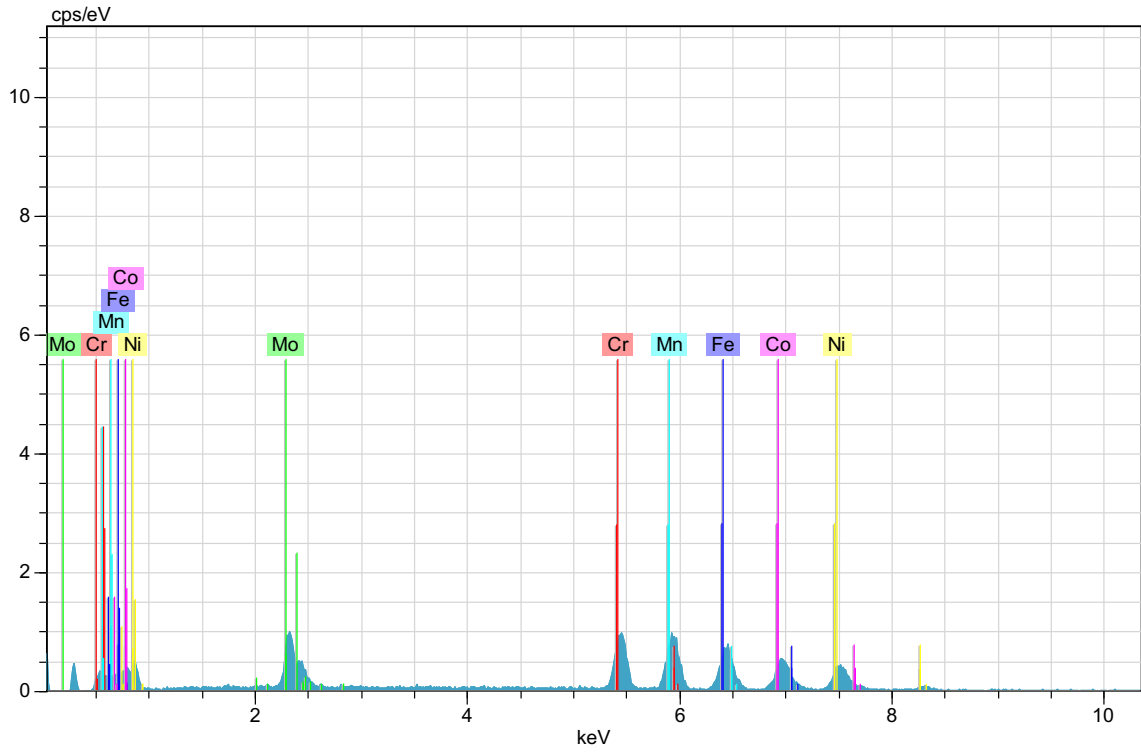
$$\rho_D = 2\sqrt{3} \left(\frac{\varepsilon^2}{D \cdot b} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Burada, D = Kafes boyutu (nm), ε = kafes gerilimi, b = Burgers vektörü, ρ_D = Dislokasyon yoğunluğu olarak verilmiştir. Buna göre, 100 saat mekanik alaşımlama sonucu elde edilen alaşımların kristal boyutu 45 nm olarak hesaplanmıştır. 100 saat mekanik alaşımlama sonunda dislokasyon yoğunluğu $6 \times 10^{16}/m^2$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 2 ve 3’de 100 saat mekanik alaşımlama sonunda elde edilen numuneden alınan SEM görüntüleri ve EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2. 100 saat öğütülmüş CoNiCrFeMnMo alaşımının SEM görüntüsü



Şekil 3. 100 saat öğütülmüş CoNiCrFeMnMo alaşımının EDX yansımaları

100 saat mekanik alaşımlanması sonucunda, bir birine kaynaklaşmış aglomere partiküllerden oluştuğu ve kimyasal olarak gayet homojen olduğu açıkça görülmektedir. Mekanik alaşımlama sonucunda homojen alaşım tozlarının

oluştugu görülmüştür (Şekil 2). Mekanik alaşımlama sonucunda başarılı şekilde yüksek entropili alaşım üretilmiştir.

Ayrıca Miedema modeli kullanılarak ΔH_{mix} hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan değerler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. I-j atom çiftleri için Miedema modeli tarafından hesaplanan $\Delta H_{(i-j)mix}$ ΔH_{i-j} 'nin karıştırılması[10].

$\Delta H_{(i-j)mix}$ kJ mol ⁻¹	Mn	Cr	Ni	Fe	Co
Mn					
Cr	2.00				
Ni	-8.00	-7.00			
Fe	0.00	-1.00	-2.00		
Co	-5.00	-4.00	0.00	-1.00	
Mo	5.00	0.00	-7.00	-2.00	-5.00

Tablo 2’de sunulan değerlere göre hesaplanmış olan farklı yüksek entropi alaşımına özel değerler ise Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. CoNiCrFeMnMo alaşımının farklı değerlik hesaplamaları

ΔS_{mix} (J.(K mol.) ⁻¹)	VEC	ΔH_{mix} (J.(K mol.) ⁻¹)	ΔS_{konf}	T_m (K)
14.31	7.54	-5.74	1.72	1892.64

Tablo 3’de valans elektronu 8’ den küçük olduğundan farklı iki yapı kristal yapısını içerdiği varsayımı düşünüldüğünde bu durum XRD yapısında da gözlenen amorf yapısına yakın olan desen ile destekler niteliktedir. Ayrıca ΔS_{konf} değeri 1.72 çıkarak $\Delta S_{konf} \geq 1.5R$ şartı sağlanmış olup yüksek entropili alaşım sınıfında olduğunu göstermektedir. Alaşım içerisindeki elementlerin molar yüzdelerinin erime sıcaklıkları ile ortalaması alınarak tahmini alaşımın erime sıcaklığı (T_m) hesaplanmıştır.

5. Sonuçlar

Yüksek entropili alaşımlar farklı yapıların bir arada bulunması ile tahminlerin ötesinde özellikler gösterebilmektedir. Bu çalışmamızda özellikle literatürde sıklıkla çalışılmış olan Cantor alaşımının var olan bilgilerimize göre çalışmamış olduğunu düşündüğümüz farklı bir kombinasyonu olan CoNiCrFeMnMo alaşımının üretimi yapılarak yapısal karakterizasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmada 100 saat mekanik öğütme sonrasında mekanik alaşımlama yapılmıştır. 100 saat sonunda yapısal olarak amorf bir yapıyı işaret eden bir XRD ışıması gözlemlenmiş fakat bu XRD yansımasının farklı iç içe girmiş olan çoklu karmaşık bir ortamı temsil ettiği gözlemlenmiştir. Mekanik olarak alaşımlanmış CoNiCrFeMnMo tozlarının mekanik alaşımlama öncesi ve sonrası XRD patternleri Şekil 1’ de verilmiştir. Mekanik alaşımlama öncesi alınan numunede Co, Cr, Fe, Mn, Mo ve Ni pikleri tespit edilmiştir. Yaklaşık 44°’deki şiddetli pik Co, Cr, Fe, ve Ni in karakteristik pikleriyle uyumaktadır. 41°’deki pik Mo, 42°’deki Ni ve 42°’deki Fe ve Mn, 46°’deki pik Fe’in, 52°’deki Fe ve Co’in, 58° ve 73°’deki Mo’in ve 76.5°’deki pik Ni’in karakteristik pikleriyle uyumaktadır. 100 saat mekanik alaşımlama sonunda yapının tamamen amorf olduğu görülmüştür. Mekanik alaşımlama öncesi görülen piklerin tamamı genişlemiş ve şiddetleri neredeyse tamamen azalmıştır. Bu durum, bilye darbeleri ile kristal kafesin bozulduğunu ve yapının tamamen amorf olduğunu göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Jien-Wei, Y., Recent progress in high entropy alloys. Ann. Chim. Sci. Mat, 2006; 31(6): 633-648.
 [2] Tsai, M.-H. and J.-W. Yeh, High-entropy alloys: a critical review. Materials Research Letters, 2014; 2(3): 107-123.

- [3] George, E.P., D. Raabe, and R.O. Ritchie, High-entropy alloys. *Nature reviews materials*, 2019; 4(8): 515-534.
- [4] Huo, W., et al., Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTax eutectic high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018; 735: 897-904.
- [5] Yeh, J.W., et al., Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004; 6(5): 299-303.
- [6] Ibrahim, P.A., İ. Özkul, and C.A. Canbay, An overview of high-entropy alloys. *Emergent Materials*, 2022: 1-18.
- [7] Ye, Y., et al., High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*, 2016; 19(6): 349-362.
- [8] Cantor, B., et al., Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004; 375: 213-218.
- [9] Cantor, B., Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 2021; 120: 100754.
- [10] Takeuchi, A. and A. Inoue, Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element. *Materials transactions*, 2005; 46(12): 2817-2829.

Çok Etmenli Sistemler için Olay Tetiklemeli İşbirlikçi Kontrol

Neslihan KARAŞ¹, Janset DAŞDEMİR^{2*},

^{1,2} Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹ nkaras@yildiz.edu.tr, ^{2*} janset@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 04/11/2022;

Kabul/Accepted: 28/03/2023)

Öz: Bu çalışmada, merkezi yapıdaki çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrol problemine yer verilmiştir. Buna göre, tek integratör ile ifade edilebilen çok etmenli sistemler için olay tetiklemeli işbirlikçi kontrol algoritması ele alınmıştır. Lyapunov fonksiyonu yardımıyla, durum fonksiyonunun normuna göre ölçüm hatasının oranına bağlı olan bir olay tetiklemeli kontrol kuralından faydalanılmıştır. Kontrol sinyalleri, yalnızca tetikleme koşulu gerçekleştiğinde uygulanmıştır. Böylelikle, ağ üzerindeki iletim yükü ve dolayısıyla iletişim maliyeti azaltılmıştır. Ayrıca, Zeno-davranış ele alınmış ve buna göre, olaylar arası sürelerde kesin pozitif bir alt sınırın varlığı incelenmiştir. Haberleşme gecikmesinin olduğu durum için farklı bir olay tetiklemeli mekanizma önerilmiştir. Son olarak, önerilen olay tetiklemeli işbirlikçi kontrol algoritmalarının etkinliği benzetim çalışmaları ile desteklenmiş, çok etmenli sistemin uzlaşma noktasına ulaştığı ve Zeno davranışın oluşmadığı gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Olay tetiklemeli kontrol, periyodik olay tetiklemeli kontrol, ağ bağlantılı çok etmenli sistemler, işbirlikçi kontrol, haberleşme gecikmesi.

Event-Triggered Cooperative Control for Multi-Agent Systems

Abstract: This paper investigates the cooperative control problem of centralized multi-agent systems (MASs). An event-triggered cooperative control algorithm for multi-agent systems with single integrator dynamics is discussed. With the help of a Lyapunov function, an event-triggered control rule is used, which depends on the ratio of the measurement error according to the norm of the state function. Control signals are applied only when the event-triggering condition is met. Thus, the transmission load on the network and therefore the communication cost is reduced. Zeno-behavior has also been investigated. Accordingly, the existence of a strictly positive lower bound on the inter-event times is shown. Another event-triggering mechanism is proposed for the case of communication delay. Finally, simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the event-triggered cooperative control algorithms. It has been provided that MASs reach an agreement point and Zeno-behavior does not occur.

Key words: Event-triggered control, periodic event-triggered control, networked multi-agent systems, cooperative control, communication delay.

1. Giriş

Karmaşık sistemlerin modellenmesinde, sistem çok sayıda alt bileşene ayrılabilir ve bu alt bileşenlerin birbirleriyle etkileşiminden yararlanılarak tüm sistemin davranışı modellenebilir [1]. Bu bakış açısıyla geliştirilen çok etmenli sistemler, son yıllarda birçok araştırmacının yoğun ilgisini çekmiştir [2]. Bu çalışmada çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrol problemi ele alınmıştır. Çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrol problemi tekil sistemlerin ortak bir amaç etrafında senkronize bir şekilde hareket edebilmesini sağlamak olarak tanımlanabilir. Çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrol problemi, çoklu-robot kontrolü, insansız araç kontrolü, uydu konum kontrolü benzeri birçok alanda kullanılmaktadır [3-6].

İnternet çağı sayesinde, fiziksel dünyayı dijital dünyaya bağlamak için akıllı cihazlar birbirleriyle haberleşerek etkileşime girebilir hale gelmiştir [7]. Algılama, iletişim, hesaplama ve kontrol kavramları farklı işlem ve bilgi seviyelerine entegre edilmiştir. Birden çok ajanı bağlamak için kablolu/kablosuz ağların geliştirilmesiyle, ağ bağlantılı çok etmenli sistemler ortaya çıkmıştır. Ağların varlığı, uygulamaların verimliliğini ve esnekliğini artırıp kurulum, bakım süresini ve maliyetini azaltmıştır [8]. Bu sistemlerde kontrol kuralının dijital platformlarda uygulanması için tasarım ve analiz kolaylığı nedeniyle genellikle zaman tetiklemeli kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Bu yapıda kontrol algoritması örnekleme zamanına bağlı olarak periyodik şekilde güncellenmektedir [9]. Ancak zaman tetiklemeli kontrolün bazı sakıncaları vardır. Örneğin, istenen sistem performansını garanti etmek için örnekleme periyodu genellikle küçük ayarlanır. Bu durum fazladan örneklenmiş

* Sorumlu yazar: janset@yildiz.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6359-0624, ^{2*} 0000-0003-1886-5240

veri sebebiyle ağ tıkanıklığına yol açabilmektedir [10,11]. Ağ tıkanıklığı ise sistem performansını düşürerek bazı durumlarda kararsızlığa sebep olabilir [12].

Geleneksel kontrol yöntemlerinde çok etmenli sistemlerin sürekli ölçümlere ve/veya kontrol sinyallerine erişebildiği varsayılır. Böyle bir varsayım, çok etmenli sistemler için yüksek güçlü hesaplama ve ideal bir iletişim ortamını zorunlu kılar [6]. Kontrol görevlerinin periyodik olarak yürütülmesi ağ bant genişliği, hesaplama kaynakları gibi sistem kaynaklarının israfına yol açmaktadır ki bu tür sistemler sınırlı iletişim ve enerji kaynağına sahiptirler. Bu sebeple, sistem kaynaklarının gereksiz israfını azaltmak için alternatif bir kontrol yöntemi olan olay tetiklemeli kontrol önerilmiştir [13,14].

Olay tetiklemeli kontrolün arkasında yatan temel prensip, önceden belirlenen performans kriterleri ihlal edildiğinde kontrol eylemlerini tetiklemek, böylece performans ve genel iletişim yükü arasında periyodik muadillerine göre daha iyi bir denge sağlamaktır [15,16]. Genellikle, olay tetiklemeli kontrol yapısında sinyallerin ne zaman güncellenmesi gerektiğini belirleyen bir olay tetikleme mekanizması tasarlanır. Olay tetiklemeli mekanizma, sistem durumunun ne zaman kontrolöre iletileceğine ve kontrol sinyalinin ne zaman güncelleneceğine karar verir. Olay tetiklemeli mekanizma statik [13] veya dinamik [17] olabilir. Dinamik olay tetiklemeli mekanizma statikten farklı olarak ek iç dinamik değişkenler içerir [18].

Olay tetiklemeli kontrol genel olarak reaktiftir. Yani, olay tetiklemeli mekanizmayı oluşturan performans kriterini belirlemek için sistem durumu sürekli izlenir [19]. Performans kriteri olarak Lyapunov benzeri fonksiyonların kullanılması literatürde en yaygın yöntemdir [20]. Lyapunov fonksiyonu LMI tabanlı koşullar ya da integral tabanlı yaklaşımlar içerecek şekilde geliştirilebilmektedir [21,22].

Olay tetiklemeli kontrol, son on yılda geniş çapta araştırılmıştır ve çeşitli kontrol konularını ele almak için teorik yöntemler geliştirilmiştir. Kayan kipli kontrol [23], model öngörülü kontrol [24-26], uyarlamalı kontrol [27, 28] gibi kontrol yapılarıyla birleştirilerek kontrol performansı artırılmıştır. Kontrol yapısı olarak model öngörülü kontrol yönteminin kullanıldığı diğer bir çalışmada tüm ajanların tetikleme koşullarının ne zaman kontrol edileceği uyarlamalı olarak belirlenmiştir [29].

Olay tetiklemeli kontrol sürekli zamanlı [30], ayrık zamanlı [31], hibrit [32], anahtarlamalı [33,34] gibi farklı sistem yapılarına uygulanabilir. Olay tetiklemeli kontrolün uygulama alanları oldukça geniştir [35-36]. Olay tetiklemeli iletişim ve kontrol, çok etmenli sistemlerde için de bir araştırma konusudur [37]. Olay tetiklemeli kontrol stratejileri, iletişim, hesaplama ve depolama kaynakları sınırlı olduğunda çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrolü için de uygun bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [38]. Buna bağlı olarak ajan dinamiğinin tek integratör [39], ayrık zamanlı tek integratör [40], çift integratör [41], ayrık zamanlı çift integratör [42], doğrusal dinamiğe sahip [43], yüksek mertebeli [44], hibrit [45] yapıda olduğu çok etmenli sistemler için ele alınmıştır. Ancak yukarıda yer alan olay tetiklemeli kontrol yöntemine yönelik yapılan çalışmalarda zaman gecikmesi ve etkileri ele alınmamıştır.

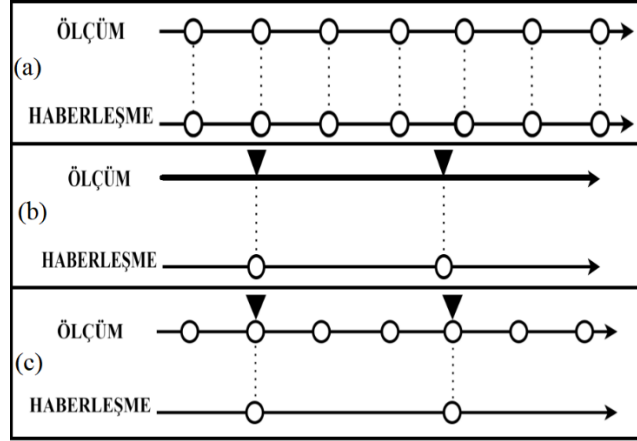
Dinamik sistemlerde sinyal işleme ve yayılım nedeniyle zaman gecikmesi kaçınılmaz olarak ortaya çıkar. Bu nedenle, olay tetiklemeli kontrol protokolünü tasarlarken zaman gecikmesini dikkate almak önemlidir [46]. Olay tetiklemeli kontrol ile ilgili literatürdeki çoğu çalışma, zaman gecikmesinin sistem performansı üzerindeki etkisini dikkate almaya da konunun son dönemde ilgi çektiği gözlenmiştir. [46]'da genel doğrusal dinamiğe sahip çok etmenli sistemler için haberleşme gecikmesi ele alınmıştır. [47]'de genel doğrusal dinamiğe sahip ağ bağlantılı sistemler için sınırlı, küçük değerli bir zaman gecikmesi kabulü yapılmıştır. [48]'de stokastik doğrusal olmayan dinamiğe sahip ağ bağlantılı sistemler için dinamik ve statik olay tetiklemeli kontrol yöntemi incelenmiştir. [49]'da ajanları Euler-lagrange sistem dinamiğine sahip çok etmenli sistem için [50]'deki olay tetiklemeli kontrol mekanizması kullanılarak sabit haberleşme gecikmesi ele alınmıştır. [51]'de ise ajanları tek integratör dinamiğe sahip çok etmenli sistemler için haberleşme gecikmesi söz konusudur. [52]'de zaman gecikmesi güçlü bağlantı kabulü altında tek integratör dinamik modeline sahip çok etmenli sistemler için irdelenmiştir. [53]'te ise genel doğrusal modele sahip çok etmeli sistemler için haberleşme gecikmesi problemi ele alınmış olsa da anlaşma noktasına tam olarak ulaşılamamıştır. Söz konusu çalışmalar incelendiğinde genel olarak etkin bir zaman gecikmesinin ele alınmadığı gözlemlenmiştir.

Olay tetiklemeli kontrolde önemli başka bir sorun Zeno davranış olarak tanımlanan sonlu bir zaman aralığında sonsuz sayıda olay gerçekleşmesi durumudur. Bu davranıştan kaçınmak için iletim süreleri arasındaki zaman kesin pozitif olmalıdır [54]. Problemin çözümüne yönelik periyodik olay tetiklemeli kontrol adı verilen bir teknik önerilmiştir [55]. Bu yapıda tetikleme anları, periyodik olarak değerlendirilen bir tetikleme mekanizması tarafından üretilir. Sürekli olay tetiklemeli kontrolde ihtiyaç duyulan sürekli durum ölçümü, önerilen bu stratejide artık geçerli değildir. Bu tetikleme mekanizmasının en önemli avantajları: olaylar arası süre için tekdüze bir pozitif alt sınır garanti edebilmesi ve sürekli ölçüm gereksinimini gidermesi nedeniyle olay tetiklemeli kontrol yöntemine nazaran daha ekonomik ve gerçekçi olmasıdır [56,57].

Periyodik olay tetiklemeli kontrol çok etmenli sistemlerde de oldukça etkindir [58-60]. [58]'de ajanları tek integratör dinamiğine sahip çok etmenli sistem problemi ele alınmıştır. Genel doğrusal dinamiğe sahip ajanlar içeren çok etmenli sistemler için periyodik olay tetiklemeli kontrol [59]'da verilmiştir. [60]'da haberleşme gecikmesinin sınırlı ve küçük değerli olduğu kabul edilmiştir.

[61]'de önce gecikmesiz durum için periyodik olay tetiklemeli kontrolün tetikleme mekanizması statik olarak [62]'deki gibi türetilmiştir. Daha sonra gecikmesiz ve gecikmeli durum için iki ayrı tetikleme mekanizması geliştirilmiştir.

Şekil 1'de bahsedilen zaman tetiklemeli kontrol, olay tetiklemeli kontrol ve periyodik olay tetiklemeli kontrol yöntemleri görselleştirilmiştir.



Şekil 1. (a) Zaman tetiklemeli kontrol, (b) olay tetiklemeli kontrol, (c) periyodik olay tetiklemeli kontrol.

Bu çalışmada, olay tetiklemeli kontrol metodunun sürekli durum ölçüm gereksinimini ve Zeno davranışı elimine eden periyodik olay tetiklemeli kontrol yöntemi, haberleşme gecikmesi altında çok etmenli sistemlerin işbirlikçi kontrol probleminin çözümüne yönelik önerilmiştir. Zaman tetiklemeli kontrol, olay tetiklemeli kontrol ve periyodik olay tetiklemeli kontrol haberleşme gecikmesi altında dört ajan içeren ağ yapılı bir sistem için tasarlanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çalışmanın geri kalan kısımları şu şekilde düzenlenmiştir: problem tanımı Bölüm 2'de yapılmıştır. Olay tetiklemeli işbirlikçi kontrol yapısı Bölüm 3'te verilmiştir. Bölüm 4'te haberleşme gecikmesinin olduğu durum için farklı bir tetikleme mekanizması önerilmiştir. Bölüm 5'te benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Bölüm 6'da ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Problem Tanımı

Bu bölümde ilk olarak, çalışmanın genelinde yararlanılan cebirsel çizge teorisine yer verilmiştir [63,64]. Sonrasında ise sistem modeli tanımlanmıştır. Her bir etmeni tek integratör ile modellenen, N adet ajandan oluşan ağ yapılı bir sistem ele alınmıştır.

1.1. Cebirsel çizge teorisi

Çizge kuramı geniş kapsamlı bir konudur. Çok etmenli yapılar için sıklıkla kullanılır. Bu bölümde yalnızca çok etmenli sistemler ve kontrolü için gerekli olan tanımlar ve kavramlar verilmiştir.

Ajanlar düğümler ile gösterilir. Ajanlar arası bilgi akışı kenarlar ile temsil edilir. Düğüm kümesi V , kenar kümesi E ile gösterilir. Bir kenar ilişki kurduğu düğümler ile temsil edilir. Çizge $G = \{V, E\}$ ile verilir.

Eğer, çizgedeki tüm kenarlar için veri alışverişi iki yönlü ise yönsüz çizge denir. Eğer bu durumu bozan en az bir kenar varsa yönlü çizge olarak adlandırılır. Bir yönsüz çizgede farklı tüm düğümler arasında bu düğümleri bağlayan bir yol bulunabiliyorsa bağlı çizgedir. Başka bir deyişle herhangi bir düğüm çifti arasında bir yol bulunan yönsüz çizgeler bağlıdır.

N düğümlü yönsüz bir G çizgesi için komşuluk matrisi Denklem 1 ile verilen $N \times N$ matrisidir. Eğer $(i, j) \in E$ ise $a_{ij} = 1$ aksi halde $a_{ij} = 0$ 'dır.

$$A = A(G) = (a_{ij}) \quad (1)$$

i . düğümün derecesi d_i , Denklem 2’de verildiği gibi tanımlanır.

$$d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (2)$$

G ’nin derece matrisi D ile gösterilir ve Denklem 2’de verilen d_i ’lerin $N \times N$ köşegen matrisidir. G ’nin Laplace matrisi simetrik, pozitif yarı tanımlı bir matris olup Denklem 3’te verilmiştir.

$$L = D - A \quad (3)$$

Bağlı bir çizge için, Laplace matrisinin tek bir sıfır öz değeri vardır ve karşılık gelen öz vektör, birler vektörüdür. L ’nin öz değerleri $0 = \lambda_1(G) \leq \lambda_2(G) \dots \leq \lambda_N(G)$ ile gösterilir. Eğer G bağlıysa, o zaman $\lambda_2(G) > 0$ ’dır.

Bu çalışmada ajanlar arasındaki iletişim topolojisi, yönsüz ve bağlı bir çizge ile karakterize edilmiştir.

1.2. Sistem modeli

Her bir etmeni Denklem 4’te verildiği gibi tek integratör ile modellenen, N adet ajandan oluşan bir sistem ele alınmıştır. Burada $x_i \in \mathbb{R}$ ajan i ’nin durumunu temsil eder. Vektör olarak $x = [x_1 \dots x_N]^T$ şeklinde yazılır.

$$\dot{x}_i = u_i, \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

Uzlaşma kontrol kuralı Denklem 5’te verilmiştir [65]. Burada u_i her bir ajanın kontrol sinyalini ifade eder. Herhangi bir ajanın haberleştiği diğer ajanları içeren küme ise o ajanın haberleşme kümesidir ve $N_i \subseteq \{1, \dots, N\}$ şeklinde gösterilmiştir.

$$u_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j - x_i) \quad (5)$$

Denklem 5’teki kontrol kuralı Denklem 4’te yerine yazılırsa sistem Denklem 6’daki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_i = -x_i \sum_{j \in N_i} a_{ij} + \sum_{j \in N_i} a_{ij} x_j = -d_i x_i + [a_{i1} \dots a_{iN}]^T [x_1 \dots x_N] \rightarrow \dot{x} = -Dx + Ax = -Lx \quad (6)$$

Bağlı bir çizge için, tüm ajanların durumları, başlangıç durumlarının ortalaması ile elde edilen ve anlaşma noktası adı verilen bir noktaya yakınsar. Bu nokta Denklem 7’de verilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i(0) \quad (7)$$

3. Olay Tetiklemeli İşbirlikçi Kontrol

Her $i \in N$ ve $t \geq 0$ için durum ölçüm hatası $e_i(t)$ ile ifade edilsin. Vektör olarak $e(t) = [e_1(t), \dots, e_N(t)]^T$ şeklinde yazılır. Olayların tetiklendiği ayırık zaman anları, $f(e(t), x(t)) = 0$ koşulu geçerli olduğunda tanımlanır. Olay tetiklemeli yürütmelerin sırası şu şekilde gösterilir: $t_0, t_1 \dots \forall t_k, k = 0, 1, \dots$ için $f(e(t_k), x(t_k)) = 0$ ile tanımlanır. $t_0, t_1 \dots$ olay dizisi $u(t_0), u(t_1) \dots$, kontrol güncellemeleri dizisine karşılık gelir. Kontrol kuralı olay süreleri $t_0, t_1 \dots$ arasında Denklem 8’de ifade edildiği gibi parçalı sabittir.

$$u(t) = u(t_k), \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (8)$$

Kontrol kuralı sürekli olmaksızın yalnızca ayırık anlarda hesaplanacaktır. Durum değişkeni ölçüm hatası belirli bir eşişge ulaştığında tetikleme gerçekleşir. Durum ölçüm hatası Denklem 9’daki gibi tanımlanır.

$$e(t) = x(t_k) - x(t) \quad k = 0,1, \dots \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (9)$$

Yayılan durum $\hat{x}(t)$ ile gösterilir ve Denklem 10'da verilmiştir.

$$\hat{x}(t) = x(t_k), \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (10)$$

Buradaki t_k seçimi f fonksiyonu tarafından belirlenir. Önerilen kontrol kuralı $u(t) = u(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1})$ şeklindedir ve $u(t) = -L\hat{x}(t), \forall t \in [t_k, t_{k+1})$ ideal kontrol kuralının olayla tetiklenen analogisi olarak tanımlanır. Buna göre dinamik sistem Denklem 11'deki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_i = u_i = -L\hat{x}(t) = -L(x(t) + e(t)) \quad (11)$$

Lyapunov aday fonksiyonu $f(e(t), x(t))$ koşulu için kullanılır. Sistem için aday Giriş-Durum-Kararlı (ISS) Lyapunov aday fonksiyonu Denklem 12'deki gibi seçilmiştir [39].

$$V = \frac{1}{2} x^T L x \quad (12)$$

Denklem 12'nin zamana bağlı türevi Denklem 13'te verilmiştir.

$$\dot{V} = x^T L \dot{x} = -x^T L L (x + e) = -\|Lx\|^2 - x^T L L e \quad (13)$$

Denklem 13'teki ifade Denklem 14'teki gibi üstten sınırlandırılabilir.

$$\dot{V} \leq -\|Lx\|^2 + \|Lx\| \|L\| \|e\| \quad (14)$$

Hata sinyalinin Denklem 15'teki şartı sağlaması durumunda

$$\|e\| \leq \sigma \frac{\|Lx\|}{\|L\|}, \quad \sigma > 0 \quad (15)$$

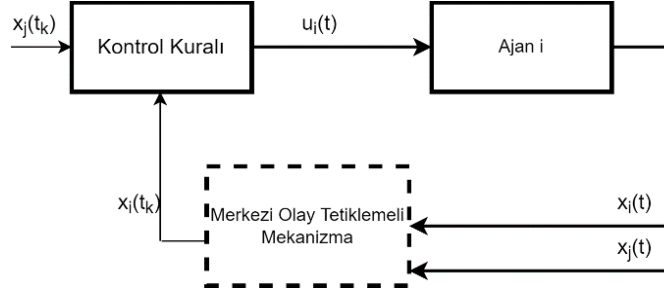
$\|Lx\| \neq 0$ ve $\sigma < 1$ için negatif olan Denklem 16'daki denklem elde edilir.

$$\dot{V} \leq (\sigma - 1) \|Lx\|^2 \quad (16)$$

Böylece olaylar Denklem 17 sağlandığı anda tetiklenir.

$$f(e, x) = \|e\| - \sigma \frac{\|Lx\|}{\|L\|} = 0 \quad (17)$$

Olay tetiklemeli kontrolün blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Sistem blok diyagramı.

Her t_k anı için kontrol kuralı $u(t_k) = -L\hat{x}(t)$ şeklindedir ve bir sonraki tetikleme anına kadar sabittir; $u(t) = -L\hat{x}(t), \forall t \in [t_k, t_{k+1})$.

Kontrol görevi bir kere yürütüldüğünde hata sıfırlanır, çünkü o noktada belirli bir olay zamanı için $e(t_k) = \hat{x}(t) - \hat{x}(t) = 0$ olur ve Denklem 15 sağlanır.

İletim süreleri arasında kesin pozitif bir alt sınır bulmak için $\frac{\|e\|}{\|Lx\|}$ teriminin türeviden yararlanılır. Denklem 18'de bu terimin türevi verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\|e\|}{\|Lx\|} = \frac{d}{dt} \frac{\sqrt{e^T e}}{\sqrt{(Lx)^T Lx}} = \frac{(e^T e)^{-1/2} e^T \dot{e} ((Lx)^T Lx)^{-1/2} - \frac{d}{dt} \sqrt{(Lx)^T Lx} (e^T e)^{1/2}}{(Lx)^T Lx} = \frac{1}{2} ((Lx)^T Lx)^{-1/2} \frac{(\dot{x}^T L^T Lx + x^T L^T L\dot{x})}{2x^T L^T L\dot{x}} \quad (18)$$

Denklem 9'a göre hatanın türevi Denklem 19'daki gibi ifade edilir.

$$\dot{e}(t) = -\dot{x}(t) \quad (19)$$

Denklem 19, Denklem 18'de yerine yazılırsa Denklem 20 elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\|e\|}{\|Lx\|} = -\frac{e^T x \|Lx\|}{\|e\| \|Lx\| \|Lx\|} - \frac{(Lx)^T L\dot{x} \|e\|}{\|Lx\|^2} \quad (20)$$

Denklem 20, Denklem 21'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\|e\|}{\|Lx\|} \leq \frac{\|\dot{x}\|}{\|Lx\|} \left(1 + \frac{\|L\| \|e\|}{\|Lx\|}\right) \quad (21)$$

Denklem 11, Denklem 22'deki gibi yazılabilir.

$$\|\dot{x}\| \leq \|Lx + Le\| \leq \|Lx\| + \|Le\| \quad (22)$$

Denklem 22, Denklem 21'de yerine yazılırsa Denklem 23 elde edilir.

$$\frac{\|\dot{x}\|}{\|Lx\|} \left(1 + \frac{\|L\| \|e\|}{\|Lx\|}\right) \leq \left(1 + \frac{\|L\| \|e\|}{\|Lx\|}\right) \frac{\|Lx\| + \|Le\|}{1 + \frac{\|Le\|}{\|Lx\|}} \quad (23)$$

Son olarak $\|Le\| \leq \|L\| \|e\|$, Denklem 23'te kullanılırsa Denklem 24 elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\|e\|}{\|Lx\|} \leq \left(1 + \frac{\|L\|\|e\|}{\|Lx\|}\right)^2 \quad (24)$$

Alt sınır için $\frac{\|e\|}{\|Lx\|} = \phi$ şeklinde ifade edildiğinde Denklem 25 yazılabilir.

$$\dot{\phi} = (1 + \|L\|\phi)^2 \quad (25)$$

Denklem 15'ten ve diferansiyel Denklem 25'in çözümünden yararlanılarak olaylar arası süre T^* için kesin pozitif alt sınır Denklem 26'daki gibi elde edilir.

$$t_{k+1} - t_k \geq T^* = \frac{\sigma}{\|L\|(1+\sigma)} \quad (26)$$

Bu yöntem Zeno davranış sorununu başarıyla ele almasına karşın haberleşme gecikmesi probleminde yeterli olmamıştır. Bu nedenle Bölüm 4'te daha etkili bir mekanizma önerilmiştir.

4. Haberleşme Gecikmesi ile Periyodik Olay Tetiklemeli İşbirlikçi Kontrol

Haberleşme gecikmesi için Denklem 17'deki koşulun yetersiz kaldığı benzetim çalışmalarında gösterilmiştir. Bunun için [66] incelenmiştir; güç tüketimini azaltmak için periyodik olay tetiklemeli kontrol kullanılmıştır. Olay tetiklemeli kontrol için incelenen önceki yöntemde tetikleme koşulu sürekli kontrol edilirken, bu yöntemde yalnızca örnekleme anlarında, periyodik olarak bakılması yeterli olmaktadır. Bu anlara olay-kontrol anı adı verilir ve olası tetikleme anları $t_k \in \{0, h, 2h, 3h \dots\}$ 'dir. Böylece, olaylar arası süre h ile sınırlanır [67].

Uygulanacak yöntemde tetikleme kontrolünün periyodik olması ve yalnızca tetikleme anlarında kontrol işaretinin yenilenmesi nedeniyle, ayrık zamanlı kontrolün ve olay tetiklemeli kontrolün uygun biçimde yorumlanması gibi düşünülebilir.

Kontrol kuralı Denklem 27'de verilmiştir [68].

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t - \tau) - \hat{x}_i(t - \tau)) \quad (27)$$

Denklem 27'deki kontrol kuralı Denklem 4'te yerine yazılırsa sistem Denklem 28'deki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_j(t - \tau) - \hat{x}_i(t - \tau)) \rightarrow \dot{x} = -L\hat{x}(t - \tau) \quad (28)$$

Olay tetiklemeli mekanizma Denklem 29'da verilmiştir [66]. İlk olay $t_0 = 0$ 'da gerçekleşir. Denklem 29'un sağlandığı q değerleri için $t_{k+1} = t_k + qh$ olarak ayarlanır. q pozitif bir tam sayıdır.

$$|x_i(t_k + qh) - x_i(t_k)| > \rho \left| \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\hat{x}_i(t_k + (q-1)h) - \hat{x}_j(t_k + (q-1)h)) \right| \quad (29)$$

Denklem 29 sağlandığında ilgili ajan veri örneklemesini gerçekleştirir ve örneklenmiş durumu yayar. Örneklenmiş durum komşulara yayılırken τ zaman gecikmesi olduğu ve $0 \leq \tau < h$ varsayılmıştır. Bu varsayıma göre bir sonraki olay-kontrol anından önce ajan i 'nin örneklenmiş durumu alması gerekir. Böylece örneklenmiş durumu olay-kontrol anlarında tüm ajanlar kullanabilir.

Periyodik olay tetiklemeli mekanizma Denklem 29 ile kontrol kuralı Denklem 27 altındaki çok ajanlı sistemde, eğer Denklem 30-32'deki kısıtlamalar sağlanırsa, Denklem 4'deki dinamiğe sahip ajanların durumları asimptotik olarak başlangıç durumlarının ortalaması \bar{x} 'ye yakınsar [66].

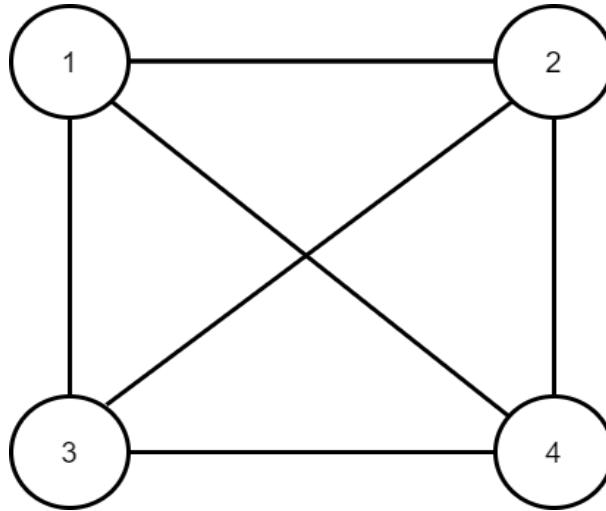
$$0 < \rho < \frac{1}{\lambda_N(G)} \quad (30)$$

$$0 < h < \frac{2(1-\lambda_N(G)\rho)}{\lambda_N(G)} \quad (31)$$

$$0 < \tau < \frac{1}{\lambda_N(G)} \left(1 - \lambda_N(G)\rho \frac{\lambda_N(G)h}{2}\right) \quad (32)$$

5. Benzetim Çalışması

Şekil 3'te çizge diyagramı verilen dört ajanlı çok etmenli sistem düşünülmüştür. Sisteme ait benzetim çalışması Matlab/Simulink üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Çizge diyagramı.

Şekil 3'ten yararlanılarak Laplace matrisi (33)'teki gibi bulunur.

$$L = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Laplace matrisinde verilen iletişim ağı ile 4 adet tek integratör sistemin kontrolü için sürekli zaman kontrolü ve olay tetiklemeli kontrol olmak üzere iki farklı paradigmada algoritma uygulanmaktadır.

İlk koşullar $x_0 = [-0.5 \ 1 \ 1.75 \ 3.5]^T$ şeklindedir.

İlk olarak zaman gecikmesinin olmadığı durum için Denklem 17'deki olay tetiklemeli mekanizma değerlendirilmiştir. $\sigma = 0.65$ seçilmiştir. İlgili sonuçlar Şekil 4-6'da verilmiştir.

Şekil 4'te, haberleşme gecikmesi olmadan her iki durum için durum değişkenlerinin zaman değişimi verilmektedir. Zaman tetiklemeli ve olay tetiklemeli algoritmanın uygulanması sonucunda hemen hemen aynı sonuçlar elde edilir. Zaman tetiklemeli kontrol için örnekleme süresi 0.0001 olarak seçilmiştir.

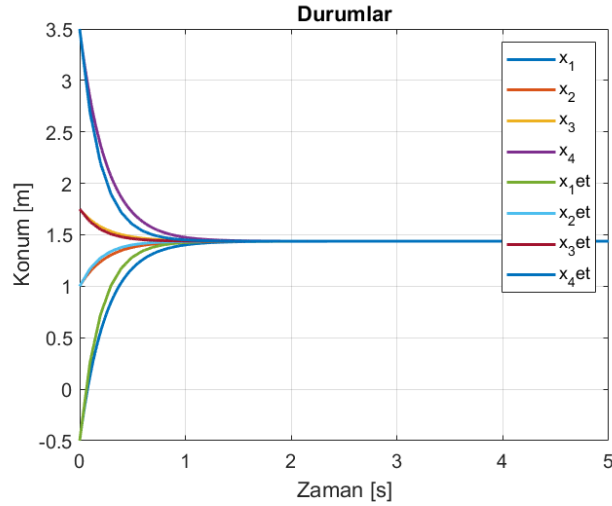
Şekil 5'te, kontrol sinyali normu verilmiştir. Sistem durumları anlaşılabilir istenen noktaya yaklaştıktan sonra, kontrol sinyali ve kontrol sinyalinin normu beklendiği gibi sifira gider, böylece durum değişkeninin değişiminin sifir olması garanti edilebilir.

Şekil 6'da, düz çizgi hata normunun değişimi, kesikli çizgi maksimum hata olan $\|e\|_{max} = \sigma \frac{\|Lx\|}{\|L\|}$ 'yi temsil etmektedir. Olay tetiklemeli kontrolde tetikleme anları, hatanın maksimum değeri ile belirlenir. Hata, maksimum değere ulaştığında, kontrol sinyali yeniden hesaplanır ve bir sonraki tetikleme zamanına kadar sabit tutulur. Tetikleme sırasında hata değeri sifir olur.

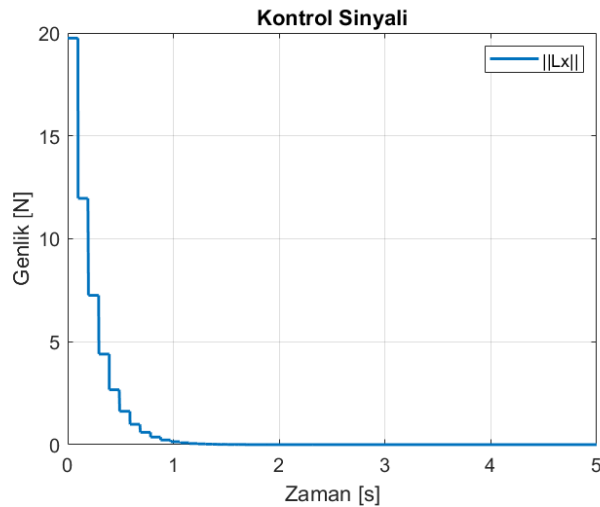
$\tau = 0.155$ seçilerek Denklem 17'deki olay tetiklemeli mekanizma altında elde edilen durum değişkenlerinin değişimi, kontrol sinyali normu, hata normunun değişimi grafikleri sırasıyla Şekil 7- 9'da verilmiştir. Şekil 7'de, olay tetiklemeli kontrolde ajanların ortak bir noktaya varamadığı açıkça görülmektedir. Şekil 9'da maksimum hata sınırının aşıldığı görülmüştür.

Şekil 10'da, Denklem 29'daki olay tetiklemeli mekanizma kullanıldığında durum değişkenlerinin değişimi verilmiştir. Denklem 30-32'deki kısıtlamalar baz alınarak $\rho = 0.0005, h = 0.17$ seçilmiştir. Haberleşme gecikmesi yine $\tau = 0.155$ 'dir.

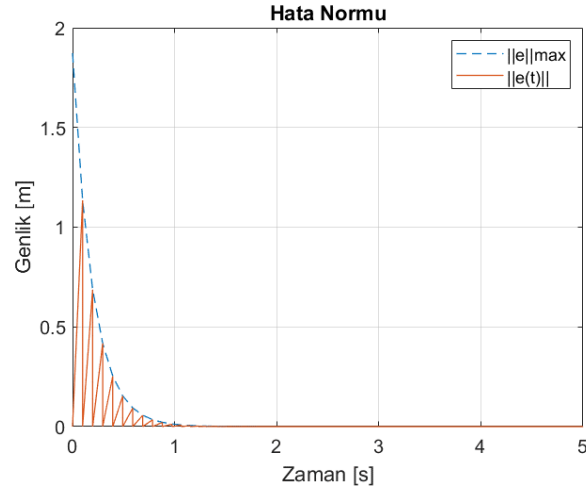
Şekil 10'da, bir miktar aşım ve yerleşme zamanının uzamasıyla anlaşma noktasına varıldığı görülmüştür. Şekil 11'de kontrol sinyali normu verilmiştir.



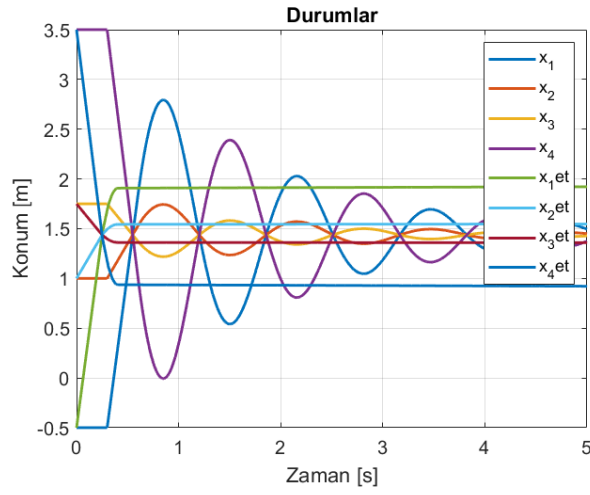
Şekil 4. Zaman ve olay tetiklemeli kontrol sistemlerine ait durum değişkenleri.



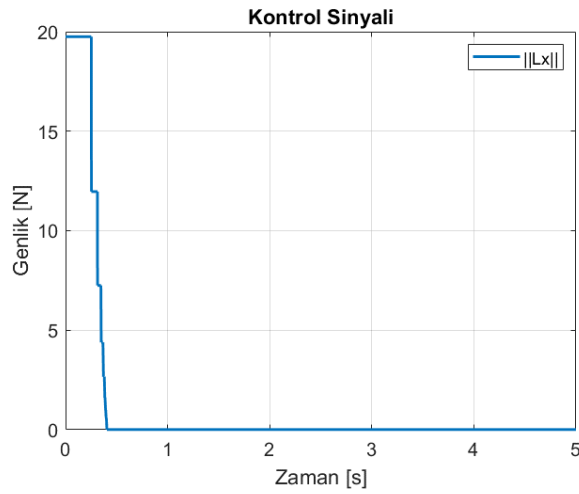
Şekil 5. Olay tetiklemeli kontrol sinyali normunun değişimi.



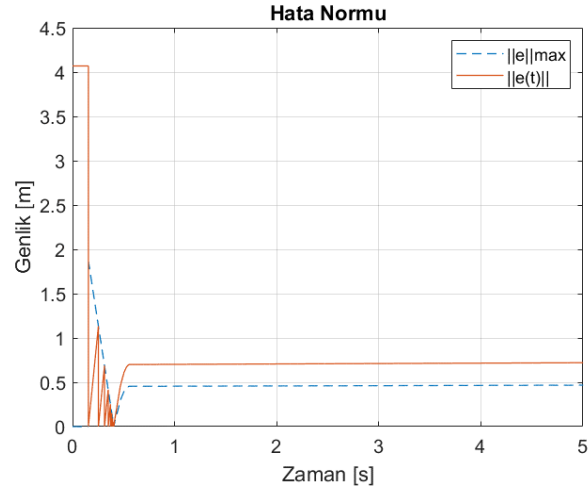
Şekil 6. Hata normunun değişimi.



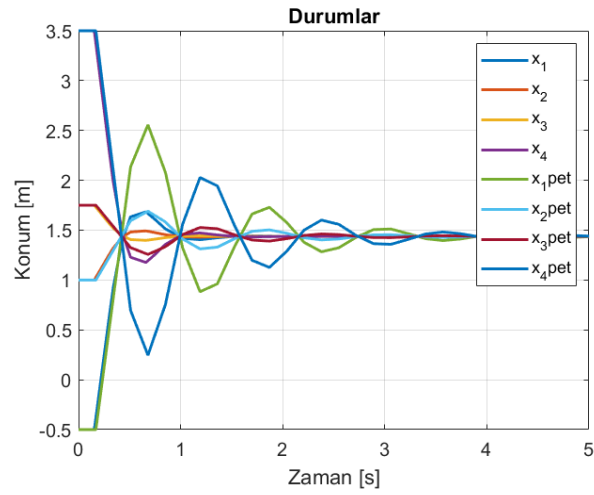
Şekil 7. İletişim gecikmesi altında zaman ve olay tetiklemeli kontrol sistemlerine ait durum değişkenleri.



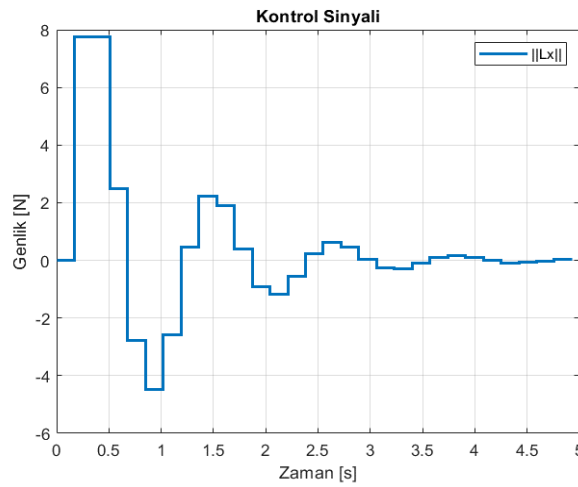
Şekil 8. İletişim gecikmesi altında zaman ve olay tetiklemeli kontrol sinyali normunun değişimi.



Şekil 9. İletişim gecikmesi altında hata normunun değişimi.



Şekil 10. İletişim gecikmesi altında zaman ve periyodik olay tetiklemeli kontrol sistemlerine ait durum değişkenleri.



Şekil 11. İletişim gecikmesi altında periyodik olay tetiklemeli kontrol sinyali normunun değişimi.

Tablo 1’de tetikleme sayıları verilmiştir. İletişim gecikmesi altında hata değeri maksimum hata değerini aştığından dolayı olay tetiklemeli mekanizma bozulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi zaman tetiklemeli kontrol açık ara çok daha fazla tetiklenmektedir. Bu sayı zaman tetiklemeli kontrolün iletişim gecikmeli durum için de aynıdır. Olay tetiklemeli kontrol, periyodik olay tetiklemeli kontrol mekanizmasından daha az tetiklenmiştir. Ancak iletişim gecikmesiyle baş etmek için tetikleme sayısının artması beklenen bir durumdur.

Tablo 1’de anlaşma noktasına varış süreleri de verilmiştir. Zaman tetiklemeli kontrol ile olay tetiklemeli kontrol neredeyse birebir aynı zamanlarda anlaşma noktasına varmıştır. Bu durum iletişim gecikmesi altında zaman tetiklemeli kontrol için değişmezken olay tetiklemeli mekanizma ile anlaşma noktasına ulaşılmamıştır. Öte yandan, periyodik olay tetiklemeli mekanizma ile iletişim gecikmesi altında daha geç sürede de olsa anlaşma noktasına ulaşılabilmiştir.

Tablo 1’de uygulanan kontrol sinyallerinin mutlak değerlerinin integrali de verilmiştir. Beklendiği üzere bu değer iletişim gecikmesinin etkisiyle artmıştır.

Tablo 1. Tetikleme Sayısı, Anlaşma Noktasına Varış Süresi, Kontrol Sinyalinin Mutlak Değerinin İntegrali.

	Tetikleme Sayısı	Anlaşma Noktasına Varış Süresi	Kontrol Sinyalinin Mutlak Değerinin İntegrali
Zaman Tetiklemeli Mekanizma	5×10^4	1.6 saniye	2.88
Olay Tetiklemeli Mekanizma	16	1.7 saniye	4.937
İletişim Gecikmesi Altında Periyodik Olay Tetiklemeli Mekanizma	117	3.91 saniye	6.468

6. Sonuçlar

Bu çalışmada merkezi yapıdaki çok etmenli sistemler için olay tetiklemeli işbirlikçi kontrol problemi ele alınmıştır.

Olay tetiklemeli mekanizmanın tasarımında Lyapunov fonksiyonundan yararlanılmıştır. Kontrol kuralı, durum fonksiyonunun normuna göre belirli bir ölçüm hatasının oranına bağlı olarak güncellenmiştir. Önerilen algoritmada Zeno davranışın gerçekleşmeyeceği, olaylar arası zamanlar için bir alt sınırın varlığı ile gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları ajanların ortak bir noktaya Zeno davranış olmadan ulaştığını kanıtlamaktadır. Ancak haberleşme gecikmesi ele alındığında bu yöntemin yetersiz kaldığı görülmüş olup, farklı bir olay tetiklemeli mekanizma önerilmiştir. Periyodik olay tetiklemeli adlı bu mekanizma belli bir sınıra sahip haberleşme gecikmeleri ile baş edebilmiştir. Gerek olay tetiklemeli gerekse periyodik olay tetiklemeli mekanizmanın kaynak kullanımını ciddi anlamda azalttığı gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda haberleşme gecikmesi üzerindeki sınırın arttırılacağı, aşım ve yerleşme sürelerinin iyileştirileceği bir olay tetiklemeli mekanizmanın geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] Lewis FL, Zhang H, Hengster-Movric K, Das A. Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches. 1st ed. London: Springer Hall, 2014.
- [2] Cao Y, Yu W, Ren W, Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. IEEE Trans. Ind. Informat. 2013; 9(1): 427–438.
- [3] Ge X, Han QL, Zhang XM. Achieving Cluster Formation of Multi-Agent Systems Under Aperiodic Sampling and Communication Delays. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2018; 65(4): 3417-3426.
- [4] Schwung M, Lunze J. Cooperative Control of UAVs Over an Unreliable Communication Network. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 2022; 37(8): 20-34.
- [5] Ren W. Formation keeping and attitude alignment for multiple space-craft through local interactions. J. Guid. Control Dyn. 2007; 30(2): 633–638.
- [6] Ding L, Han QL, Ge X, Zhang XM. An Overview of Recent Advances in Event-Triggered Consensus of Multiagent Systems. IEEE Transactions on Cybernetics 2018;48(4): 1110-1123.
- [7] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, Aledhari M, Ayyash M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Commun. Surv. Tutor 2015; 17(4): 2347–2376.

- [8] Gupta RA, Chow MY. Networked control system: Overview and research trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2010; 57(7): 2527–2535.
- [9] Wu Y, Wang L. Sampled-data consensus for multi-agent systems with quantised communication. *Int. J. Control* 2015; 88(2): 413–428.
- [10] Li W, Liu Y, Sun H. A survey of event-based consensus for multi-agent systems. 2017 Chinese Automation Congress (CAC); 20-22 October 2017; Jinan, China. 6606-6611.
- [11] Bai Y., Jing Y. Event-triggered network congestion control of TCP/AWM systems. *Neural Comput & Applic* 2021; 33: 15877–15886.
- [12] Zhang XM, Han QL, Yu X. Survey on recent advances in networked control systems. *IEEE Trans. Ind. Informat.* 2016; 12(5): 1740–1752.
- [13] Tabuada P. Event-Triggered Real-Time Scheduling of Stabilizing Control Tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2007; 52(9): 1680-1685.
- [14] Heemels WPMH, Johansson KH, Tabuada P. An introduction to event-triggered and self-triggered control. 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC); 10-13 December 2012; Maui, HI, USA. 3270–3285.
- [15] Åström KJ, Bernhardsson B. Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems. *IFAC Proceedings Volumes* 1999; 32(2): 5006-5011.
- [16] Zhang XM, Han QL, Ge X, Ding D, Ding L, Yue D, Peng C. Networked control systems: a survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 2020; 7(1): 1-17.
- [17] Nowzari C, Garcia E, Cortés J. Event-triggered communication and control of networked systems for multi-agent consensus *Automatica* 2019; 105: 1-27.
- [18] Ge X, Han QL, Zhang XM, Ding D. Dynamic Event-triggered Control and Estimation: A Survey. *Int. J. Autom. Comput.* 2021; 18: 857–886.
- [19] Brunner FD, Heemels WPMH, Allgöwer F, Event-triggered and self-triggered control for linear systems based on reachable sets. *Automatica* 2019; 101: 15-26.
- [20] Dimarogonas DV, Frazzoli E, Johansson KH. Distributed Event-Triggered Control for Multi-Agent Systems. *IEEE Tran. on Automatic Control* 2012, 57(5): 1291-1297.
- [21] Sbarbaro D, Gomes da Silva Jr. JM, Moreira LG. Event-Triggered Tracking Control: a Discrete-Time Approach. *IFAC-PapersOnLine* 2020; 53(2): 4565-4570.
- [22] Zhang Z, Lu Z, Sun Y, Two Event-Triggered Control Mechanisms for Multi-Agent Systems and Their Comparisons. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC); 27-29 July 2020; Shenyang, China. 4989-4994.
- [23] Kumar N, Porwal A, Singh AR, Naskar R, Purwar S. Event Triggered Control of Robot Manipulator. 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN); 07-08 March 2019; Noida, India. 362-366.
- [24] Jang D, Son CY, Yoo J, Kim HJ, Johansson KH. Efficient networked UAV control using event-triggered predictive control. *IFAC-PapersOnLine* 2019; 52(15): 412-417.
- [25] Morabito B, Kögel M, Blasi S, Klemme V, Hansen C, Höhn O, Findeisen R. Multi-stage Event-triggered Model Predictive Control for Automated Trajectory Drilling. *IFAC-PapersOnLine* 2020; 53(2):9478-948.
- [26] Jang D, Son C, Yoo J, Johansson K. Efficient networked UAV control using event-triggered predictive control. *IFAC-PapersOnLine* 2019; 52: 412-417.
- [27] Cai J, Yu R, Yan Q, Congli M, Wang B, Shen L. Event-Triggered Adaptive Control for Tank Gun Control Systems. *IEEE Access* 2019; (7): 17517-17523.
- [28] Li X, Sun Z, Tang Y, Karimi H. Adaptive Event-Triggered Consensus of Multi-Agent Systems on Directed Graphs. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2021; 66(44): 1670-1685.
- [29] Zhan J, Hu Y, Li X. Adaptive event-triggered distributed model predictive control for multi-agent systems. *Systems & Control Letters* 2019; 134 (1): 104531.
- [30] Liang J, Liu K, Ji Z, Wang X. Event-Triggered Consensus Control for Linear Multi-Agent Systems. *IEEE Access* 2019; 7: 144572-144579.
- [31] Zhang L, Swain A, Zhang D, Wen S. A discrete event-triggered scheme for networked control systems. *IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* 2021: 1-6.
- [32] Liu KZ, Teel AR, Sun XM, Wang XF, Model-based dynamic event-triggered control for systems with uncertainty: A hybrid system approach. *IEEE Trans. Autom. Control* 2021; 66(1): 444–451.
- [33] Su Y, Wang W, Li T. Reliable Event-Triggered Control for Switched Linear Systems. 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC); 22-24 August 2020; Hefei, China. 2622-2627.
- [34] Hu H, Huang S, Zhang Z. Event-triggered Control for Switched Affine Linear Systems. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2020; 18: 2867–2878.
- [35] Jin X, Shi Y, Tang Y, Wu X. Event-triggered attitude consensus with absolute and relative attitude measurements. *Automatica* 2020; 122: 109245.
- [36] Wu B, Shen Q, Cao X. Event-triggered attitude control of spacecraft. *Advances in Space Research* 2018; 61(3): 927-934.
- [37] Peng C, Li F. A survey on recent advances in event-triggered communication and control. *Information Sciences* 2018; 457–458: 113-125.

- [38] Wang Q, Hu J,Zhao Y, Ghosh BK. Event-triggered Consensus Control of Multi-agent Systems with Nonuniform Communication Delays via Reduced-Order Observers. *IFAC-PapersOnLine* 2020; 53(2): 3230-3235.
- [39] Dimarogonas DV, Johansson KH. Event-triggered control for multi-agent systems. *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*; 15-18 December 2009; Shanghai, China. 7131-7136.
- [40] Zhu W, Tian Z, Event-based consensus of first-order discrete time multi-agent systems. *2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*; 12-15 June 2016; Guilin, China.1692-1696.
- [41] Shi J, Hu W, Consensus of Second-Order Multi-Agent Systems by Event-Triggered Control. *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*; 04-08 July 2018; Changsha, China. 269-273.
- [42] Zhu W, Pu H, Wang D, Li H, Event-based consensus of second-order multi-agent systems with discrete time. *Autonamica* 2017; 79: 78–83.
- [43] Hu W, Liu L, Feng G, Consensus of Linear Multi-Agent Systems by Distributed Event-Triggered Strategy. *IEEE Transactions on Cybernetics* 2016; 46(1): 148-157.
- [44] Li, X., Liu, F., Buss, M., and Hirche, S. Fully Distributed Consensus Control for Linear Multiagent Systems: A Reduced-Order Adaptive Feedback Approach. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 2019. 7(2): 967-976.
- [45] Dong Y, X. Liu, T. Li and Q. Shan. Consensus of Hybrid Multi-Agent System Based on Broadcast Event-Triggered Method. *2022 4th International Conference on Data-driven Optimization of Complex Systems (DOCS)*; 28-30 October 2022; Chengdu, China. 1-6.
- [46] Wu Y, Mu N. Event-Triggered Consensus of General Linear Multi-agent System with Time Delay. *Advances in Neural Networks* 2018; 10878: 432-439.
- [47] Chen S, Fan Y, Song C, Li H. Event-Triggered Control for Networked Systems with Time-Delay and Quantization. *2020 12th International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*; 14-16 August 2020; Dali, China. 207-212.
- [48] Huang Y, Deng F,Wan F. Event-triggered control for stochastic systems with multiple delays. *Int J Robust Nonlinear Control*. 2023; 33(1): 641-658.
- [49] Dohmann PBG, Hirche S. Event-Triggered Consensus for Euler-Lagrange Systems with Communication Delay. *IFAC-PapersOnLine* 2020; 53(2): 2777-2782.
- [50] Girard A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2015; 60(7): 1992–1997.
- [51] Gao L, Liao X, Li H, Chen G. Event-triggered control for multi-agent systems with general directed topology and time delays. *Asian J. Control* 2016; 18(3): 945–953.
- [52] Li L, Ho DWC, Lu J. Event-based network consensus with communication delays. *Nonlinear Dyn.* 2017; 87(3): 1847–1858.
- [53] Mu N, Liao X, Huang T. Event-based consensus control for a linear directed multiagent system with time delay. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2015; 62(3): 281–285.
- [54] Borgers DP, Heemels WPMH. Event-separation properties of event-triggered control systems. *IEEE Trans. Autom. Control* 2014; 59(10): 2644–2656.
- [55] Heemels WPMH, Donkers MCF, Teel AR. Periodic Event-Triggered Control for Linear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2013; 58(4): 847-861.
- [56] Behera AK, Bandyopadhyay B, Yu X. Periodic event-triggered sliding mode control. *Automatica* 2018; 96: 61-72.
- [57] Luo S, Deng F. On Event-Triggered Control of Nonlinear Stochastic Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2020; 65(1): 369-375.
- [58] Chen X, Sun G, Tian Y, Periodic event-triggered consensus with single-integrator Dynamics. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*; 20-22 October 2017; Jinan, China. 6651-6656
- [59] Zheng S, Shi P, Agarwal R, Lim C. Periodic event-triggered output regulation for linear multi-agent systems. *Automatica* 2020; 122: 109223.
- [60] Garcia E, Cao Y, Casbeer DW, Periodic Event-Triggered Synchronization of Linear Multi-Agent Systems with Communication Delays. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2017; 62(1): 366-371.
- [61] Linselmayer S, Dimarogonas DV, Allgöwer F. Periodic event-triggered control for networked control systems based on non-monotonic Lyapunov functions. *Automatica* 2019; 106: 35-46.
- [62] Linselmayer S., Dimarogonas DV, Allgöwer F. A non-monotonic approach to periodic event-triggered control with packet loss. *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*; 12-14 December 2016; Las Vegas, NV, USA. 507-512.
- [63] Godsil C, Royle G. *Algebraic Graph Theory*. New York: Springer, 2001.
- [64] Mesbahi M, Egerstedt M. *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*. New Jersey: Princeton Series in Applied Mathematics, 2010.
- [65] Ren W, Beard RW. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control*. London: Springer, 2008.

- [66] Wang A. Event-based consensus control for single-integrator networks with communication time delays. *Neurocomputing* 2016; 173(3): 1715-1719.
- [67] Meng XY, Chen TW. Event-based agreement protocols for multi-agent networks. *Automatica* 2013; 49 (7):2125–2132.
- [68] Olfati-Saber R, Murray RM. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2004; 49(9): 1520-1533.

Farklı Kurutma Yöntemleriyle Meyve Kabuğu Tozu Elde Edilmesi: Fiziksel Özellikler, Toz Ürün Özelliği ve Kurutma Yöntemlerinin Enerji Verimliliği Yönünden İncelenmesi

Safiye DİRİM^{1*}, Eylül Elif METİNER², İrem BIYIKLI³, Nilay YÜCEL⁴, Tuğçe TÜRKÖĞLU⁵

¹ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

¹nur.dirim@ege.edu.tr, ²eemetiner162@gmail.com, ³iirembiyikli@gmail.com, ⁴yucel22@itu.edu.tr,
⁵tugceturkoglu@outlook.com

(Geliş/Received: 10/02/2023;

Kabul/Accepted: 29/03/2023)

Öz: Bu çalışmanın amacı; nar, portakal ve elma kabuklarının konveksiyonel ve mikrodalga kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulması ile elde edilen tozların fiziksel ve toz ürün özellikleri ile kullanılan kurutma tekniklerinin enerji verimliliğinin incelenmesidir. Bu kapsamda seçilen meyveler konveksiyonel (90-120-150 °C) ve mikrodalga fırın (360-540-720W) kullanılarak üç farklı koşulda kurutulmuştur. Kurutma sonunda elde edilen toz ürünün özelliklerini belirlemek için fiziksel ve toz ürün analizleri yapılmıştır. Ayrıca, meyve kabuklarının kurutulması sırasında kullanılan kurutucuların enerji verimliliği belirlenmiştir. Meyve kabuğu tozlarında nem içeriği ve su aktivitesi değerleri incelendiğinde her iki yöntemde nem içeriği değerleri %1 ile %11 arasında değişim gösterirken, su aktivitesi sonuçları güvenilir gıda kriteri olan 0.6'nın altında bulunmuştur. Farklı kurutma teknikleri ve koşullarının meyve kabuğu tozlarının rengine olan etkisi değerlendirildiğinde en yüksek parlaklık değeri (L^*) ve en çok renk değişimi (ΔE) tüm meyve kabuğu tozlarında konveksiyonel kurutma yönteminde tespit edilmiştir. Aynı zamanda farklı kurutma koşullarında toz ürünlerin akabilirlik davranışı çok iyi düzeyde bulunurken, yapışkanlık davranışı ise düşük düzeyde bulunmuştur. Enerji tüketiminde ise her iki kurutma yönteminde de güç ve sıcaklık arttıkça SMER değerinde azalış ve SEC değerinde artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Meyve kabuğu tozu, enerji verimliliği, mikrodalga kurutma, konveksiyonel kurutma, atık değerlendirme

Obtaining Fruit Peel Powder by Different Drying Methods: Investigation of Physical Properties, Powder Properties and Energy Efficiency of Drying Methods

Abstract: The aim of this study is to investigate the energy efficiency of the drying techniques used with the physical and powder product properties of powders obtained by drying pomegranate, orange and apple peels using convection and microwave drying methods. In this context, the selected fruits were dried under three different conditions using convection (90-120-150°C) and microwave oven (360-540-720W). Physical and powder product analyzes were performed to determine the properties of the powder product obtained at the end of drying. In addition, the energy efficiency of the dryers used during the drying of fruit peels has been determined. When the moisture content values of the fruit peel powders were examined, the moisture content values varied between 1% and 11% in both methods, while the water activity results were found to be below the reliable food criterion. When the effect of different drying techniques and conditions on the color of fruit peel powders was evaluated, the highest brightness value (L^*) and the most color change (ΔE) were determined in all fruit peel powders by convection drying method. In terms of energy consumption, a decrease in the SMER value and an increase in the SEC value were observed as the power and temperature increased in both drying methods.

Keywords: Fruit peel powder product, energy efficiency, microwave drying, convection drying, waste valorization

* Sorumlu yazar: nur.dirim@ege.edu.tr, Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-0533-4275-, ² 0000-0003-4324-4980, 30000-0002-4628-3187, 40000-0003-3344-0742, 50000-0003-3563-9130

1. Giriş

Son yıllarda üretim ve tüketime bağlı olarak dünya genelinde gıda atık miktarı giderek artmaktadır. Özellikle meyve sebze üretim tesislerinde ayıklama, kabuk soyma, çekirdek çıkarma gibi fiziksel işlemler sonucunda oluşan kabuk, posa ve çekirdek gibi organik atıkların fazla olduğu görülmektedir. Çevrenin korunması, ekonomik katkı sağlanması ve gıda kaynaklarının verimli kullanılması amacıyla organik atıkları değerlendirme çalışmaları yapılmaktadır [1]. Günümüzde yapılan araştırmalarla birlikte organik atıkların besin değeri bakımından zengin kaynaklar olduğu anlaşılmış, gıda atıklarının katma değerli ürünlere verimli bir şekilde dönüştürülmesini sağlamak için modern yöntemler ve teknolojiler araştırılmaya başlanmıştır [2].

Nar (*Punica granatum L.*), *Lythraceae* familyası (Kınagiller) *Punica* cinsine ait en eski meyve çeşitlerinden biridir. Nar meyvesi taze tüketiminin yanı sıra reçel, şarap, meyve suyuna işlenmektedir. Narın işlenmesi sırasında nar posası, nar kabuğu ve nar çekirdekleri gibi yan ürünler açığa çıkmaktadır [3]. Nar kabuğu meyvenin işlenmesi ile ortaya çıkan zengin bir yan üründür. Genellikle tarımsal ve endüstriyel atık olarak kabul edilen nar kabuğu antioksidan aktivite açısından değerlendirildiğinde etkili olduğu bilinmektedir. Nar kabuğunun çok işlevli ve besleyici özelliklerinin olması sebebiyle, gıda endüstrisi nar kabuğunu kullanmanın yeni yollarını aramaktadır [4].

Portakal, *Citrus* cinsi bir ağaç çeşidi olan *Citrus sinensis*'in meyvesi olarak tanımlanmaktadır. Portakal meyvesi gıda endüstrisinde daha çok dondurma, bisküvi, reçel, meyve suyu ve çay yapımında kullanılırken, portakal kabuğu, gıda endüstrisi için önemli birincil yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Kabukların içerisinde bulunan pektin, gıda endüstrisinde reçel ve jöle yapımında kıvam verme ve jelleştirme ajanı olarak kullanılmaktadır [5]. Yapılan çalışmalarla portakal kabuğunun içerisindeki fenolik madde, mineral madde ve vitamin içeriğinin fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle günümüzde atık değerlendirme konusunda yapılan araştırmalarda tercih edilmektedir [6].

Elma, *Rosaceae* familyasına ait *Malus communis L.* cinsinden gelmektedir. Elma, taze olarak tüketilmesinin yanı sıra meyve suyu, şarap, sirke, reçel, marmelat, pekmez gibi ürünlere işlenmektedir. Elma ürünlerinin işlenmesi sırasında çok fazla miktarda elma kabuğu ortaya çıkmakta ve atık olarak değerlendirilmektedir [7]. Elma kabuğunun lif ve mineraller açısından zengin olması nedeniyle gıda endüstrisinde kullanımı ve atık bertarafında değerlendirilmesi verimli ve çevre dostu çözümler için önemlidir [8,9].

İlk çağlardan beri insanoğlu gıdaları korumak, uzun süre depolamak ve farklı ürünlere işleyebilmek için birçok yöntem kullanmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan kurutma işlemi ürünlerin hasat edilip tüketiciye ulaşmasına kadar geçen sürede ürün kaybının olmaması, gıdaların uzun süre fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik olarak bozulmadan saklanması için uygulanmaktadır [10]. En genel tanımıyla bir dehidrasyon tekniği olan kurutma işlemi nemin ısı ve kütle aktarımı yoluyla ürün bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Bu yöntem ile su aktivitesi değeri düşürülerek mikrobiyal faaliyetlerin oluşması engellenmekte, enzim aktivitesi azaltılarak kimyasal bozulmanın önüne geçilmektedir [11]. Böylece gıdaların uzun süre zarar görmeden saklanması sağlanarak üründe meydana gelebilecek fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik değişiklikler önlenmektedir. Bunun yanında ürünlerin raf ömrü uzatılarak kalite özellikleri korunmakta, ürün hacminin azaltılması taşımada ve depolamada verimlilik sağlanmaktadır.

Konveksiyonel kurutma tekniği, yüksek hava sıcaklıkları gerektirmesi ve kurutma sürelerinin uzun olmasına rağmen gıda endüstrisinde ekonomik olduğu için yaygın olarak uygulanan bir tekniktir. Konveksiyonel kurutmada işlem kontrolünün kolaylıkla sağlanabilmesi, ekipman bakımı ve temizliğinin kolay olması bu sistemin tercih edilmesinde önemli etkenlerdir. Ancak bu yöntemde kurutma işleminin uzun sürmesi, enerji tüketiminin artması ve ürünün kalite özelliklerinde kayıp olması gibi bazı dezavantajlar da vardır [12].

Mikrodalga kurutma tekniği, ürünün mikrodalga enerjisini emerek ve enerjiyi ısıya dönüştürerek kurutulması işlemidir. Mikrodalga kurutma yönteminin geleneksel yöntemlerden farkı ısının doğrudan ürün içerisinde oluşması ve kısa sürede içerisinde bulunan suyu buharlaştırmasıdır [13]. Bu kurutma yönteminde üründe ısı oluşumu ve iletimi daha hızlı olmakta, böylece kuruma süresi kısalmaktadır. Ancak bu avantajların yanında yatırım maliyetleri yüksek olmakta ve düzensiz ısıtma sağlamaktadır. Bu nedenle son yıllarda mikrodalga yöntemi farklı kurutma yöntemleri ile kombine edilmiş bir şekilde uygulanmaktadır [14].

* Sorumlu yazar: janset@yildiz.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6359-0624, ^{2*} 0000-0003-1886-5240

Gıda endüstrisinde kurutma tekniği, ürün özellikleri ve kalite açısından önemli olmakla birlikte yüksek miktarda enerji kullanılmasından ötürü sürekli geliştirilmekte olan bir teknolojidir [15]. Günümüzde gıda endüstrisinde kullanılan kurutma yöntemlerinin, uzun kuruma süresine ve fazla enerji tüketimine sahip olması sebebiyle çok fazla tercih edilmemekte, tasarımlarının eksik olması nedeniyle düşük enerji verimliliğine neden olmaktadır. Buna ek olarak kurutma işleminde kullanılan yöntemler enerji tüketimini etkilediği gibi kurutma maliyetini de etkilemektedir. Kurutma maliyeti toplam maliyetin büyük bir kısmını oluşturduğu için üretimlerde enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kurutucu sistemlerin etkinliği ve verimliliği belirlenmektedir. Bunun için kurutucuların özgül nem uzaklaştırma hızı (SMER: Specific Moisture Extraction Rate (kg/kWh)), nem uzaklaştırma hızı (MER: Moisture Extraction Rate (kg/h)) ve özgül enerji tüketimi (SEC: Specific Energy Consumption (MJ/kg)) hesaplanmaktadır. Düşük özgül enerji tüketim değerlerine sahip olan sistemlerin enerji verimliliğinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır [16,17].

Literatür araştırmaları sonucunda gıda endüstrisinde atık olarak açığa çıkan meyve kabuklarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan pek çok çalışma olmakla birlikte meyve kabuklarının kurutulması ve elde edilen kurutulmuş ürünlerden toz eldesi ve kullanılan kurutma yöntemlerinin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi konularının çalışmalara genel olarak dâhil edilmediği fark edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada seçilen üç farklı meyve kabuğunun (nar, portakal ve elma) iki farklı kurutma yöntemi (konveksiyonel kurutma ve mikrodalga kurutma) kullanılarak kurutulması ile elde edilen tozların fiziksel özellikleri, toz ürün özellikleri ve kullanılan kurutma tekniklerinin enerji verimliliğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal Ve Yöntem

2.1 Materyal

Kurutma deneylerinde kullanılacak nar (*Punica granatum*), portakal (*Citrus sinensis*) ve elma (*Malus pumila* 'Fuji') İzmir'deki yerel marketlerden temin edilmiştir. Meyvelerin kabukları soyularak, fizyolojik ve kimyasal değişimlere uğramamaları için kurutma denemelerinde kullanılabilecek kadar buzdolabı koşulunda (+4 °C) muhafaza edilmiştir. Kurutma çalışmalarında kullanılan kabuklar eşit büyüklükte olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Taze nar kabukları 10±0,5 mm (uzunluk), 10±0,5 mm (genişlik) olacak şekilde, portakal kabukları 10±0,5 mm (uzunluk), 10±0,5 mm (genişlik) ve 4±0,5 mm kalınlık ölçülerinde kesilmiştir. Elma kabukları ise 10±0,5 mm (uzunluk), 5±0,5 mm (genişlik) ve 2±0,5 mm kalınlık ölçülerinde boyutlandırılmıştır.

2.2 Yöntem

Kurutma öncesi hazırlanan meyve kabukları cam petriye kabuk kısmı üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Konveksiyonel kurutma yönteminde konveksiyonel fırın (Beko AFE 24300, Türkiye) kullanılmıştır. Örnekler 90-120-150 °C sıcaklıklarda kurularak denemeler gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga kurutma yönteminde mikrodalga fırın kullanılmış (Arçelik MD 595, Türkiye), örnekler 360-540-720 W mikrodalga güçlerinde kurutulmuştur. Kurutma sistemlerinde kullanılan parametreler literatürde yapılan çalışmalar ve ön denemeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Kurutma işlemi örneklerin ağırlığı sabit tartıma gelene kadar devam etmiştir. Kurutulan kabuklar öğütücü (Bosch MKM 6000, Almanya) kullanılarak iki dakika boyunca öğütülmüş ve meyve kabuğu tozları elde edilmiştir. Meyve kabuğu tozları alüminyum polietilen ambalaj malzemesiyle (ALPE) ambalajlanarak analizlere kadar desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.

2.3 Meyve Kabuğu Tozlarına Uygulanan Analizler

Kurutulmuş olan toz ürünlerin nem tayini 105 °C'deki etüvde yapılmış, su aktivitesi 0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazında (Testo AG 400, Almanya) ölçülmüş, renk değerleri Konica Minolta Chroma Meter CR-400, Japonya cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler CIE renk skalası kullanılarak altı paralel olacak şekilde yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Toplam renk değişimi (ΔE), doygunluk (Kroma, ΔC) ve Hue Açısı ($^{\circ}$) değerleri denklem 1-3 kullanılarak hesaplanmıştır. Toplam renk değişimi (ΔE) değeri bulunurken kullanılan L_0 , a_0 ve b_0 değerleri başlangıç ürününden elde edilen referans değerlerini göstermektedir.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

$$\text{Hue (H}^{\circ}\text{)} = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

$$\Delta C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

Meyve kabuğu tozlarının yığın ve sıkıştırılmış yoğunluğu analizi [18]'in bildirdiği yönteme göre yapılmıştır. Toz ürünlerin yapışkanlık ve akabilirlik değerleri Carr İndeks (CI) ve Hausner Ratio (HR) değerlerine göre belirlenmiştir [18]. CI ve HR değerlerinin hesaplanması sırasıyla denklem 4 ve denklem 5'te verilmiştir. Tablo 1 ise sırasıyla Carr Endeksi ve Hausner Oranına göre toz ürünün akışkanlığının ve yapışkanlığının sınıflandırmasını göstermektedir.

$$CI = \frac{\rho_{\text{sıkıştırılmış}} - \rho_{\text{yığın}}}{\rho_{\text{yığın}}} * 100 \quad (4)$$

$$HR = \frac{\rho_{\text{sıkıştırılmış}}}{\rho_{\text{yığın}}} \quad (5)$$

Tablo 1. CI ve HR'ye göre toz ürünün akışkanlığının ve yapışkanlığının sınıflandırılması [18]

CI (%)	Akışkanlık	HR	Yapışkanlık
<15	Çok İyi	<1.2	Düşük
15 - 20	İyi	1.2 - 1.4	Orta
20 - 35	Orta	>1.4	Yüksek
35 - 40	Kötü		
>45	Çok Kötü		

Kurutma denemelerinde enerji verimliliğini hesaplamak için cihaza bağlı elektrik sayacı (Köhler, AEL. TF.04, Türkiye) kullanılarak kurutucuların elektrik tüketimleri ölçülmüştür. Kurutucuların enerji verimliliği, özgül nem uzaklaştırma hızı (SMER, kg/kWh), nem uzaklaştırma hızı (MER, kg/h) ve örneklerden birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli özgül enerji tüketim miktarı (SEC, MJ/kg) olarak belirlenmektedir. Meyve kabuğu tozlarının SMER, MER ve SEC değerleri aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır.

$$SMER = \frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi (kg)}}{\text{Toplam Enerji Tüketimi (kWh)}} \quad (6)$$

$$MER = \frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi (kg)}}{\text{Kuruma Süresi (h)}} \quad (7)$$

$$SEC = \frac{\text{Sisteme Giren Toplam Enerji (MJ)}}{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi (kg)}} \quad (8)$$

Tüm analizler üç tekerrür şeklinde yapılmış ve deneysel sonuçlar ortalama \pm standart sapma olacak şekilde kaydedilerek SPSS Statistics 25.0 paket programı (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) Duncan çoklu karşılaştırma testi ile %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak test edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kurutma işleminde kullanılacak olan nar, portakal ve elma kabukları homojen bir şekilde boyutlandırıldıktan sonra mikrodalga (MW) ve konveksiyonel fırın (KK) kullanılarak başarılı bir şekilde kurutulmuştur. Kurutma öncesi taze meyve kabuklarının bazı fiziksel özellikleri belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Taze meyve kabuklarının fiziksel analiz sonuçlarına bakıldığında en yüksek nem içeriği değeri taze elma kabuğunda, su aktivitesi ve a^* değerleri taze nar kabuğunda, L^* ve b^* değerleri taze portakal kabuğunda

gözlenmiştir. Nem analizi sonuçları değerlendirildiğinde taze nar kabuklarının kurutma öncesi başlangıç nem içeriği değeri %70.34, taze portakal kabuklarının nem içeriği değeri %71.48 ve taze elma kabuklarının nem içeriği değeri %83.24 olarak bulunmuştur. Literatürde yapılan bir çalışmada portakal kabuğunun nem içeriğini %74.40 olarak, nar kabuğunun nem içeriğini %70.30 olarak ve elma kabuğunun nem içeriği ise %80 olarak bulunmuştur [19,20,21]. Taze meyve kabukları için bulunan nem içeriği değerlerinin referanslarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Taze meyve kabuklarına ait bazı fiziksel özellik sonuçları

	Meyve Kabukları		
	Nar Kabuğu	Portakal Kabuğu	Elma Kabuğu
Nem İçeriği (%)	70.34±1.17	71.48±1.03	83.24 ±0.7
Su Aktivitesi (aw)	0.962±0.00	0.945±0.00	0.857±0.02 ^c
Renk Değerleri (Dış Kabuk) <i>L*</i>	38.83±1.55	57.94±0.79	55.57±0.30
<i>a*</i>	37.20±0.47	21.16±0.67	1.43 ±0.22
<i>b*</i>	16.29±0.75	43.97±0.57	19.59±0.35

Meyve kabuğu tozlarının nem içeriği sonuçları değerlendirildiğinde kurutma sıcaklığı ve mikrodalga gücünün artmasıyla birlikte artan kuru madde içeriğine bağlı olarak portakal kabuğu tozunun nem içeriği değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Nar ve elma kabuğu tozunda ise hava sıcaklığının artmasıyla birlikte nem içeriği değerlerinin önce azalıp daha sonra arttığı görülmüştür. Bu durumun yüksek sıcaklıklarda ani kurumaya bağlı kabuk oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük nem içeriği değerleri nar ve elma kabuğu tozunda konveksiyonel kurutma yönteminde 120 °C koşulunda, portakal kabuğu tozunda ise mikrodalga kurutma yönteminde 720W koşulunda saptanmıştır. En yüksek nem içeriği değerleri ise nar ve portakal kabuğu tozunda konveksiyonel kurutma yönteminde 90 °C koşulunda, elma kabuğu tozunda mikrodalga kurutma yönteminde 540W koşulunda tespit edilmiştir.

Tablo 3. Meyve kabuğu tozlarına ait nem içeriği ve su aktivitesi değerleri sonuçları

	Nem İçeriği (%)			Su Aktivitesi (aw)		
	Nar Kabuğu Tozu	Portakal Kabuğu Tozu	Elma Kabuğu Tozu	Nar Kabuğu Tozu	Portakal Kabuğu Tozu	Elma Kabuğu Tozu
MW 360W	3.36±0.14 ^b	7.69±0.49 ^d	4.21±0.16 ^c	0.126±0.01 ^d	0.251±0.01 ^d	0.341±0.01 ^c
MW 540W	3.24±0.20 ^b	6.60±0.10 ^e	8.57±0.33 ^a	0.163±0.01 ^c	0.319±0.01 ^b	0.395±0.01 ^b
MW 720W	2.86±0.18 ^c	4.69±0.11 ^f	3.28±0.08 ^d	0.184±0.01 ^c	0.320±0.01 ^b	0.327±0.01 ^d
KK 90°C	5.48±0.54 ^a	11.44±0.34 ^a	2.96±0.18 ^d	0.574±0.03 ^a	0.375±0.01 ^a	0.325±0.02 ^d
KK 120°C	1.24±0.17 ^d	10.76±0.13 ^b	1.53±0.30 ^e	0.249±0.03 ^b	0.368±0.06 ^a	0.235±0.01 ^e
KK150°C	3.52±0.11 ^b	8.20±0.40 ^c	5.41±0.32 ^b	0.270±0.03 ^b	0.266±0.06 ^c	0.445±0.01 ^a

MW: Mikrodalga Fırın

KK: Konveksiyonel Fırın

^{a-f}Farklı harflerle gösterilen değerler Duncan test yöntemine göre örnekler arasındaki istatistiksel farkı göstermektedir (P <0.05).

Kurutma işlemi sonucunda toz haline getirilen meyve kabuğu tozlarının su aktivitesi değerleri incelendiğinde mikrodalga ile kurutulan nar kabuğu tozunun su aktivitesi sonuçlarının daha düşük olduğu görülmüş, konveksiyonel kurutma yöntemine göre daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mikrodalga kurutma yöntemine göre en düşük su aktivitesi değeri 360W koşulunda 0.126 ± 0.01 olarak, konveksiyonel kurutma yöntemine göre ise 150 °C koşulunda 0.235 ± 0.00 olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak her iki yöntemdeki değerler de 0.6'nın altında olduğu için toz ürünler mikrobiyolojik açıdan güvenli kabul edilmiş, uzun süre zarar görmeden

muhafaza edilebileceği sonucuna varılmıştır. Farklı güç ve kurutma sıcaklıkları uygulanarak kurutulan tüm meyve kabuğu tozlarının nem ve su aktivitesi değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olduğu görülmüştür ($P<0.05$).

Meyve kabuğu tozlarının renk analizi sonuçlarına bakıldığında en yüksek parlaklık (L^*) ve sarılık- mavilik (b^*) değerleri konveksiyonel kurutma yönteminde bulunmuş, renk değerlerindeki farklılıklarının yüksek sıcaklıklarda oluşan enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarından kaynaklandığı düşünülmüştür. En yüksek parlaklık (L^*) ve sarılık-mavilik (b^*) değeri portakal kabuğu tozunda 90 °C koşulunda, en yüksek kırmızılık- yeşillik (a^*) değeri nar kabuğu tozunda 90 °C koşulunda saptanmıştır ($P<0.05$). Yapılan bir çalışmada elma kabukları üç farklı kurutma sisteminde (fırın, dondurma ve tamburda kurutma) kurutulmuş, kurutma sonunda başlangıç elma kabuğuna kıyasla parlaklık (L^*) ve sarılık-mavilik (b^*) değerlerinin azaldığını, kırmızılık-yeşillik (a^*) değerlerinin arttığını saptamıştır [7]. Yapılan çalışma ile konveksiyonel kurutma sonrası elde edilen sonuçlara bakıldığında renk değerlerindeki değişim benzerlik göstermektedir.

Tablo 4. Meyve kabuğu tozlarına ait renk değerleri sonuçları

		L^*	a^*	b^*	ΔE	Hue Açısı	Kroma
Nar Kabluğu Tozu	MW 360W	53.35±0.30 ^b	8.51±0.23 ^b	18.48±0.11 ^b	32.74 ±0.19 ^b	1.14±0.01 ^b	20.35±0.18 ^b
	MW 540W	50.38±0.34 ^c	8.41±0.28 ^b	18.32±0.17 ^b	31.60±0.33 ^d	1.14±0.01 ^b	20.16±0.18 ^b
	MW 720W	48.44±0.30 ^d	8.43±0.28 ^b	17.78±0.34 ^c	30.89±0.33 ^e	1.13±0.02 ^b	19.68±0.22 ^c
	KK 90°C	57.22±0.81 ^a	10.71±0.17 ^a	28.47±0.27 ^a	34.90 ±0.52 ^a	1.21±0.01 ^a	30.41 ±0.53 ^e
	KK 120°C	43.42±0.30 ^e	6.46±0.38 ^c	16.40±0.32 ^d	31.60±0.38 ^d	1.20±0.02 ^a	17.63±0.39 ^d
	KK 150°C	40.48±0.22 ^f	5.64±0.09 ^d	14.50±0.32 ^e	32.17±0.09 ^c	1.20 ±0.01 ^a	15.56±0.29 ^{ab}
Portakal Kabluğu Tozu	MW 360W	69.70±0.51 ^c	5.11±0.28 ^d	46.21±0.53 ^b	20.03±0.49 ^c	1.46±0.01 ^b	46.49±0.52 ^b
	MW 540W	65.08±0.52 ^d	6.38±0.29 ^c	44.63±0.86 ^c	16.45±0.38 ^d	1.43±0.01 ^c	45.09±0.83 ^c
	MW 720W	63.83±0.46 ^e	7.62±0.51 ^a	44.86±0.50 ^c	14.81±0.50 ^e	1.40±0.01 ^d	45.50±0.54 ^c
	KK 90°C	74.38±0.22 ^a	4.30±0.15 ^e	47.83±0.99 ^a	23.88±0.16 ^a	1.48±0.01 ^a	48.01±0.99 ^a
	KK 120°C	70.70±0.25 ^b	4.88±0.22 ^d	46.90±0.32 ^b	20.90±0.26 ^b	1.47±0.01 ^b	47.15±0.33 ^b
	KK 150°C	64.84±0.58 ^d	6.81±0.12 ^b	38.73±0.45 ^d	16.77±0.28 ^d	1.40±0.01 ^d	39.33±0.44 ^d
Elma Kabluğu Tozu	MW 360W	51.23±0.12 ^d	7.06±0.28 ^e	20.39±0.20 ^c	6.77 ±0.15 ^{de}	1.24±0.02 ^b	21.58±0.11 ^c
	MW 540W	49.38±0.25 ^e	9.68±0.07 ^a	19.62±0.31 ^d	9.89±0.13 ^c	1.11±0.01 ^c	21.88±0.28 ^c
	MW 720W	55.12±0.53 ^c	8.29±0.43 ^c	19.31±0.64 ^d	6.69±0.40 ^e	1.17±0.01 ^d	21.02±0.75 ^d
	KK 90°C	63.43±0.33 ^b	8.67±0.16 ^b	22.85±0.46 ^b	11.46±0.38 ^b	1.21±0.01 ^c	24.44±0.47 ^b
	KK 120°C	70.70±0.25 ^a	5.71±0.22 ^f	36.90±0.32 ^a	23.88±0.26 ^a	1.42±0.01 ^a	37.34±0.30 ^a
	KK 150°C	51.57±0.30 ^d	7.63±0.09 ^d	17.91±0.22 ^e	7.10±0.13 ^d	1.17±0.01 ^d	19.47±0.24 ^e

MW: Mikrodalga Fırın

KK: Konveksiyonel Fırın

^{a-f}Farklı harflerle gösterilen değerler Duncan test yöntemine göre örnekler arasındaki istatistiksel farkı göstermektedir ($P < 0.05$).

Kurutma sonrası meyve kabuğu tozlarına ait renk değeri sonuçları incelendiğinde ise kurutma sonucu toplam renk değişimi (ΔE) değerleri nar kabuğu tozlarında 30.8 - 34.9 aralığında, portakal kabuğu tozunda 14.1 - 23.8 aralığında, elma kabuğu tozunda ise 6.6 - 23.8 aralığında bulunmuştur. En yüksek Hue açısı (°) ve kroma değeri ise portakal kabuğu tozunda tespit edilmiştir ($P<0.05$). [20] yaptıkları bir çalışmada nar kabuklarını 40, 50 ve 60 °C'de fırında kurutmuşlardır. Kurutma işlemi sonunda en düşük toplam renk değişimi değerini 60 °C fırında

kurutmada (16.82), en yüksek toplam renk değişimini 50 °C fırın kurutmada (23.10) belirlemiştir. Buna göre sıcaklık değeri arttıkça toplam renk değişimi değerlerinin azaldığını gözlemlemiştir.

Toz ürünlerin yığın ve sıkıştırılmış yığın yoğunluğunun belirlenmesi toz ürünlerin stabilitesi hakkında bilgi vermekte, taşıma kolaylığı ve paketleme maliyetlerinin azaltılması açısından önemli taşımaktadır [22]. Meyve kabuğu tozlarının yığın yoğunluğu özellikleri değerlendirildiğinde nar kabuğu tozunu yığın yoğunluğu değerleri, portakal ve elma kabuğu tozlarının yığın yoğunluğu değerlerine göre daha yüksek bulunmuştur. Nar kabuğu tozu en yüksek yığın yoğunluğu değeri mikrodalga kurutma yönteminde ($619.86 \pm 0.02 \text{ kg/m}^3$), en düşük yığın yoğunluğu değeri ise konveksiyonel kurutma yönteminde ($543.85 \pm 0.01 \text{ kg/m}^3$) gözlenmiştir. Portakal ve elma kabuğu tozlarının yığın yoğunluğu sonuçları değerlendirildiğinde ise en yüksek yığın yoğunluğu değeri mikrodalga kurutma yönteminde saptanmıştır.

Tablo 5. Meyve kabuğu tozlarına ait yığın yoğunluğu, sıkıştırılmış yığın yoğunluğu, Carr endeksi ve Hausner oranı sonuçları

		Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	Sıkıştırılmış Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	Akabilirlik (CI)	Yapışkanlık (HR)
Nar Kabuğu Tozu	MW 360W	619.86±0.02 ^a	659.92±0.02 ^a	6.07±0.18 ^a (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
	MW 540W	594.03±0.01 ^c	631.16±0.01 ^b	5.88±0.01 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
	MW 720W	577.26±0.01 ^c	612.30±0.02 ^b	5.72±0.16 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
	KK 90°C	543.85±0.01 ^d	574.98±0.02 ^c	5.41±0.15 ^c (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
	KK 120°C	593.69±0.01 ^c	630.80±0.01 ^b	5.88±0.01 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
	KK 150°C	610.39±0.02 ^b	649.85±0.02 ^a	6.07±0.18 ^a (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^a (DÜŞÜK)
Portakal Kabuğu Tozu	MW 360W	459.74±0.01 ^c	493.66±0.01 ^b	6.82±2.27 ^{ab} (ÇOK İYİ)	1.07±0.03 ^b (DÜŞÜK)
	MW 540W	481.96±0.02 ^b	506.18±0.03 ^b	4.77±0.23 ^b (ÇOK İYİ)	1.05±0.01 ^c (DÜŞÜK)
	MW 720W	459.49±0.01 ^c	610.93±0.02 ^a	8.33±2.78 ^a (ÇOK İYİ)	1.09±0.03 ^a (DÜŞÜK)
	KK 90°C	469.18±0.01 ^a	504.09±0.01 ^b	6.93±2.16 ^b (ÇOK İYİ)	1.08±0.03 ^b (DÜŞÜK)
	KK 120°C	469.76±0.01 ^a	498.74±0.01 ^b	5.79±1.91 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.02 ^c (DÜŞÜK)
	KK 150°C	469.98±2.45 ^a	498.98±0.01 ^b	5.79±1.91 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.02 ^c (DÜŞÜK)
Elma Kabuğu Tozu	MW 360W	546.89±0.01 ^{ab}	578.19±0.02 ^{ab}	5.41±0.15 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^b (DÜŞÜK)
	MW 540W	541.13±0.01 ^b	571.65±0.01 ^b	5.34±0.13 ^c (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^b (DÜŞÜK)
	MW 720W	552.79±0.01 ^{ab}	548.88±0.01 ^{ab}	5.48±0.10 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^b (DÜŞÜK)
	KK 90°C	421.97±0.01 ^d	430.56±0.01 ^d	4.08±0.08 ^d (ÇOK İYİ)	1.04±0.01 ^c (DÜŞÜK)
	KK 120°C	437.54±0.00 ^d	492.46±0.00 ^a	5.56±0.01 ^b (ÇOK İYİ)	1.06±0.01 ^b (DÜŞÜK)
	KK 150°C	459.49±0.00 ^c	505.44±0.00 ^c	9.09±0.01 ^a (ÇOK İYİ)	1.10±0.01 ^a (DÜŞÜK)

MW: Mikrodalga Fırın

KK: Konveksiyonel Fırın

^{a-d} Farklı harflerle gösterilen değerler Duncan test yöntemine göre örnekler arasındaki istatistiksel farkı göstermektedir (P < 0.05).

Meyve kabuğu tozlarının sıkıştırılmış yoğunluk değerlerine bakıldığında ise nar kabuğu tozlarının sıkıştırılmış yığın yoğunluğu değerlerinin, yığın yoğunluğu değerlerine paralel olarak portakal ve elma kabuğu tozuna göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Nar kabuğu tozu en yüksek sıkıştırılmış yığın yoğunluğu değeri mikrodalga kurutma yönteminde ($659.91 \pm 0.02 \text{ kg/m}^3$), en düşük yığın yoğunluğu değeri ise konveksiyonel kurutma yönteminde ($574.98 \pm 0.02 \text{ kg/m}^3$) gözlenmiştir. Portakal ve elma kabuğu tozlarının yığın yoğunluğu sonuçları değerlendirildiğinde ise en yüksek yığın yoğunluğu değeri mikrodalga kurutma yönteminde bulunmuştur. Tüm meyve kabuğu tozlarının yığın ve sıkıştırılmış yığın yoğunluğu değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülmemiştir (P < 0.05).

Toz ürünlerin akabilme ve yapışma davranışlarının belirlenmesi ambalajlama, işleme, depolama, doz ayarlama, karıştırma gibi işlemler açısından önemlidir. Yüksek nem içeriği toz ürünün akabilirliğini etkilemektedir. Ayrıca yapışma derecesi yüksek olan ürünlerde akabilirlik sorunu oluşmaktadır. Toz ürünlerin akabilmesi için mevcut kuvvetlerinin dışardan uygulanan kuvvetlerden daha az olması ve yığın içerisindeki partiküllerin hareket edebilmesi gerekmektedir [22, 23]. Meyve kabuğu tozlarının akabilme ve yapışkanlık davranışı incelendiğinde

konveksiyonel ve mikrodalga yöntemi uygulanan tüm örneklerin çok iyi düzeyde akabilirlik ve düşük düzeyde yapışkanlık davranışı sergilediği gözlenmiştir. Genel olarak toz ürünlerin akabilirlik değerleri 4.08 ± 0.08 ile 9.09 ± 0.00 aralığında bulunurken, yapışkanlık değerleri 1.04 ± 0.00 ile 1.10 ± 0.00 aralığında tespit edilmiştir. ($P < 0.05$).

Toz ürün elde etmek amacıyla kullanılan kurutma teknikleri, suyun buharlaştırılması için yüksek ısı gerektirmesinden dolayı enerji tüketimi fazla olan bir işlemlerdir. Bu nedenle kurutma işleminde kullanılan kurutucu sistemlerin enerji tüketimi ölçülmekte ve enerji verimliliği için çalışmalar yapılmaktadır. Düşük özgül enerji tüketim değerlerine sahip olan sistemlerin enerji verimliliğinin yüksek olduğu bilinmektedir [16]. Kurutma işlemi sonucunda toz haline getirilen meyve kabuğu tozlarının enerji analizi sonuçları incelendiğinde en yüksek SMER ve MER değerleri mikrodalga kurutma yönteminde bulunurken, en yüksek SEC değerleri konveksiyonel kurutma yönteminde tespit edilmiştir. Buna göre en verimli yöntemin mikrodalga kurutma yöntemi olduğu saptanmış, özgül enerji tüketimi (SEC) bu yöntemde daha düşük çıkmıştır. Her iki kurutma yönteminde de güç değerinin ve sıcaklığın artmasıyla birlikte genel olarak SMER değerindeki azalış ve SEC değerindeki artışın kurutma sırasında meyve kabuklarının kuru madde içeriği arttıkça, üründen uzaklaşan su miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. ($P < 0.05$). Literatürde yapılan bir çalışmada, elma dilimleri tepsili, ısı pompalı, dondurarak ve mikrodalga kurutma yöntemleri kullanarak kurutulmuş, en düşük özgül enerji tüketimi (SEC) mikrodalga kurutma ve ısı pompalı kurutma yönteminde saptanmıştır [24]. Bu sonuç, yaptığımız çalışmadaki SEC değerlerine benzerlik göstermiş, mikrodalga kurutma yönteminde daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6. Mikrodalga ve konvektif kurutucunun SMER, MER ve SEC değerleri

		SMER (kg su/kWh)	MER (kg su/h)	SEC (MJ/kg)
Nar Kabuğu Tozu	MW 360W	0.636±0.08 ^a	0.153±0.02 ^a	5.75±0.73 ^e
	MW 540W	0.335±0.03 ^b	0.120±0.01 ^b	10.82±0.84 ^e
	MW 720W	0.111±0.01 ^c	0.120±0.01 ^b	32.555±2.41 ^d
	KK 90°C	0.066±0.00 ^d	0.022±0.00 ^d	59.88±3.48 ^c
	KK 120°C	0.009±0.00 ^e	0.021±0.00 ^d	389.63±9.01 ^a
	KK 150°C	0.018±0.00 ^{de}	0.049±0.00 ^c	204.90±4.25 ^b
Portakal Kabuğu Tozu	MW 360W	0.821±0.02 ^a	0.197±0.00 ^a	4.39±0.09 ^e
	MW 540W	0.493±0.01 ^b	0.178±0.00 ^b	7.30±0.10 ^e
	MW 720W	0.154±0.01 ^c	0.166±0.01 ^c	23.52±1.48 ^d
	KK 90°C	0.062±0.00 ^d	0.022±0.00 ^d	58.11±0.01 ^c
	KK 120°C	0.019±0.00 ^e	0.043±0.00 ^e	190.24±7.74 ^b
	KK 150°C	0.018±0.00 ^e	0.050±0.00 ^f	197.57±3.61 ^a
Elma Kabuğu Tozu	MW 360W	0.879±0.00 ^a	0.211±0.00 ^b	4.09±0.00 ^e
	MW 540W	0.597±0.00 ^b	0.215±0.00 ^b	6.03±0.04 ^e
	MW 720W	0.283±0.00 ^c	0.306±0.00 ^a	12.70±0.01 ^d
	KK 90°C	0.088±0.01 ^d	0.032±0.00 ^e	40.95±0.05 ^c
	KK 120°C	0.035±0.00 ^e	0.081±0.01 ^d	102.52±9.94 ^b
	KK 150°C	0.032±0.00 ^f	0.088±0.01 ^c	112.38±1.85 ^a

MW: Mikrodalga Fırın

KK: Konveksiyonel Fırın

^{a-f}Farklı harflerle gösterilen değerler Duncan test yöntemine göre örnekler arasındaki istatistiksel farkı göstermektedir ($P < 0.05$).

Kurutma için gereken enerji miktarının ölçümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek kurutma süreleri dikkate alındığında konveksiyonel kurutma sisteminde sıcaklık arttıkça kuruma süresinin kısaldığı tespit edilmiş, bütün meyve kabuklarında en uzun kuruma süresi 90 °C koşulunda bulunmuştur. Kuruma süreleri 90-120-150 °C koşulunda nar kabuğunda sırasıyla 90-60-45 dakika, portakal kabuğunda 95-50-45 dakika, elma kabuğunda 80-30-25 dakika olarak ölçülmüştür. Mikrodalga kurutma sisteminde ise mikrodalga gücü arttıkça kuruma süresinin

arttığı saptanmış, en uzun kuruma süresi 720W koşulunda bulunmuştur. Kuruma süreleri 360-540-720W koşulunda nar kabuğu için sırasıyla 510-570-630 saniye, portakal kabuğu için 570-630-660 saniye, elma kabuğu için 580-690-750 saniye olarak ölçülmüştür.

4. Sonuç

Bu çalışmada konveksiyonel ve mikrodalga kurutma teknikleri kullanılarak nar, portakal, elma kabuklarının kurutulması ile elde edilen tozların fiziksel ve toz ürün özellikleri ile kullanılan kurutma yöntemlerinin enerji verimliliği incelenmiştir. Meyve kabuğu tozlarının nem içeriği ve su aktivitesi değerleri güvenilir depolama koşulları için kabul edilebilir sınırlarda bulunmuştur. Nar ve portakal kabuğu tozlarında mikrodalga gücü ve sıcaklık arttıkça parlaklık (L^*) değerinde azalma gözlenmiştir. Konveksiyonel ve mikrodalga kurutma yöntemi uygulanan meyve kabuğu tozlarının düşük düzeyde yapışkanlık ve çok iyi düzeyde akabilirlik davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Enerji analizi sonuçları incelendiğinde genel olarak SMER değerinde azalış ve SEC değerinde artış meydana gelmiştir. Meyve kabuklarından elde edilen toz ürünlerin uzun depolama ömrünün yanı sıra paketleme kolaylığı, düşük nakliye maliyeti ve mikrobiyolojik kararlılığı gibi avantajlarından dolayı gıda formülasyonlarında renk maddesi olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Buna ek olarak incelenen sistemlerden verimliliği yüksek olan mikrodalga kurutma yönteminin sektöre uyarlanıp üretimde ve iş gücünde kolaylık, zamandan tasarruf ve maliyetin düşük olması ile endüstriyel uygulamalara yön vermesi beklenmektedir.

Teşekkür

Araştırmamız kapsamında bize destek olarak, çalışmamıza katkı sağlayan Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (**Proje No:** FLP-2020-22562) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Topkaya, C. Nar Kabuğu Tozu İlavesinin Keklerin Besinsel, Duyusal ve Mikrobiyolojik Özelliklerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2017.
- [2] Elaltunkara, Z. Nar Çekirdeği ve Nar Kabuğu Tozunun Probiyotik Yoğurt Üretiminde Prebiyotik Olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2018.
- [3] Sarıca, Ş. Nar Suyu Yan Ürünlerinin Hayvan Beslemede Kullanım Olanakları. *GOÜ Ziraat Fakültesi Dergisi* 2011; 28(2), 97-101.
- [4] Demir, T., Akpınar, Ö., Kara, H., & Güngör, H. Nar (*Punica granatum L.*) Kabuğunun In Vitro Antidiyabetik, Antienflamatuar, Sitotoksik, Antioksidan ve Antimikrobiyal Aktivitesi. *Akademik Gıda* 2019; 17(1), 61-71. DOI: <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.544647>
- [5] Yaman, K. Bitkisel Atıkların Değerlendirilmesi ve Ekonomik Önemi. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi* 2012; 12(2), 339-348.
- [6] Güzel, M., & Akpınar, Ö. Turunçgil Kabuklarının Biyoaktif Bileşenleri ve Antioksidan Aktivitelerinin Belirlenmesi. *GÜFBED* 2017; 7(2), 153-167. DOI: <http://dx.doi.org/10.17714/gufbed.2017.07.010>
- [7] Henríquez, M., Almonacid, S., Lutz, M., Simpson, R., & Valdenegro, M. Comparison Of Three Drying Processes To Obtain An Apple Peel Food Ingredient. *Journal of Food* 2013; 11(2), 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.703693>
- [8] Alibaş, I., Zia, M.P., Yılmaz, A., ve Asık, B.B. Drying Kinetics And Quality Characteristics Of Green Apple Peel (*Mallus Communis L. Var. "Granny Smith"*) Used In Herbal Tea Production. *Journal of Food Processing and Preservation* 2020; 44:14332. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14332>
- [9] Nakov, G., Brandolini, A., Hidalgo, A., Ivanova, N., Jukić, M., Komlenić, D.K., & Lukinac, J. Influence Of Apple Peel Powder Addition On The Physico-Chemical Characteristics And Nutritional Quality Of Bread Wheat Cookies. *Food Science and Technology International* 2020, 26(7), 574-582. DOI: [10.1177/1082013220917282](https://doi.org/10.1177/1082013220917282)
- [10] Tokdemir, M., Boran, K., Aktaş, M., & Alkaç, S.P. Isı Pompalı Kurutma Tekniği ile Toz Elma ve Elma Cipsi Üretimi: Performans Analizi. *Politeknik Dergisi* 2017; 21(4), 887-894. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.417750>
- [11] Polat, A., Kurtulmuş, F., & İzli, N. Sürekli ve Kesikli Mikrodalga Yöntemleriyle Kurutulan Elmanın Renk Değişim Analizi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 2020; 34(1), 149-165.
- [12] Karam, M.C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E.B., & Scher, J. Effects Of Drying And Grinding In Production Of Fruit And Vegetable Powders: A Review. *Journal of Food Engineering* 2016; 188, 32-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001>
- [13] Yılmaz, M. S. Brokolinin Mikrodalga Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi Ve Modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [14] Arda, S.O. Mikrodalga ve Güneş Enerjisi Kombinasyonlu Kurutucu Kullanılarak Kurutma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2017.

- [15] Atuonwu, J.C., Jina, X., Stratena, G.V., Antonius, H.V.D., & Boxtel, J.B. Reducing Energy Consumption In Food Drying: Opportunities In Desiccant Adsorption And Other Dehumidification Strategies. *Procedia Food Science* 2011; 1:1799 – 1805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.264>
- [16] Baker, C.G.J., & McKenzie, K.A., Energy Consumption Of Industrial Spray Dryers, *Drying Technology* 2005; 23:365–386. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-200047665>
- [17] Gürlek, G., Akdemir, Ö.A., & Güngör, A., Gıda Kurutulmasında Isı Pompalı Kurutucuların Kullanımı ve Elma Kurutmada Uygulanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi* 2015; 21(9), 398-403. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.417750>
- [18] Jinapong, N., Suphantharika, M. & Jamnong, P. Production Of Instant Soymilk Powders By Ultrafiltration. Spray Drying And Fluidized Bed Agglomeration, *Journal of Food Engineering* 2008; 84:194-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- [19] Özcan, M.M., Ghafoor, K., Al Juhaimi, F., Uslu, N., Babiker, E.E., Mohamed Ahmed, I.A., & Almusallam, I.A. Influence Of Drying Techniques On Bioactive Properties, Phenolic Compounds And Fatty Acid Compositions Of Dried Lemon And Orange Peel Powders. *Journal Of Food Science And Technology* 2020; 58(1),147–158. DOI: [10.1007/s13197-020-04524-0](https://doi.org/10.1007/s13197-020-04524-0)
- [20] Mphahlele, R.R., Fawole, O.A., Makunga, N P., & Opara, U.L. Effect Of Drying On The Bioactive Compounds, Antioxidant, Antibacterial And Antityrosinase Activities Of Pomegranate Peel. *BMC Complementary and Alternative Medicine* 2016; 16(1), 1–12. DOI: [10.1186/s12906-016-1132-y](https://doi.org/10.1186/s12906-016-1132-y)
- [21] Ma, Q., Bi, J., Yi, J., Wu, X., Li, X., & Zhao, Y. Stability Of Phenolic Compounds And Drying Characteristics Of Apple Peel As Affected By Three Drying Treatments. *Food Science and Human Wellness* 2021; 10(2), 174-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.006>
- [22] Koç, G.Ç. Püskürtmeli Kurutucu İle Ispanak Ve Havuç Sularının Kurutulması Ve Örnek Gıda Sisteminde Denenmesi. *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2018.
- [23] Türker, İ., Koç, B., & İşleroğlu, H. Püskürtmeli-Dondurarak Kurutma İşleminin Maltodekstrinin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi. *GIDA/The Journal of FOOD* 2018; 43(2). DOI: <https://doi.org/10.15237/gida.GD17101>
- [24] Baysal, T., Ozbalta, N., Gokbulut, S., Capar, B., Tastan, O., & Gurlek, G. Investigation Of Effects Of Various Drying Methods On The Quality Characteristics Of Apple Slices And Energy Efficiency. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015; 35(1), 135-144.



Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayınlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1

2

3

4

5

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayınız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.