



## Position Control of Brushless Direct Current Motor with SVPWM Based FOC Method

Süleyman KOKUNDU<sup>1,\*</sup> M. Timur AYDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Gazi University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 06570, Maltepe, ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 14/05/2019

Revision 20/05/2019

Accepted: 17/06/2019

#### Highlights

- Microcontroller
- SIMULINK

#### Keywords

BLDC Motor  
Space Vector PWM  
Field-Oriented Control  
Motor Control

In this paper, SVPWM based FOC Method which was originally developed for control of Permanent Magnet Synchronous Motors is explained in detail and then some modifications are proposed and implemented in order to increase the performance and stability. The proposed method first has been modeled and tested in SIMULINK simulation environment. After the success in simulation environment, the proposed method is implemented with designed driver board and NUCLEO-F746ZG controller board with the code developed on to it. The achievement and applicability of this method for the control of the BLDC Motor have been verified with laboratory tests at no-load and under various load configurations.

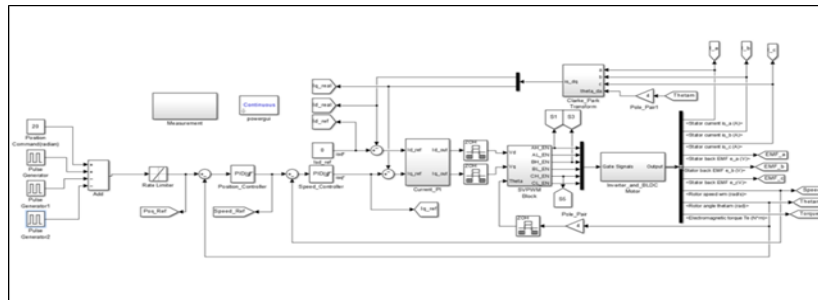


Figure A. SIMULINK Model of the Proposed Method

**Purpose:** The main motivation of this study is to verify the applicability of the SVPWM based FOC technique for the control of the BLDC Motor and increasing the modularity for actual systems by using microcontrollers.

**Theory and Methods:** BLDC Motor in *abc* reference frame is modeled and its fundamental equations are given. FOC is explained step by step. SVPWM is explained in detail and also its restrictions are mentioned. Proposed method is simulated in SIMULINK and then verified design is implemented.

**Results:** The results obtained from laboratory tests have shown that SVPWM based FOC method can be successfully used to control BLDC Motor. Some undesired performance degradations are easily overcome by using powerful microcontrollers and this makes the proposed method superior and attractive over classical methods.

**Conclusion:** In this work, SVPWM based FOC technique has been applied for commutation and current control of the BLDC Motor. In addition, speed and position control of the BLDC Motor have been achieved with the use of a PI Controller. It was proven that SVPWM based FOC technique can be used for the control of the BLDC Motor successfully. Thanks to the success of the prototype design that works with SVPWM based FOC technique, it has also been proven that the electronic board, which contains both the controller and driver sections, can be integrated to the actual systems with little effort.



## UVDGM Tabanlı AYK Yöntemiyle Fırçasız Doğru Akım Motorunun Konum Kontrolü

Süleyman KOKUNDU<sup>1,\*</sup> M. Timur AYDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 06570, Maltepe, ANKARA

### Öz

Bu çalışma kapsamında, Fırçasız Doğru Akım (FDA) Motorun performansını artırmak için Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (UVDGM) tabanlı Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) yöntemi kullanıldı. Kontrol yöntemi ve UVDGM tekniği açıklandı. Ayrıca *abc* referans eksen takımında FDA Motoru modellendi. Düzgün tepkisi ve uygulama kolaylığı açısından PI kontrolcüsü tercih edildi. Hem üretilebilen moment miktarını artırması hem de moment üzerindeki dalgalanmayı azaltmasına rağmen çok fazla işlem gücü gerektirmesi ve esas olarak Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım (SMAA) Motorunun kontrolünü verimli hale getirmek için geliştirilen UVDGM tabanlı AYK yöntemi, FDA Motoru kontrolünde fazla tercih edilmeyordu. İşlemci teknolojisindeki gelişmelerle beraber UVDGM tabanlı AYK yöntemi FDA Motoru kontrolünde çekici hale gelmeye başladı. Bu çalışma kapsamında, UVDGM tabanlı AYK kontrolcünün FDA Motoruna uygulanabilirliği ve başarımı SIMULINK benzetimi ve laboratuvar ortamında yüklü ve yüksüz yapılan testlerin sonuçlarıyla doğrulandı.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 14/05/2019  
Düzeltilme: 20/05/2019  
Kabul: 17/06/2019

### Anahtar Kelimeler

FDA Motoru  
UzayVektör DGM  
Motor Kontrolü  
Alan Yönlendirmeli  
Kontrol

### Position Control of Brushless Direct Current Motor with SVPWM Based FOC Method

### Abstract

In order to improve the performance of Brushless Direct Current (BLDC) Motor, Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) based Field-Oriented Control (FOC) method is applied in this paper. Control strategy and SVPWM technique are clearly described and BLDC motor is modelled in *abc* reference frame. PI controller was preferred because of its well response and implementation simplicity. Even though it increases the amount of producible torque and decreases the torque ripple, SVPWM based FOC method is not often preferred for BLDC Motor control because this method was mainly developed for Permanent Magnet Synchronous Motor Control and it requires big processing power. After developments on processor technology, use of the SVPWM based FOC method for BLDC Motor Control has become reasonable. In this paper, applicability and achievement of SVPWM based FOC of BLDC Motor is verified and supported with SIMULINK simulations and results of loaded and no load tests which are done in laboratory environment.

### Keywords

BLDC Motor  
Space Vector PWM  
Motor Control  
Field-Oriented Control

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM), zıt elektromotor kuvvetlerinin (EMK) dalga şekillerine göre Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım (SMAA, ing. PMAC) Motoru ve Fırçasız Doğru Akım (FDA, ing. BLDC) Motoru olmak üzere ikiye ayrılır. İlk grubun zıt EMK dalga şekli sinüzoidalken, ikinci grubunki ikizkenar yamuktur. SMAA Motor ile kıyaslandığında FDA Motor yüksek verim, yüksek moment yoğunluğu, düşük maliyet ve yapısal basitlik gibi önemli avantajlara sahiptir [1]. Bahsedilen avantajlar sayesinde FDA Motorun kullanımı tüketici elektroniğinden başlayıp savunma sanayisine kadar uzanan geniş yelpazede günbegün artmaktadır.

FDA Motorun komütasyonunda çoğunlukla geleneksel altı-adım yöntemi tercih edilir. Bu yöntemde komütasyon rotora 120°'lik elektriksel derece aralıklarla rotora yerleştirilen Hall etkili algılayıcıların çıkışları ile yapılır [2]. Komütasyon esnasında üç fazın sadece ikisi aktif durumdadır yani motorun sadece iki fazının sarımları üzerinden akım geçer. Üç fazın sadece ikisinin aynı anda kullanılabilmesi ve komütasyon esnasında motor fazlarından geçen akımın aniden sonlandırılması ya da başlatılması komütasyonun keskin bir şekilde gerçekleşmesi akım ve moment üzerinde ciddi dalgalanmalara sebebiyet verir. Özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda, bu dalgalanma sistem başarımını etkileyecek seviyelere ulaşabilir.

Motor komütasyonun yapılabilmesinin yanı sıra Hall etkili algılayıcının çıkışlarının işlenmesiyle hız ve konum kontrolü de yapılabilir [3]. İki ya da daha az kutup çifti içeren FDA Motorlarda ardışık iki Hall etkili algılayıcı arasındaki mesafenin artması çözünürlükte azalmaya sonuçlanır. Çözünürlükteki azalma hız ve konum kontrolünün kötüleşmesine sebebiyet verir. Bu yüzden hız ve konum kontrolü içeren uygulamalarda Hall etkili algılayıcıyla beraber enkoder de kullanılır [4]. İki tip algılayıcının beraber kullanılması maliyeti artırırken özellikle küçük motorlara ikisinin birlikte yerleştirilmesi imkânsız hale gelebilir.

Bahsedilen dezavantajlar sebebiyle uzun zamandır FDA Motorun verimini artırmaya yönelik yeni komütasyon teknikleri üzerinde araştırmalar devam etmektedir [5-12]. Bu yöntemlerden bir tanesi genellikle SMAA Motor kontrolünde tercih edilen Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (UVDGM, ing. SVPWM) tabanlı Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK, ing. Field-Oriented Control) yöntemidir [5-7]. Bu yöntem sayesinde komütasyonla beraber hız ve konum kontrolü de sadece enkoder kullanımıyla istenen düzeyde gerçekleştirilir. Aynı anda üç fazın aktif olarak kullanımıyla beraber komütasyonun da pürüzsüz şekilde gerçekleşmesi üretilen moment miktarını artırırken akım ve moment üzerinde oluşan dalgalanmayı da azaltır.

## 2. FDA MOTOR MODELİ (BLDC MOTOR MODEL)

SMAA Motorun aksine FDA Motorun zıt EMK dalga şekli ikizkenar yamuk olduğu için, FDA Motor  $dq$  eksen takımında modellemeye uygun değildir. Bu yüzden FDA motorun elektriksel modeli bu çalışma kapsamında  $abc$  eksen takımında yapılacaktır [13].

Y tipi bağlantıya sahip 3-Faz FDA Motorun elektriksel modeli aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{an} \\ e_{bn} \\ e_{cn} \end{bmatrix} \quad 1$$

$$L = L_S - L_M$$

$L_S$  = stator bobininin öz endüktansı

$L_M$  = stator bobinleri arasındaki karşılıklı endüktans

$R$  = stator faz direnci

$V_{xn}$  = stator faz gerilimi

$i_x$  = stator faz akımı

$e_{xn}$  = stator zıt EMK değeri,

FDA Motorun elektromanyetik moment ifadesi aşağıdaki gibidir

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_{an}i_a + e_{bn}i_b + e_{cn}i_c) \quad 2$$

$\omega_r$  = rotor hızı

### 3. ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROL (FIELD ORIENTED CONTROL)

Alan Yönlendirmeli kontrolün genel adımları aşağıdaki gibidir.

“a” ve “b” fazlarının akımları sensör yardımıyla belirlenir. “c” fazının akımı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad 3$$

3 faz durağan eksen takımında tanımlı faz akımları Clarke Dönüşümü ile 2 eksenli durağan  $\alpha\beta$  eksen takımına aktarılır [14].  $\alpha\beta$  eksen takımı ayrıca stator referanslı eksen takımı olarak da adlandırılır.

$$i_\alpha = i_a \quad 4$$

$$i_\beta = \frac{(i_a + 2i_b)}{\sqrt{3}} \quad 5$$

Clarke Dönüşümü uygulansa bile motor bileşenleri hala stator referanslı eksen takımında tanımlı olduğu için söz konusu bileşenlerin değerleri motor konumuna göre değişir. Doğrusal olmayan bu davranış nedeniyle akı ve moment kontrolü istenildiği gibi gerçekleştirilemez.

Bu durumun önüne geçmek için 2 eksenli durağan  $\alpha\beta$  eksen takımında tanımlı bileşenler Park Dönüşümü ile 2 eksenli hareketli  $dq$  eksen takımına taşınır [14]. Yeni eksen takımı rotor referanslı olduğu için motor bileşenlerinin değerleri motor konumundan bağımsızdır.

$$i_d = \cos \theta i_\alpha + \sin \theta i_\beta \quad 6$$

$$i_q = -\sin \theta i_\alpha + \cos \theta i_\beta \quad 7$$

Motor akımları  $dq$  referans eksen takımında tanımlandıktan sonra kontrol oldukça basit hale gelir. Genellikle uygulama kolaylığı sebebiyle PI Kontrolcü  $d$  ve  $q$  eksenlerindeki akım bileşenlerinin kontrolü için kullanılır. Bu iki bağımsız kontrolcünün çıktıları sırasıyla  $v_d$  ve  $v_q$ 'dur.  $i_d$  akımının referans değeri akı üretimini engellemek için sıfıra sabitlenirken,  $i_q$  akımının referansı ise hız döngüsünden üretilir.

$v_d$  ve  $v_q$  gerilimleri, Ters Park Dönüşümü kullanılarak 2 eksenli durağan eksen takımında tanımlı  $v_\alpha$  ve  $v_\beta$  gerilimlerine dönüştürülür [14].

$$v_\alpha = \cos \theta v_d - \sin \theta v_q \quad 8$$

$$v_\beta = \sin \theta v_d + \cos \theta v_q \quad 9$$

Son olarak, bu 2 eksenli durağan eksen takımında tanımlı gerilim değerleri, PWM sinyallerinin üretilebilmesi için anlamlı hale getirilmelidir. Bu son adım uygulanan PWM üretme yöntemine göre değişir. Kendi durumumuzda, BLDC Motoruna uygulanacak referans gerilim vektörünün genlik ve açısı bilgilerini elde etmek için kutupsal koordinat dönüşümünü kullanıyoruz.

$$Genlik = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad 10$$

$$Açı = \arctan(v_\beta/v_\alpha) \quad 11$$



#### 4. UVDGM YÖNTEMİ (SVPWM METHOD)

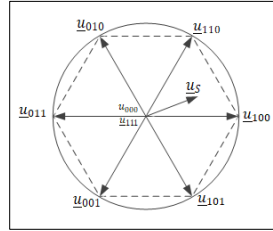
Evirici (*ing.* Inverter) yapısında, her biri motorun ayrı fazına bağlanmış üç adet anahtarlama kolu bulunmaktadır. Bu sayede 8 farklı anahtarlama kombinasyonu (temel durum vektörü) elde edilir. 6 adet temel durum vektörü sıfır olmayan büyüklüğe sahipken diğer ikisi ise sıfıra eşittir.

$\underline{u}_{100}$  gösterimi 100 gösterimine eşittir. Bu durumda ilk basamak A fazını, ikinci basamak B fazını ve üçüncü basamak ise C fazını belirtir. 0 ve 1 değerleri mantık olarak sırasıyla aşağıda belirtilen değerleri ifade eder;

0, sargı negatif baraya (GND) bağlıysa

1, sargı pozitif baraya ( $V_{BUS}$ ) bağlıysa

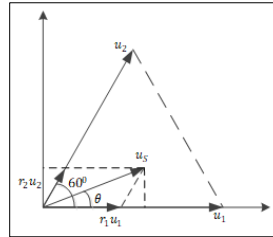
Şekil 1’de gösterilen, çember içindeki çizgili altıgenin sınırlarını oluşturduğu bölge Uzay Vektör Bölgesi olarak adlandırılır. Herhangi bir referans vektörü 8 durum vektörünün uygun kombinasyonu ile elde edilebilir. Motora uygulanacak referans durum vektörünü  $\underline{u}_S$  kabul edersek,  $\underline{u}_S$ ’nin  $\underline{u}_{000}$ ,  $\underline{u}_{111}$ ,  $\underline{u}_{100}$  ve  $\underline{u}_{110}$  durum vektörlerinin oluşturduğu sektörün içerisinde kaldığı görülür. Bu sebeple  $\underline{u}_S$  durum vektörü bu dört temel durum vektörünün uygun kombinasyonundan oluşturulur.



Şekil 1. Uzay Vektör Bölgesi

Şekil 2’de gösterilen birinci uzay vektör bölgesinde tanımlı  $\underline{u}_S$  vektörü aşağıdaki gibi sınırlarını oluşturan iki temel durum vektörü ile ifade edilir.

$$\underline{u}_S = r_1 \underline{u}_1 + r_2 \underline{u}_2$$



Şekil 2. Birinci Bölge İçerisindeki  $\underline{u}_S$  Referans Uzay Vektörü

Kesin anahtarlama zamanlarını belirlemede temel trigonometri bilgisi kullanılarak Şekil 2’den faydalanılır [15]. Öncelikle iki temel durum vektörünün büyüklüğü hesaplanır.

$$r_1 = \sqrt{3} \frac{u_S}{U} \sin(60 - \theta) \quad 12$$

$$r_2 = \sqrt{3} \frac{u_S}{U} \sin \theta \quad 13$$

$$u_S = |\underline{u}_S|$$

$$u_1 = u_2 = |\underline{u}_1| = |\underline{u}_2| = \frac{2}{3} U$$

$$\theta = [0^\circ, 60^\circ], r_1 \text{ ve } r_2 = [0,1].$$

Temel durum vektörlerinin uygulanma süresi aşağıdaki gibidir.

$$T_0 = (1 - r_1 - r_2)T$$

$$T_1 = r_1T$$

$$T_2 = r_2T$$

$r_1 + r_2 < 1$  olması durumunda periyodun geri kalanı 0 büyüklüğüne sahip temel durum vektörleriyle doldurulur.

Yukarıda yapılan anahtarlama süresi hesaplamaları sonucunda, altıgenin sınırlarını ihlal edebilecek bazı durumlar ortaya çıkabilir. Bunun sebebi ise  $\underline{u}_1$  ve  $\underline{u}_2$ 'nin vektörel toplamının  $r_1$  ve  $r_2$ 'nin skaler toplamına eşit olmamasıdır. Olabilecek en kötü durum oluşturarak bu ifade doğrulanabilir:

$$|\underline{u}_S| = \frac{2}{3}U \text{ ve } \theta = 30^\circ,$$

Verilen değerler (4.1) ve (4.2)'ye yerleştirildiğinde;

$$r_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$r_2 = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

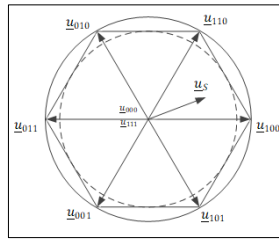
$$r_1 + r_2 = \sqrt{3} > 1$$

$r_1$  ve  $r_2$ 'nin skaler toplamının 1'den büyük olamayacağı bilindiğinden bu durumu engellemek için çıkan sonuç  $\sqrt{3}$ 'e bölünür. Bu durumda  $r_1$  ve  $r_2$ ,  $\frac{1}{2}$ 'ye eşit olur. (4.1)'e değerler konulduğunda

$$\frac{1}{2} = \sqrt{3} \frac{u_S}{U} \sin(60 - \theta), \theta = 30^\circ$$

$|\underline{u}_S|$ 'nin en fazla  $\frac{1}{\sqrt{3}}U$  olabileceği ortaya çıkar.

Bu hesaplamaların ardından, Uygulanabilir Uzay Vektör Bölgesinin sınırları yenilenmelidir. Yenilenmiş sınır, Şekil 3'de çizgili iç çember ile gösterilmiştir.

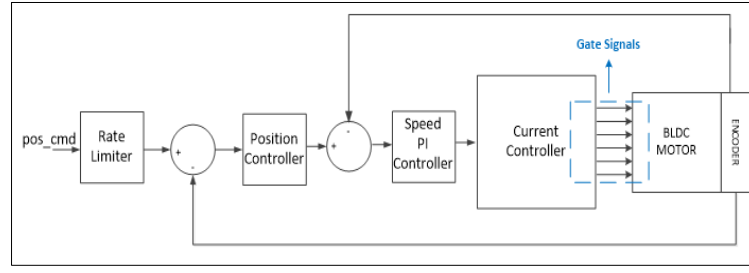


**Şekil 3.** Uygulanabilir Uzay Vektör Bölgesi

Bu çalışmada yapılan bütün hesaplamalar yenilenmiş sınıra göre yapılacaktır.

## 5. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Şekil 4'te, önerilen yöntemin blok diyagramı gösterilmiştir. Blok diyagramda pos\_cmd olarak gösterilen konum komutu sistemin girdisidir. Konum komutu alındıktan sonra sistem FDA Motorun minimum hatayla bu komutu takip etmesine çalışır.



**Şekil 4.** Önerilen Yöntemin Blok Diyagramı

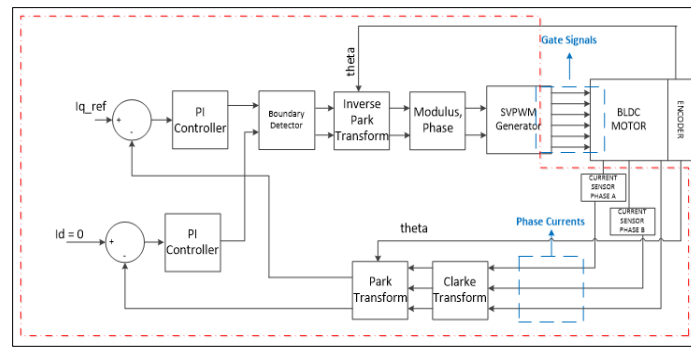
Uygulama kolaylığı ve düzgün tepkisinden ötürü, bu çalışmada PI kontrolcü kullanılmasına karar verildi [15]. Ayrıca tüm sistemin iç içe 3 adet kontrolcü yapısı içermesi de PI kontrolcünün cevap kalitesine katkı sağladığı gözlemlendi.

PI kontrolcülerin çalışma frekansları aşağıdaki gibidir;

- $i_d$  ve  $i_q$  PI kontrolcüsünün çalışma frekansı = 20 kHz
- Hız PI kontrolcüsünün çalışma frekansı = 1 kHz
- Konum PI kontrolcüsünün çalışma frekansı = 100 Hz

Konum komutu, doğrudan konum PI kontrolcüsüne yönlendirilmeden önce konum komutunun değişim oranını sınırlaması için “Oran Sınırlayıcı (Rate Limiter)” bloğuna iletilir. Değişim oranının değeri motorun özellikleri ve sistemin gereksinimlerine göre belirlenir. Oran Sınırlayıcı bloğu sayesinde konum PI kontrolcüsüne sadece izin verilen konum komutu uygulandığından sistem daha kararlı hale gelir.

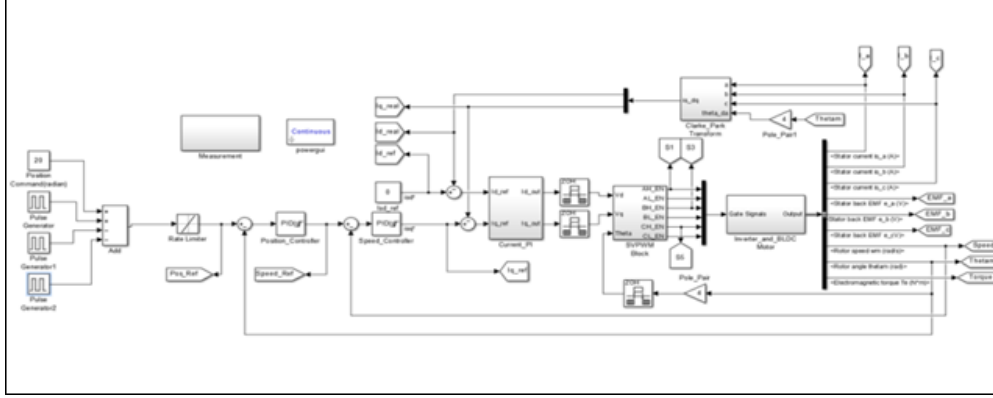
Şekil 5’te çalışma kapsamında uygulanan Alan Yönlendirme Kontrol Bloğunun içyapısı gösterilmiştir. Klasik yönteme ek olarak “Sınır Denetleyici (Boundary Detector)” bloğu eklenmiştir. Bu sayede bağımsız çalışan iki PI kontrolcünün bileşkelerinin hiç bir zaman modülasyon çemberinin sınırlarını ihlal etmemesi amaçlanmıştır.



**Şekil 5.** Uygulanan UVDGM Tabanlı AYK’nın Blok Diyagramı

## 6. SİSTEM MODELLEME (SYSTEM MODELLING)

Önerilen Yöntem bölümünde detaylı bir şekilde anlatılan sistem MATLAB/SIMULINK ortamında modellendi. Daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için akım PI kontrolcülerinin çalışma frekansı olan 10 kHz değeri benzetime aktarıldı.



**Şekil 6.** Sistemin SIMULINK Modeli

Benzetim sonuçlarının savunma sanayi alanında kullanıma referans olması amacıyla akıllı mühimmatların kanatçıklarının hareketinde kullanılan FDA Motor bu çalışma kapsamında tercih edildi. Yine aynı uygulamalarda tercih edilen 28V bara gerilimi benzetime aktarıldı.

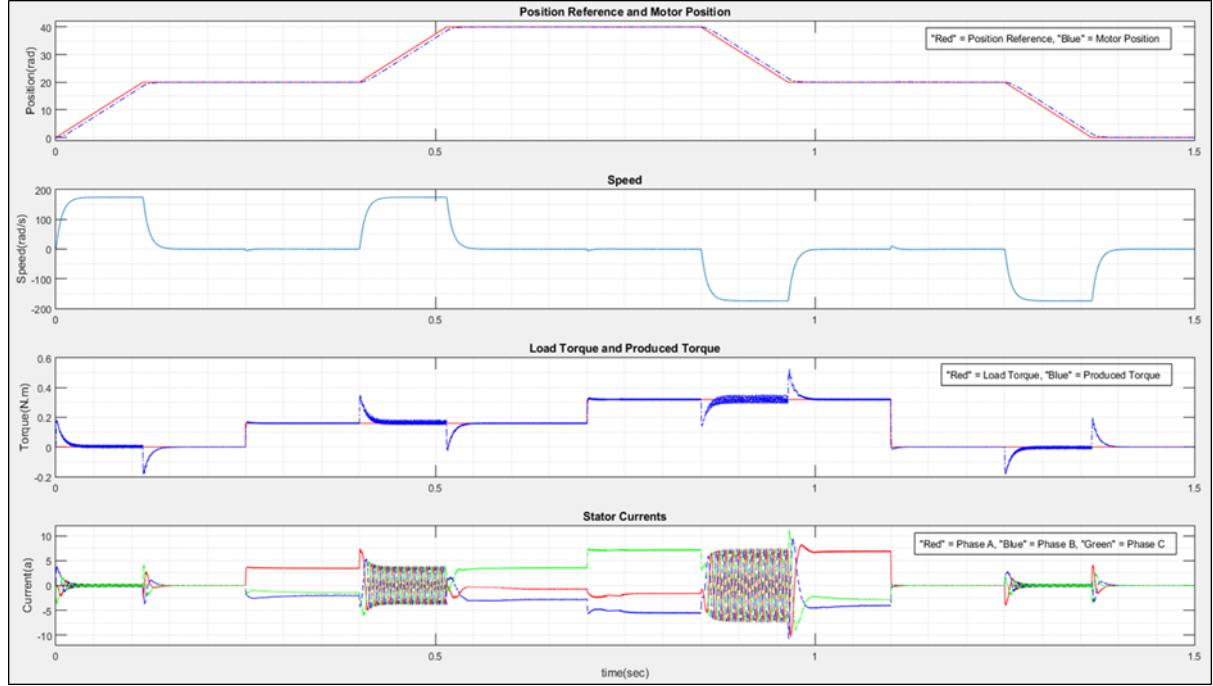
Benzetimde kullanılacak olan FDA Motorun önemli parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Motor Parametreleri

Elektriksel		Mekaniksel	
Direnç (Ohm)	0,3	Moment Sabiti (N.m/A)	0,048
Endüktans (mH)	2,5	Hız Sabiti (rad/Volt.s)	0,048
Kutup Çifti	4	Rotor Ataleti (kg.m <sup>2</sup> )	3 10 <sup>-6</sup>
		Viskoz Sönümlenme (N.m.s)	2 10 <sup>-5</sup>

**Tablo 2.** Benzetim Test Senaryosu

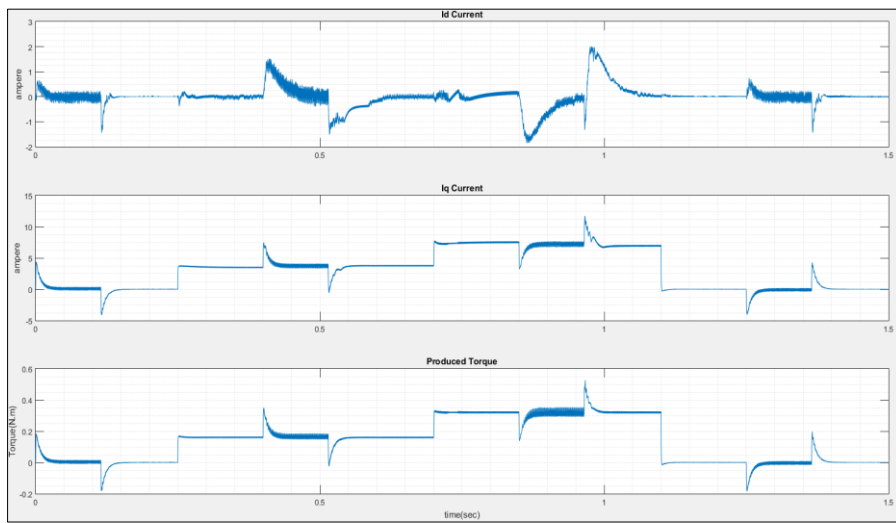
Zaman(s)	Gerçekleşen Olay
0	Rotor pozisyonu 0 radyana eşit ve yük momenti yok
0	20 radyan pozisyon komutu gelir
0,25	0,16 N.m yük momenti uygulanır
0,4	40 radyan pozisyon komutu gelir
0,7	0,32 N.m yük momenti uygulanır
0,85	20 radyan pozisyon komutu gelir
1,1	Yük momenti sıfırlanır
1,2	0 radyan pozisyon komutu gelir



**Şekil 7.** Konum, Hız, Yük Momenti, Üretilen Moment ve Stator Akımlarının Aynı Zaman Ekseninde Gösterimi

Pozisyon komutunun başarıyla takip edildiği gözlenmektedir. Sabit durum hatası olmadığı gibi, pozisyon kontrolcüsünün dinamik tepkisinde aşma veya aşınma yoktur. Ek olarak, yük momentini değişimlerinin, konum kontrolcüsünün performansını etkilemediği gözlenmektedir.

Beklendiği gibi, 3 faz akımları motor döndüğünde neredeyse sinüzoidaldir. Motor sabit ve yük altındayken, 3 faz akımlarının değeri sabit ve sıfırdan farklı iken, yükün olmadığı durumlarda sıfıra eşittir. 40 radyandan 20 radyana geçiş sırasında 3 faz akımlarının değerleri, uygulanan yük momentinin büyüklüğü nedeniyle 20 radyandan 40 radyana geçiş sırasındaki akım değerlerinden daha fazladır.



**Şekil 8.**  $i_d$ ,  $i_q$  ve üretilen moment

En önemli kriterlerden biri olan  $dq$  eksenindeki akım değerleri detaylı incelendi. Moment üreten akım olarak da bilinen  $i_q$  akımının neredeyse üretilen momentle aynı dalga şekline sahip olduğu gözlemlendi. Bu durum  $dq$  eksen takımındaki elektromanyetik moment denklemini doğrulamaktadır.

$$T = \frac{3P}{2} (\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad 14$$

$P$  = Kutup çifti sayısı

$\lambda_{pm}$  = Sürekli mıktansın akı bağı

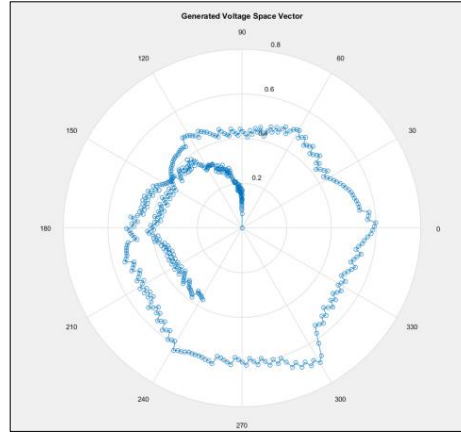
$L_d = d$  eksenindeki motor endüktansı

$L_q = q$  eksenindeki motor endüktansı

$L_d = L_q$  olma durumunda denklem aşağıdaki hale gelir;

$$T = \frac{3P}{2} (\lambda_{pm} i_q) \quad 15$$

$i_q$  akımı moment üretirken,  $i_d$  akımı bileşeni moment kaybına sebebiyet verir. Kararlı durumda,  $i_d$  akım değeri istenildiği gibi sıfır değerine çok yakın iken geçiş durumlarında ise görece daha büyük değerlere ulaştığı gözlemlendi.  $i_q$  akımıyla karşılaştırıldığında  $i_d$  akım değerinin çok düşük olması sistemi daha verimli hale getirdi.

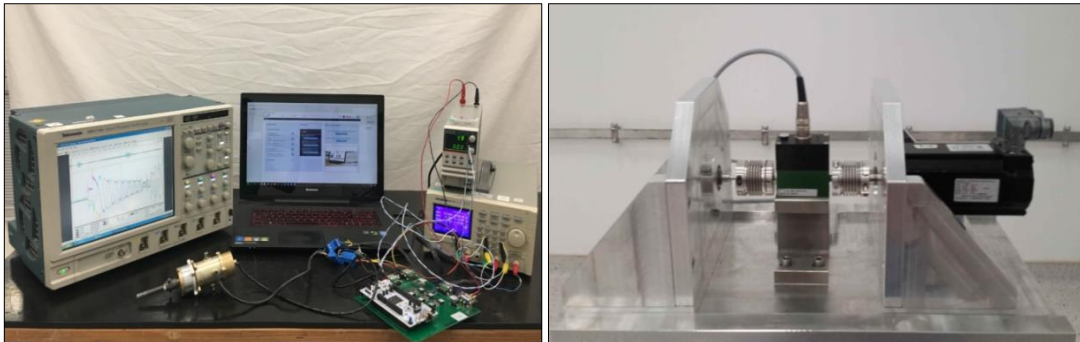


**Şekil 9.** Üretilen Gerilim Uzak Vektörlerinin Kutupsal Koordinat Sisteminde Gösterimi

Şekil 9'da, motor pozitif yani saat yönünde dönerken motora uygulanan gerilim uzak vektörleri kutupsal koordinat sisteminde gösterildi. Beklendiği üzere, motor saat yönünde dönerken kutupsal koordinat sisteminin doğası gereği uygulanan gerilim uzak vektörleri saat yönünün tersine döner.

## 7. LABORATUVAR TESTLERİ (LABORATORY TESTS)

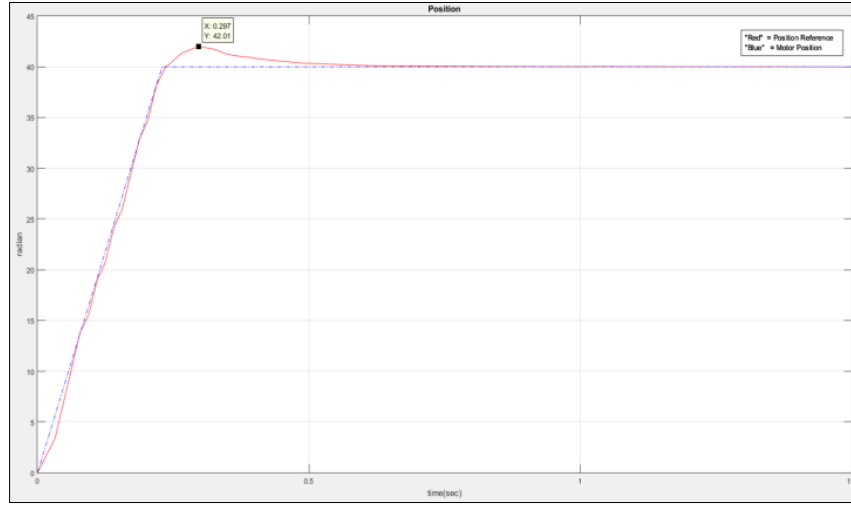
Benzetim ortamında doğrulanan tasarım gerçekleştirilerek laboratuvar ortamında da yüksüz durumda ve yük altında test edildi.



**Şekil 10.** Test Düzenegi ve Yük Momenti Yapısı

### Yüksüz Test

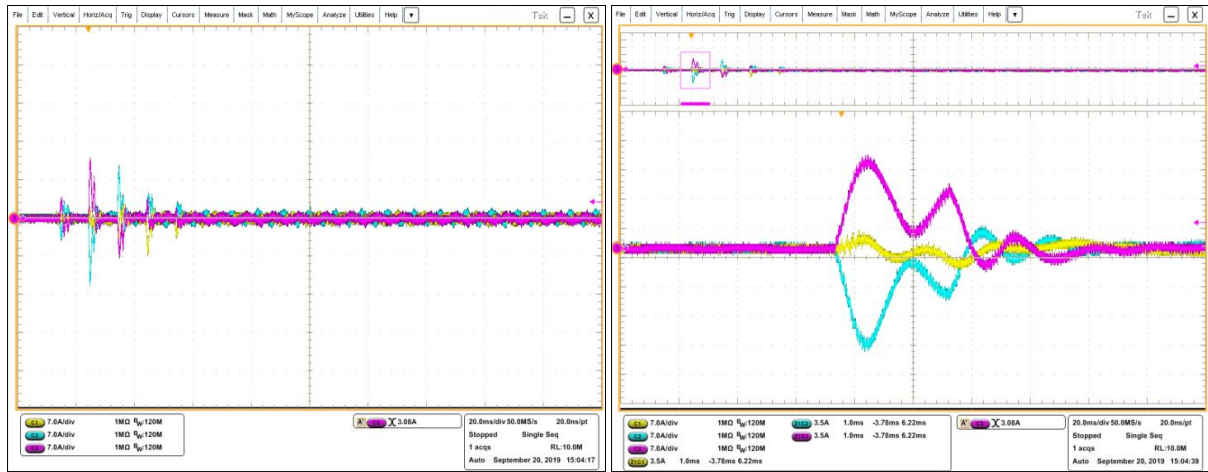
Motor yüksüzken motora 40 radyan'lık pozisyon komutu uygulandı.



**Şekil 11.** 40 Radyan Pozisyon Komutu ve Kontrolcünün Tepkisi

Konum tepkisi aşımı yaklaşık %5'tir ve bu değer kabul edilebilir aralıktadır. Motor pozisyonunda kararlı durum hatası yoktur.

Şekil 12'de görüldüğü üzere, akım motor fazlarından sadece motor döndüğünde geçer ve sinüzoidal dalga şekline sahiptir, kararlı durumda ise 3 faz akımlarının büyüklüğü beklendiği gibi neredeyse sıfırdır.

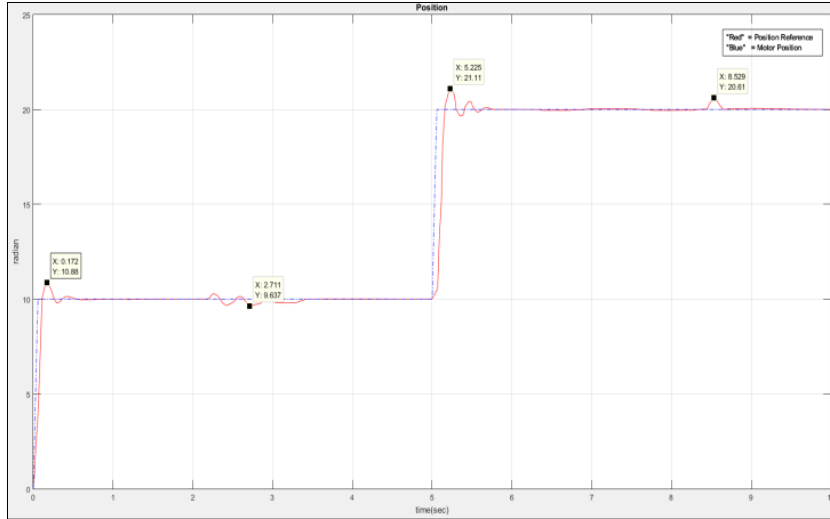


**Şekil 12.** 3 Faz Akımlarının Uzak (solda) ve Yakınlaştırılmış (sağda) Osiloskop Görüntüsü

### Yüklü Test

Yük momentinin yapısı gereği geri kazanım (rejeneratif) modunda çalışmaması sebebiyle yük altında iken motora sadece tek yönde pozisyon komutu uygulandı. Yük momenti yapısının test altındaki motordan tam olarak yalıtımlı olmaması sebebiyle iki yapının birbirlerinin performansına etki edeceği hesaba katıldı. Ayrıca yüklü durumda artan atalatsel moment artışına rağmen tutarlılık olması adına PI kontrolcü katsayıları değiştirilmedi.

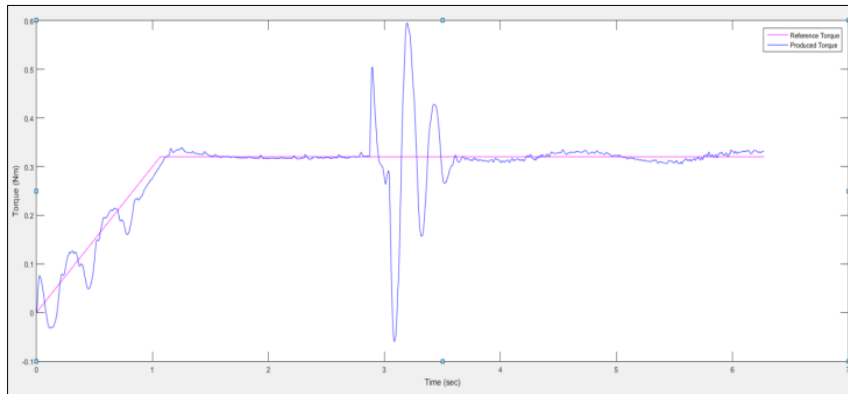
İlk başta yüksüz hareketlendirilen motor 10 radyan konumunda iken 0,32 N.m. yük momentine maruz bırakıldı. Daha sonra yük altındayken motora 20 radyan pozisyon komutu gönderildi.



**Şekil 13.** Yük Altında Gönderilen Pozisyon Komutu ve Kontrolcünün Tepkisi

Görüldüğü üzere yüksüz duruma göre motorun hem kararlı duruma ulaşma zamanı hem de aşım miktarı (yaklaşık %11) arttı. Kararlı durum hatası ise gözlenmedi.

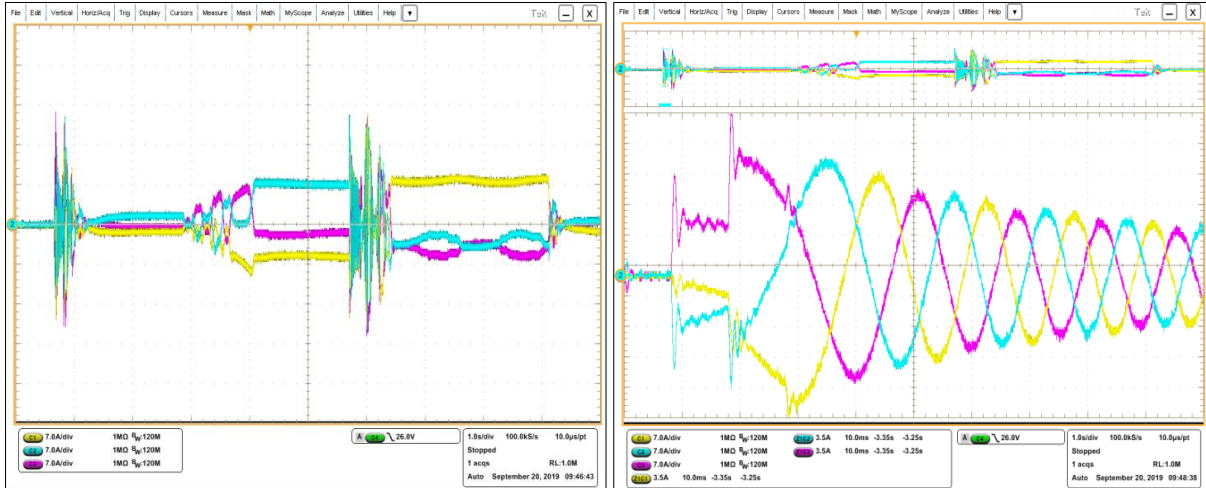
Üretilen moment üzerinde dalgalanma motor hareket halinde iken gözlemlenirken, motor sabitken neredeyse sıfırdır. Motorun hareket halinde olmasının yanı sıra hem yük moment yapısının kararlı duruma geçiş performansı hem de iki yapının etkileşim halinde olması dalgalanmanın seviyesinin artmasına sebebiyet verdi.



**Şekil 14.** Yüke Gönderilen Moment Komutu ve Üretilen Moment

Şekil 15'te görüldüğü üzere, motor yük altında ve sabitken faz akımları sıfırdan farklı ve sabit büyüklüklere sahiptir. Motor yük altında olduğu için gönderilen pozisyon komutunun büyüklüğü aynı olmasına rağmen yüksüz duruma göre daha fazla akım çekti. Motorun eylemsizlik momenti arttığı için yük olmadığı durumda ve hareketsizken bir miktar akım çektiği gözlemlendi. Son olarak motor hareketliken faz akımları sinüzoidal dalga şekline sahiptir.





**Şekil 15.** Yük Altında 3 Faz Akımlarının Uzak (solda) ve Yakınlaştırılmış (sağda) Osiloskop Görüntüsü

Testler sonucunda simülasyon ve gerçek sistem arasında pozisyon kontrolörü performansı açısından bazı farklılıklar gözlenmiştir. Sebepler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Benzetimde hız ve pozisyon PI Kontrolcülerinin sonsuz bant genişliğine sahip olması
- Ölü zaman eklenmesinin gerekliliği, MOSFET'lerin açılma ve kapanma zamanı, önyükleme (ing. bootstrap) kondansatörünün şarjı için zaman gereksinimi, kararsız DC Bara gerilimi ve BDK (Baskı Devre Kartı) tasarımının yan etkileri gibi gerçek sistem kısıtlamalarının olmaması.
- Gerçek sistemde kullanılan yük momentinin yalıtımsız olması
- Gerçek sistemde kullanılan yükün dengesiz performansı
- Yük moment yapısı nedeniyle gerçek sistemdeki motorun ataletindeki artış
- Gerçek sistemde sensörler kaynaklı hataların varlığı
- Veri izleme kısıtları nedeniyle kontrolcü katsayılarını istendiği gibi ayarlanamaması

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, UVDGM tabanlı AYK yöntemiyle FDA Motorun konum kontrolü gerçekleştirildi. Önerilen tasarım öncelikle SIMULINK benzetim ortamında modellendi ve doğrulandı. Uygulama aşamasında, hem maliyeti düşürmek hem de gerçekleştirme süresini kısaltmak için kontrolcü kartı ve sürücü kartından oluşan modüler yapı tercih edildi. Kontrolcü kartı olarak, fiyat performans oranı düşük olması ve çok fazla açık kaynağına ulaşılabilmesi sebebiyle ST Microelectronics firmasının NUCLEO-FZ746G geliştirme kartı kullanıldı. Kontrolcü kartıyla uyumlu çalışan, üzerinde çeviricilerin ve akım okuma sensörlerinin bulunduğu 4 katmanlı sürücü kartı tasarlanıp üretildi. Laboratuvar koşullarında yapılan yüklü ve yüksüz testlerle üretilen prototipin başarımı doğrulandı.

Bu çalışmanın sonucunda UVDGM tabanlı AYK tekniğinin FDA Motorunun kontrolünde başarılı bir şekilde kullanılabileceği kanıtlandı. UVDGM tabanlı AYK tekniği ile çalışan prototip tasarımının başarısı sayesinde, hem kontrolcü hem de sürücü bölümleri içeren elektronik kartın gerçek sistemlere çok az çaba sarf edilerek entegre edilebileceği kanıtlandı.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmalarımız esnasında katkılarından dolayı kurumum TÜBİTAK SAGE'ye teşekkürlerimizi sunarız.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] R. Krishnan, *Electrical Motor Drivers, Modeling, Analysis, and Control*, 2001.
- [2] J. Cervantes, E. Cordova, A. I. S. Marrufo, I. U. P. Monarrez, M. Nandayapa “BLDC Motor Commutation Based on DSP Builder for FPGA”, 2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)
- [3] Han-Chen Wu, Min-Yi Wen, and Ching-Chang Wong, “Speed Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors Based on DSP”, 2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)
- [4] D. Krklješ, C. Morvai, K. Babkovic, and L. Nagy, “BLDC Motor Driver – Development of Control and Power Electronics”, Proc. 27th International Conference on Microelectronics (MIEL 2010)
- [5] Pillay Pragsan, and R. Krishnan, “Modeling Analysis and Simulation of High Performance Vector Controlled PMSM,” in Proc. of the IEEE Annual Meeting ,Atlanta April,1987,pp. 345-349.
- [6] K. C. N. Sridivya, and T. Vamsee Kiran, “Space Vector PWM Control of BLDC Motor”, 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)
- [7] A. Islam, B. Hossen, B. Banik, and B. C. Ghosh, “Field Oriented Space Vector Pulse Width Modulation Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor”, 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)
- [8] P.L. Chapman, S.D. Sudhoff. C.A. Whitcomb, "Optimal Current Control Strategies for Surface Mounted Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives", IEEE Trans. Energy Convers, Vol. 14, No. 4, December 1999.
- [9] P. J. Sung, W. P. Han, I. H. Man, F. Harashima, "A New Approach for Minimum-Torque-Ripple maximum-Efficiency Control of BLDC Motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, Feb. 2000, pp.109-114.
- [10] H. Le-Huy, R. Perret, and R. Feuillet, “Minimization of torque ripple in brushless DC motor drive”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 22, pp. 748–755, July/Aug. 1986.
- [11] T. S. Kim, S. C Ahn and D. S. Hyun, "A New Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of BLDC Motors," Proc. of 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 2, 29th Nov.-2nd Dec. 2001 pp.1521-1526.
- [12] G.W. Meng , X. Hao and H. S. Li "Commutation Torque Ripple Reduction in BLDC Motor Using PWM\_ON\_PWM Mode", Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Syst. Conf., pp.1 -6 2009.
- [13] K. U. Vinayaka, S.Priya, “Analysis of BLDC Motor Performance Using Space Vector Pulse Width Modulation”, 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)
- [14] Texas Instrument Application Note BPRA048; Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx
- [15] R. Kennel, “Power Electronics Exercise: Space Vector Modulation”, 2013

## Quartz Accelerometer Closed Loop Analog Readout Circuit

M. Oğuz GÜNBAZ<sup>1,\*</sup>  M. Timur AYDEMİR<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Gazi University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering,,06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, analog circuit design for the precision reading circuit of the tactical grade accelerometer is presented. Quartz accelerometer is modeled mathematically by dividing its structure into subunits. Optimal circuit structure has been reached within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype which has been tested in the laboratory environment. The production and design objectives have been evaluated by comparing the measurements and simulation results.

### Article Info:

Research article  
Received: 13/05/2019  
Revision 18/05/2019  
Accepted: 06/08/2019

### Highlights

- IMU
- Tactical Grade
- Matlab-Simulink

### Keywords

Accelerometer  
Capacitive Sensors  
PWM

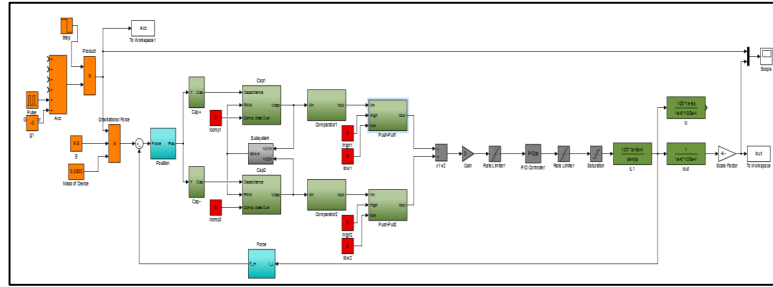


Figure A. MATLAB/SIMULINK model of the proposed circuit

**Purpose:** In this work, different types of accelerometer structures have been reviewed. Literature has been searched and key points of analog circuits were re-optimized. A new read out circuit is proposed for better accuracy. The implemented circuit have been tested in three different ways to improve it is employable in tactical areas.

**Theory and Methods:** A new read-out circuit is explained in detail. It has been modeled on MATLAB/SIMULINK. Firstly, the circuit topology has been studied, and then the model has been transferred to the simulation environment. After revisions, the final simulation model have been implemented. The implemented circuit has been tested in three different ways which are used for qualification of accelerometer sensors to improve their employability in tactical areas.

**Results:** According to the test results, the implemented closed loop accelerometer has 0.369 mg bias error. After this results the accelerometer has been placed into different test environments and the results prove that it is usable from -40 °C to +71 °C and its bias instability is 0.002 mg/√Hz according to Allan Variance test. The simulation and experimental results are presented and compared in Section 4.

**Conclusion:** In this paper, a high performance capacitive closed loop analog accelerometer reading circuit is presented. Modeling of complex systems is an important part of the design process in order to comprehend the behavior of the system. Optimal circuit structure has been reached in the work conducted within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype In the light of the results of the tests, it was found that the developed accelerometer reading card produces output to meet the technical requirements of a tactical / navigation level quartz accelerometer.



## Kuvars İvmeölçer Kapalı Döngü Analog Okuma Devresi

M. Oğuz GÜNBAZ<sup>1,\*</sup> M. Timur AYDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada taktik seviye kuvars ivmeölçerlerin hassas okuma devreleri için analog devre tasarımı yapılmıştır. Kuvars ivmeölçer yapısı alt birimlerine ayrılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Hazırlanan modelleme üzerindeki parametre değişimlerinin sonuçlarını gözlemlemek üzere model MATLAB-SIMULINK ortamına aktarılmıştır. Literatürde önceden yapılan çalışmalar ışığında açık ve kapalı döngü devre modelleri üzerinde durulmuş ayrıca gerilim frekans dönüşümü ya da  $\Sigma$ - $\Delta$  dönüşümü gibi pek çok tasarım modeli üzerinde çalışılarak, ideal tasarım oluşturulmuştur. Oluşturulan benzetimin gerçek koşullara uygun olması amacıyla bileşenlerin ve diğer gürültü oluşturabilecek kaynakların etkileri benzetime yansıtılmıştır. Bu model kapsamında yapılan çalışmalarda optimal devre yapısına ulaşılmış ve bu devre prototipe aktarılıp gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan modeller ışığında devre yapısının nihai hali ortaya çıkarılmış ve bu yapı önce şematiğe ardından baskı devre kartı üzerinde hayata geçirilmiştir. Gerçeklenen okuma devresi laboratuvar ortamında çeşitli test düzeneklerinde denenmiş ve parametreleri çıkarılmıştır. Elde edilen ölçümler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış, üretim ve tasarım hedeflerinin uyumluluğu değerlendirilmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 13/05/2019  
Düzeltilme: 18/05/2019  
Kabul: 06/08/2019

### Anahtar Kelimeler

İvmeölçer  
Kapasitif Sensörler  
PWM

### Keywords

Accelerometer  
Capacitive Sensors  
PWM

## Quartz Accelerometer Closed Loop Analog Readout Circuit

### Abstract

In this paper, an analog circuit design for the precision reading circuit of the tactical grade accelerometer is presented. Quartz accelerometer is modeled mathematically by dividing its structure into subunits. This model has been transferred to MATLAB-SIMULINK environment to observe the effects of some parameter changes on the model. In the light of the studies that exist in literature, open and closed loop circuit models are emphasized and the ideal design has been formed by working on many design models such as voltage frequency conversion or  $\Sigma$ - $\Delta$  transformation. The effects of the components and other sources of noise are taken into account in the simulation in order to ensure that the simulation is compatible with the actual conditions. Optimal circuit structure has been reached in the studies conducted within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype. In the light of prepared models, the final structure of the circuit is revealed and this structure is first implemented on the schematic and then on the printed circuit board. In the laboratory environment, the test circuit is tried and tested. By comparing the obtained measurements and simulation results, the comparison of production and design objectives are evaluated.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

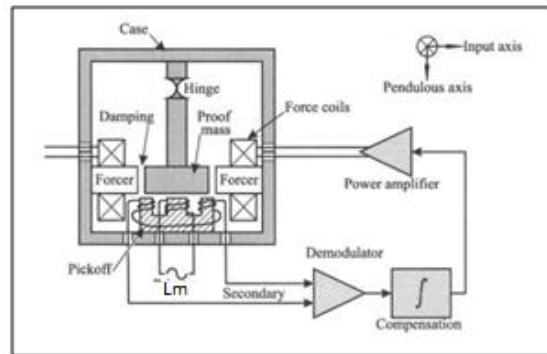
Kapasitif ölçüm sisteminde sabit elektrotlar arasında hareketli zar şeklinde özel üretim teknikleri ile işlenmiş bir yapı bulunur. Bu yapı için genellikle kuvars (quartz), adı verilen kristal yapıli maddeler kullanılır. Yapının ivmeye maruz kalması sonucunda ivme ile ters yönde hareketlenen kuvars plaka kapasitanslarda değişime neden olur. Bu kapasitanslarda meydana gelen değişim hassas ölçüm metotlarıyla ölçülerek ivme verisine çevrilir. Taktik seviye askeri ölçümlerde kullanılmak üzere genellikle en hassas ölçüm metodu olan kapasitif ölçüm metodu kullanılır. Yüksek gerilim hassasiyeti, uzun vadede ölçümlerde sapma olmaması, sıcaklığa bağlı olarak fazla sapma göstermemesi ve düşük gürültü yapısı gibi ilerleyen bölümlerde üstünde duracağımız pek çok sebep bu ölçüm tarzının taktik uygulamalarda tercih edilmesine neden gösterilebilir. Tüm bu sebeplerden ötürü bu makalede de ivmeölçerin amacı doğrultusunda yüksek

çözünürlük, düşük ortam gürültüsü, geniş bant genişliği ve dinamik sistem gereksinimlerinden dolayı kapasitif ölçüm metodu kullanılmıştır. Kapasitif ivmeölçerler meydana gelen kapasitans değişimini ölçmek ve anlamlandırmak için hassas kapasitans okuma devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Okuma elektronigi ve hassas kuartz işleme süreçleri açısından oldukça karmaşık gibi görünen bir üretim süreci olsa da tasarımın oturması sonrasında yüksek güvenilirlikte hassas ivmeölçerler üretilebilmektedir. Hem elektronik hem de mekanik bir çok bileşenden meydana gelmesi dolayısıyla performans açısından optimal tasarıma ulaşmak pek çok etkene bağlıdır. Optimal tasarım için oldukça farklı çalışmalar yapılmış [1], [2], [3] ve hali hazırda yapılmaktadır. Bu makalede de taktik seviye kullanımlar için kapasitif sensör okuma devresi tasarımı sunulmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kapasitif ivmeölçerlerin çalışma prensibi genel hatlarıyla anlatılmıştır. Üçüncü bölümde anlatılan prensiplerin modele aktarılması üzerinde durulmuştur. Oluşturulan modelleme üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan sonuçların değerlendirildiği dördüncü bölümde, modelden yola çıkılarak üretilen prototip de ayrıca yer verilmiştir. Son olarak beşinci bölümde de elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. KAPASİTİF İVMEÖLÇER KURAMI (CAPACITIVE ACCELEROMETER THEORY)

Sensör teknolojilerinde, sensörün okuma devresinin genel performans etkisi yadsınamaz. Literatür çalışmalarında karşımıza en sık çıkan ivmeölçer elektronik okuma devreleri genelde üç temel yapı üstüne geliştirilmiştir [4]. Bu okuma devrelerinin ilki gerilim yükselticili ac-köprü yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada aralarında  $180^\circ$  faz farkı olan iki darbe sinyali kapasitanslara uygulanır ve kapasitanslar arasındaki fark ölçülmeye çalışılır. Basit bir konfigürasyona sahip olsa da gürültü bakımından taktik uygulamalar için azami gürültü sınırlarının içine dahil edilememektedir. İkinci olarak karşımıza çıkan diğer bir yöntem transempedans yükseltici modelidir. Bu yöntemde de kapasitanslara aralarında  $180^\circ$  faz farkı olan iki sinüs sinyali uygulanmakta ve yükselteç arasında rezistif bir devre elemanı ile geri bildirim sağlanmaktadır. Çeşitli avantajları olsa da istenen bant genişliğinin sınırlı olmasında dolayı taktik uygulamalarda tercih edilmemektedir. Üçüncü ve yaygın kullanım olarak da genelde tercih edilen kapasitör anahtarlamalı devreler kullanılmaktadır. Bu yöntemde ayrı polaritelerle şarj edilmiş iki adet kapasitör kapasitans değişimleri kıyaslanıp entegrali alınıp çıkışa verilerek ivme verisi ölçülmektedir. Bu makalede ele alınan okuma metodu birçok açıdan kapasitör anahtarlamalı devreler ile benzerlik gösterse de devre yapısı oldukça farklıdır. Kapasitör şarj devresi literatür açısından oldukça farklı ve efektif bir çözüm getirmiştir. Bu devre modelinin özellikle yer kısıtı olan ivmeölçer okuma devreleri için optimal bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir. Kapasitanslardan okunan kapasitans değerlerinin işlenip anlamlı verilere dönüşmesi için de literatürde daha önce kullanılmış Gerilim-Frekans Dönüşüm Metodu kullanılmıştır [5].

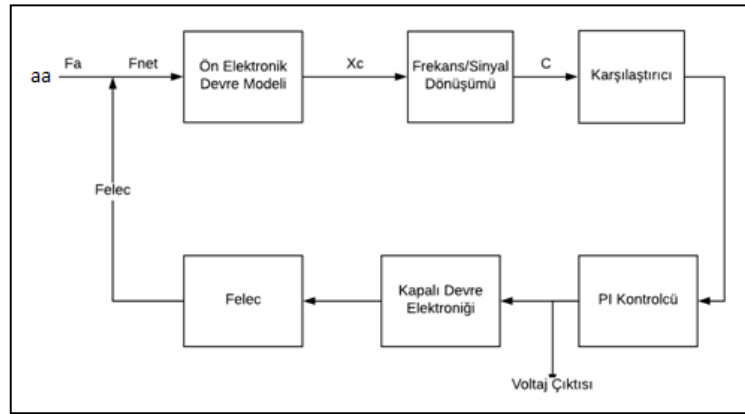


Şekil 1. Kuvars İvmeölçer Genel Çalışma Prensibi

İvmeölçer modelinin sabit olan alt ve üst plaka arasında, tek taraftan tutturulan ama aşağıya ve yukarıya eğilen kuvars plaka vardır. Kuvars plaka ile üst ve alt plaka arasında kapasitans oluşur ( $C1$ ,  $C2$ ). Sensör ivme ekseninden ivme gördüğünde kuvars ivmenin yönüne göre aşağıya veya yukarıya doğru eder ve hareket yönüne göre kapasitansların biri azalırken diğeri artar. Bu artış ve azalma sırasında meydana gelen polarizasyon elektrik sinyallerine dönüştürülerek işlenir ve aralarında oluşan farka göre bir akım verisi elde edilir Elektronik devre de bu kapasitans değişimini ölçerek ona göre bobinlerin ( $Lm$ ) üzerinden geçen akımı değiştirir ve kuvarası tekrar orta noktaya almaya (kapasitansları eşitlemeye) çalışır [6]. İvme ne kadar

yüksekse  $L_m$  üzerinden de o kadar çok akım geçer.  $L_m$  üzerinden geçen akım sensör tarafından analog ivme verisi olarak verilir.

Bu yapı Kapalı Devre İvmeölçer Modeli olarak adlandırılır. Literatürdeki birçok örnekte olduğu gibi [1], [2], [3], kapalı devre bir ivmeölçer, temel olarak sismik kütle hareketini belli bir noktada sınırlar, ki bu genellikle referans pozisyonudur. Bu yapıda sismik kütle denge noktasında sabit tutulması için devreye uygulanan akımı ölçmek temel amaçtır. Sismik kütle denge noktasında tutulması için gereken akım uygulanan ivmenin derecesine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Bu akımın ölçülmesi bize iki kapasitansın farkları arasındaki değeri dolaylı olarak vermektedir. Kapalı devre akımı indüktörler üzerinden geçip kuvars plakayı denge noktasına getirdikten sonra yine akım olarak sensör dışında bulunan hassas dirençler üzerinden gerilim verisine dönüştürülür. Bu veriler bize kapasitörleri dengelemek ve aynı zamanda da kapasitanslar arasında oluşan kapasitans farkı hakkında bilgi verir [7].



Şekil 2. Kuvars İvmeölçer Blok Diyagramı

Şekil 2'de 'aa' ile sistemin maruz kaldığı ivme, ' $F_a$ ' sismik kütle denge noktasında sabit tutulması için devreye uygulanan akımı ölçmek temel amaçtır. Sismik kütle denge noktasında tutulması için gereken akım uygulanan ivmenin derecesine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Bu akımın ölçülmesi bize iki kapasitansın farkları arasındaki değeri dolaylı olarak vermektedir. Kapalı devre akımı indüktörler üzerinden geçip kuvars plakayı denge noktasına getirdikten sonra yine akım olarak sensör dışında bulunan hassas dirençler üzerinden gerilim verisine dönüştürülür. Bu veriler bize kapasitörleri dengelemek ve aynı zamanda da kapasitanslar arasında oluşan kapasitans farkı hakkında bilgi verir [7].

$$\vec{F}_{elec} = L \times (\vec{I} \times \vec{B}) \quad 1$$

$$\frac{dC_p}{dx} = + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} \quad 2$$

$$\frac{dC_p}{dx} = + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} \quad 3$$

$$\frac{dC_n}{dx} = - \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} + x)^2} \quad 4$$

Yukarıda bahsedilen sismik kütle ve üst plaka arasında meydana gelen kapasitans ( $dC_p$ ) ve alt plaka arasında meydana gelen kapasitans ( $dC_n$ ) değerlerindeki değişim 2 ve 3 numaralı denklemlerde verilmiştir. Bu denklemlerde  $\epsilon$  boş uzayın elektriksel geçirgenliğini,  $A_{tot}$  plakaların alanını ve  $d_{gap}$  sabit halde plaka ile sismik kütle arasındaki boşluğu ifade etmektedir. Bu denklemlerden yola çıktığımızda sensörler için en önemli olan hassasiyet derecesine aşağıdaki denklem ile ulaşılabilir:

$$\frac{d\Delta C}{dx} = \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} + x)^2} \quad 5$$

Kapalı devrelerin açık devreye oranla en büyük farkı ve tercih edilmesinin sebebi hassasiyet oranlarının oldukça yüksek olması. Bunun en büyük sebebi de 4'üncü denklemde görüldüğü üzere sismik kütle denge noktasında sabit tutulması için devreye uygulanan akımı ölçmek temel amaçtır. Sismik kütle denge noktasında tutulması için gereken akım uygulanan ivmenin derecesine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Bu akımın ölçülmesi bize iki kapasitansın farkları arasındaki değeri dolaylı olarak vermektedir. Kapalı devre akımı indüktörler üzerinden geçip kuvars plakayı denge noktasına getirdikten sonra yine akım olarak sensör dışında bulunan hassas dirençler üzerinden gerilim verisine dönüştürülür. Bu veriler bize kapasitörleri dengelemek ve aynı zamanda da kapasitanslar arasında oluşan kapasitans farkı hakkında bilgi verir [7].

$d\Delta C/dx$  tüm kapalı devre çalışması sırasında sabit olarak alınabilir. Bu yaklaşım sayesinde kullanılan kapalı devre kapasitif okuma devreleri doğrusal olarak kabul edilebilir.

Kapalı devre kontrol döngüsü en yaygın tanımıyla kontrol edilen değişkenin sürekli olarak monitör edilmesi ve referans alındığı değerle sürekli olarak karşılaştırılması sürecine dayanır. Bu karşılaştırma sonucu her döngüde karşılaştırıldığı referansa yaklaşmak için adaptasyona uğrar. Bu şekilde kontrol eden değişkenin kendini etkilemesi sonucu devam eden kapalı bir işlem döngüsü ardı sıra gerçekleşir. Orantılı integral kapalı devre kontrolcüsü sayesinde referans alınan değerlere kolayca ulaşılabilir, sistemin referans sinyalinde meydana gelen sık değişikliklere hızlı cevap vermesi ve sabit durum hatalarını sıfırlanması sağlanabilir. Kontrol sisteminin ileride meydana gelebilecek hataları kestirip müdahale etmesi sensör uygulamalarında tercih edilen bir yöntem değildir. Bu amaçla sistemde türev kontrolüne başvurulmamıştır.

Kuvars ivmeölçer sisteminin çalışma hassasiyeti ve çözünürlüğü mekanik ve elektronik gürültü kaynakları olarak iki ana başlıkta incelenen gürültü kaynaklarına bağlıdır. Mekanik gürültü kaynaklarının başında temel olarak sistemin frekansına, sıcaklığa ve sismik kütleyle bağlı, "Brownian Gürültüsü" gelmektedir. Brownian Gürültüsü, en önemli mekanik gürültü kaynağı olmasına rağmen elektronik gürültünün yanında etkisi önemsiz olacaktır ve bu tasarımın içine dahil olmadığı için göz ardı edilmiştir.

İvmeölçer elektroniğinde sistemin genel performansını belirleyecek bir çok elektriksel gürültü kaynağı mevcuttur. Bu gürültü kaynakları genellikle bileşenlerin ısı ile değişiminden ve analog sinyalleri işleyip kare dalga sinyallerine dönüştüren arabirimlerde meydana gelen hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu hataların etkisi işlemsel yükselteç ve kıyaslayıcı entegrelerinde karşımıza sıkça çıkan ofset gerilimi, ortak mod bastırma oranı (CMMR),  $V_{hyst}$ ,  $V_{ref}$  vb. gibi değerler olarak sıralanabilir. Histerezis gürültüsü simülasyona belirsizlik olarak eklenmiştir. Brownian Gürültüsü ( $k_b$ : Boltzman sabiti, T: Sıcaklık,  $b$ : Bant genişliği), CMMR ( $A_D$ : diferansiyel kazanç,  $A_{CM}$ : ortak mod kazanç), ve  $V_{offset}$  gürültü kaynaklarının modellenmesinde kullanılan formüller aşağıda verilmiştir:

$$a_n^2 = \frac{4k_b T b}{9.81^2 m^2} \quad 6$$

$$CMMR(db) = 20 \log_{10} \left( \frac{A_D}{A_{CM}} \right) \quad 7$$

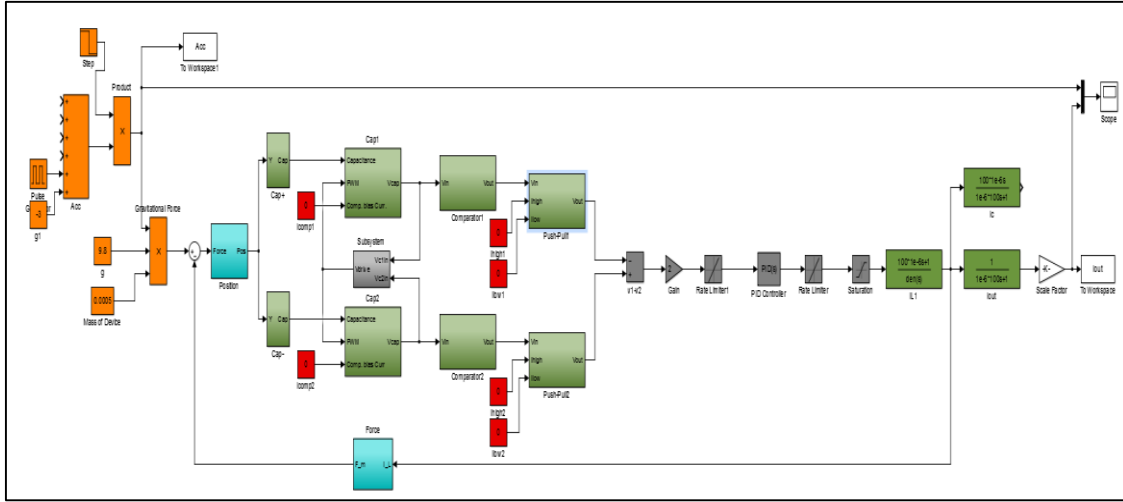
$$V_{Tot} = V_+ + V_{offset} \quad 8$$

### 3. KAPASİTİF İVMEÖLÇER MATLAB/SİMULİNK MODELLEMESİ (CAPACITIVE ACCELEROMETER MATLAB/SIMULINK MODELLING)

Kompleks sistemlerin modellenmesi sistemin davranışının kavramak açısından tasarım aşamasında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. İvmeölçer de bu açıdan değerlendirildiğinde modellenmesi gereken oldukça çok değişkene bağlı bir sistemdir. Temel işlevlerini modele doğru uygulamak için mekanik kuvars bölüm, sensör okuma bölümü, kontrolcü bölümü, sürücü bölümü ve geri bildirim bölümlerinin uygulanması gerekmektedir. İvme verisinin elde edilmesi için sensörden çıkan geri bildirim akımını da okuyup ileten elektronik devreler bulunmaktadır ama bu makale kapsamında o bölüm modelde ele alınmamaktadır. Sensör tasarımı tamamıyla analog elektronik tasarım prensiplerine dayanmaktadır ve herhangi bir kod ya da algoritma barındırmaktadır.

Sistem dinamiğinin kararlı yapıda olması sistem açısından önem taşımaktadır, bu nedenle sistemin kapatılıp geri bildirim sağlanan bölüm parametrelerinin belirlenmesi üzerinde ayrıca durulmaktadır. Sistemin mekanik bir bileşeni olan kuvars, ölçüm işini yapan plakaların olduğu bölümdür. Bu bölümün mekanik üretim kalitesi sensörün kalitesini ve hassasiyetini belirleyen en önemli faktördür. Bu bölüm, uzun zaman önce üretilmiş ve hali hazırda sınırları, kapasitesi ve kalitesi belli olduğu için simülasyonda herhangi bir gürültü unsuru teşkil etmeyeceği varsayılmıştır. Mekanik olarak daha basit modele karşılık bu makale kapsamında asıl ele alınan elektronik modelde simülasyonlar olabilecek en gerçeğe uygun model bloklarından oluşturulmaya çalışılmıştır.





Şekil 3. İvmeölçer MATLAB/SIMULINK üst modeli

Kuvars sensörün mekanik performansı, beyaz gürültü, ölçeklendirme, olası hata oranı veya kararlılık faktörü gibi bazı alt sınıflara ayrılarak modellenilebilir. Bu makale kapsamında sistemin sadece beyaz gürültü performansı simülasyonda ele alınmaktadır. Bunun dışında kalan mekanik gürültü kaynaklarının etkisi beyaz gürültünün etkisiyle kıyaslanamayacak oranda küçük oldukları için simülasyona dahil edilmemiştir. Simulatörün gürültü özelliklerinin modellenmesinde, [1], [2] ve [3] 'den daha detaylı bir yaklaşım uygulanmıştır. [1], [2] ve [3] 'de modellenen sistemler kuvars sensörler ve tamamen analog devre yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, gürültü kaynakları modele girdi olarak eklenmiş, hesaplanmış ve modellenmiştir. Giriş gürültüsü kaynakları ve sistem dinamiği, çıkış gürültüsü performansını etkilemiştir. Devre yapısı ve modelleme yaklaşımı, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalardan ayrılan en önemli özelliğidir.

İvmeölçer gürültü performansını etkileyen hususlar detaylı olarak ele alınmıştır. Simülasyonda gürültü blokları olarak eklenecek 6 önemli gürültü kaynağı belirlenmiştir: Bunlar sırasıyla elektronik bileşenlerin gerilim gürültüsü, akım gürültüsü, dirençlerin termal gürültüsü, histerezis, CMMR, besleme gerilimi baskılama oranı (SVR) , gecikme süresi ve kuvars bloktan gelen beyaz gürültü kaynaklarıdır. Ayrıca integral alma blokları ve filtreleme blokları gibi gürültü giderme teknikleri simülasyona dahil edilmiştir. Bu kavramlar, gürültü kaynakları ve sistemin çıkış gürültüsü performansı arasındaki ilişkinin analizinde önemli bir rol teşkil etmektedir. Bu konseptlerin modele eklenmesi, kullanıcının tasarım konularını istenen performansa göre şekillendirmesini sağlamıştır.

Şekil 3'de ivmeölçer modeli verilmiştir. Her ne kadar çeşitli ivmeölçer konfigürasyonları olsa da, modelleme tasarımı sektörde en son ve en yaygın kullanılan konfigürasyon olan kapalı döngü sistemine sahip kuvars ivmeölçer formuna dayanmaktadır [8].

Model, kuvars ivmeölçer'in ana parçaları olan alt modeller tarafından oluşturulmuştur: Mekanik Kuvars Sensör Bloğu, Şarj Devresi Bloğu, Karşılaştırıcı ve Sürücü Elektronik Bloğu ve Yük Transfer Bloğu olarak gruplanabilir.

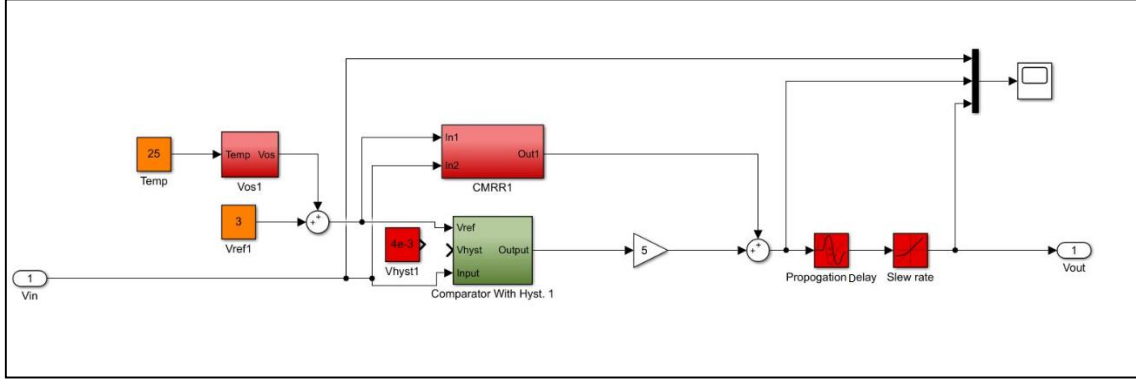
Mekanik kuvars sensör bloğu öncesinde sisteme girdi olarak verilen ivmenin g biriminden değeri belirlenir. Sisteme step, sinüs, kare, rampa gibi girdiler verilebilir. "Gravitational Force" kısmı kuvarsa uygulanan ivmeyi güce çevirmek için kullanılır. Birimi Newton'dur (N). Basitçe  $F=m.a$  formülü uygulanmaktadır. Kuvarsin ağırlığı 0.5g olarak sisteme verilmiştir. Ardından ivmeye göre şekillenecek plakaların pozisyonlarının simgeleyecek pozisyon bloğu gelmektedir. Bu blokta önce kuvarsa uygulanan ivmesel güçten bobinler üzerinden gelen elektriksel itiş gücü çıkarılır. Sonuç olarak kuvarsa uygulanan net güç elde edilir. Sonrasında oluşturulan bloğun çıktısı olarak kuvarsin orta noktasının iki sabit plakanın orta noktasına olan uzaklığı elde edilmektedir.

Plakaların mevcut konumlarından yola çıkarak kapasitans değerlerini ölçmek için, ölçüm ardından kapasitörlerde meydana gelen gerilimi boşaltıp yeniden sürücü sinyal bloğu oluşturulmuştur. Bu



bloğa girdi olarak kapasitörlere uygulanan sürücü gerilimi darbe genişlik modülasyonu PWM, önceki bloklardan çıkan farklı kapasitans değerleri ve bir sonraki aşamanın girdi akımı girilir. Çıkışta ise kapasitör gerilimi elde edilir.  $I_{bias}$  bir sonraki bölümün çektiği akım,  $I_{diyot}$  da diyotun çektiği akımdır.

İki sinyalin referans gerilimlerine ulaşmasıyla üretilen PWM sinyallerinin karşılaştırılması Karşılaştırıcı bloğunda yapılmaktadır. Bu yapı sistemdeki en hassas yapı olması sebebiyle her türlü gürültü faktörü Şekil 3'de görüldüğü üzere simülasyona dahil edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4. Karşılaştırıcı bloğunun modellemesinin detaylı gösterimi

Karşılaştırılan sinyallerin farkları alınıp sistemdeki PI kontrolciye ulaştırılır. 2.Bölüm'de anlatıldığı üzere belirlenen PI parametreleri, PI bloğuna girilmiştir. Kontrolcü bloğunun hızı da ayrıca sistem dinamiğinde teşkil ettiği önemden dolayı bu blokta modellenmiştir.

PI Bloğu'ndan çıkan fark sinyali bize hem iki sinyal arasındaki farkın bilgisini verirken hem de geri besleme döngüsü üzerinden sismik kütleli sıfır pozisyonuna çekecek akımı indüktörlere göndermektedir.  $I_{LM}$  üzerinden geçen akım verisini elde etmek için denklem 9 ile verilen transfer fonksiyonu simülasyon bloğuna girilmiştir. Sismik kütleli sıfır pozisyonuna alınıp bir sonraki döngüye başlamak için  $I_{LM}$  üzerindeki akımın kuvvete dönüştürülmesi gerekmektedir.

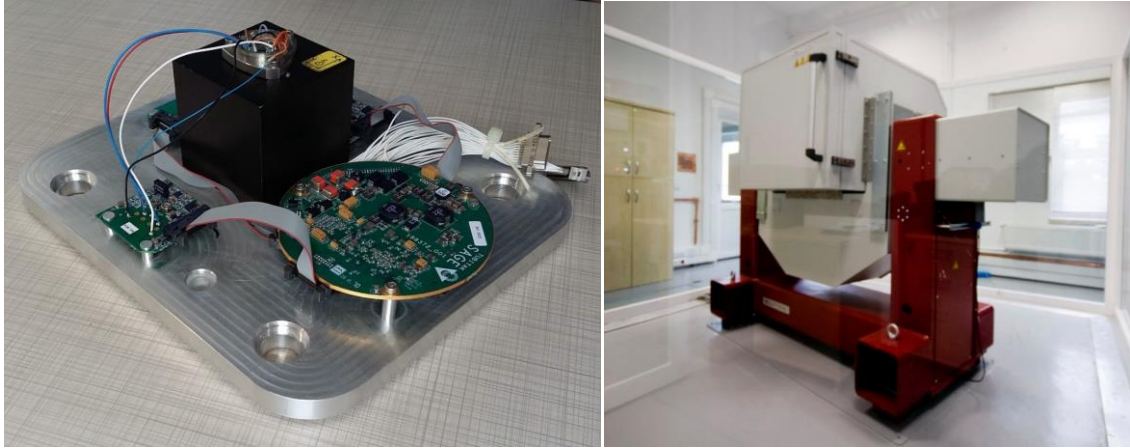
$$I_{LM} = \frac{sRC+1}{s^2LmRC+s(Lm+R*RI*C)+R+RI} \quad 9$$

#### 4. BENZETİM SONUÇLARI VE DEVRENİN GERÇEKLENMESİ (SIMULATION RESULTS AND REALIZATION OF THE CIRCUIT)

Hedeflenen ivmeölçer tasarımının gerçekleşmesi aşamasında karşılaşılabilecek tüm gürültü ve sapma faktörleri bu çalışma kapsamında modellenmeye çalışılmıştır. Bu modelleme kullanılarak tasarımlar gerçekleştirilmeden önce bütün tasarım kriterlerini çıkarmak ve üretim sonucunda ortaya çıkacak ürünün performansı hakkında bilgi sahibi olma imkanı sağlanmıştır.

Modelleme çalışmaları sonrasında gerçekleştirme için model üzerinde onlarca farklı bileşen kombinasyonu denenmiştir. İvmeölçerin çalışma frekansı, gürültü seviyesi, çözünürlüğü ve çalışma aralığı gibi bir çok parametre model üzerinde saptanabilmiştir. Çalışma frekansına devrede kullanılan karşılaştırıcı ve plakaların kapasitans değerleri karar vermektedir. Seçilen karşılaştırıcı entegrelerin 80ns olarak verilen gecikme süreleri özellikle seçilmiştir ki veri karşılaştırıcıdan okunduktan 80ns sonra karşılaştırıcılar sıfırlanmaktadır. Kare sinyaller arasındaki fark bilgisi 80ns'lik kısım okunmaktadır. Bu sayede sistemin 1MHz etrafında değişken sistem frekansı belirlenmiş olmaktadır. İlk prototipini doğrulamak amacıyla aşağıda belirtilen 3 farklı test sırasıyla uygulanmıştır:

- 12 Konum Testi Performans Testi
- Allan Varyans Testi
- -40 °C ila +71°C Aralığında Sıcaklığa Bağlı Kalibrasyon Testi



**Şekil 5.** Test tablası, kartlar ve 3 eksenli benzetimci

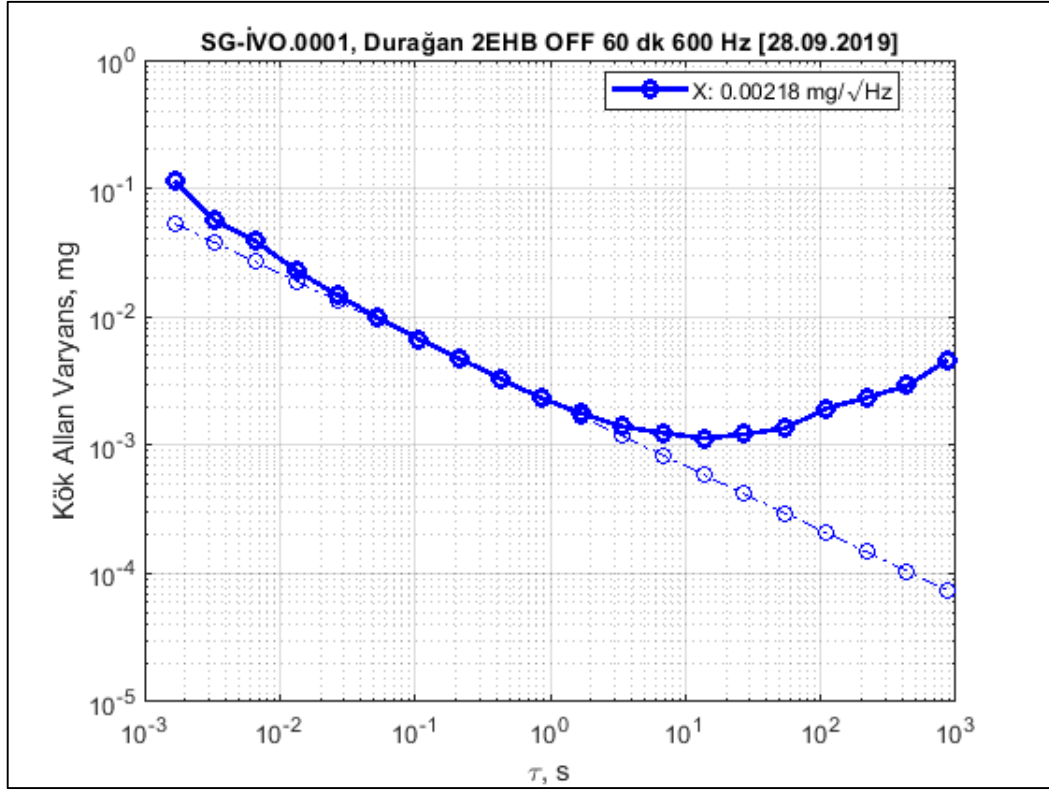
Testlerdeki verilerin MATLAB programında işlenmesi sonucunda SG\_İVO.0001 kartı için ivmeölçer sabit kayma hatası aşağıdaki tablo incelendiğinde sabit kaymanın ortalama değerinin 0.369 mg (< 4 mg) olduğu, tekrarlanabilirlik değerinin ise 0.008 mg (< 0.55 mg) olduğu görülmektedir. Buna göre, koşul değerler aşılmamıştır. İvmeölçer sabit kayma değeri ve tekrarlanabilirlik değeri taktik seviye bir ivmeölçer için yeterlidir. Sabit kayma dışında ölçülen bir değer de eksenlerin birbirini ne kadar etkilediği diğer eksen üzerinde ne kadar gürültü oluşturduğunu anlamamızı sağlayan açı kaymalarıdır. Yapılan testler sonucunda Z eksenin X eksenini üzerinde ( $A_{31}$ ) ve Z eksenin Y eksenini üzerinde ( $A_{32}$ ) oluşturduğu gürültü tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca kapalı devre ölçüm sisteminin orantı katsayısı 1.0252 olarak saptanmış ve ne kadar kalibre edilebilir olduğu hakkında fikir verecek olan orantı katsayısı tekrarlanabilirlik oranı 59.08 ppm olarak kayıtlara geçmiştir. Bu değerler, şu an kullanımda olan diğer taktik seviye ivmeölçerlerin katalog verileri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek hassasiyete sahip bir devre yapısı oluşturulduğunu göstermiştir.

**Tablo 1.** İvmeölçer açı kaymaları (AK)

	AK Değerleri (mrad)	AK Tekrarlanabilirliği (mrad)
	+20 °C	+20 °C
$A_{31}$	2.5728	0.0143
$A_{32}$	-0.3857	0.0146

**Tablo 1.** İvmeölçer orantı katsayısı (OK)

	OK Değerleri	OK Hatası (ppm)
	+20 °C	+20 °C
$A_{11}$	-	-
$A_{22}$	-	-
$A_{33}$	1.02520530	59.08



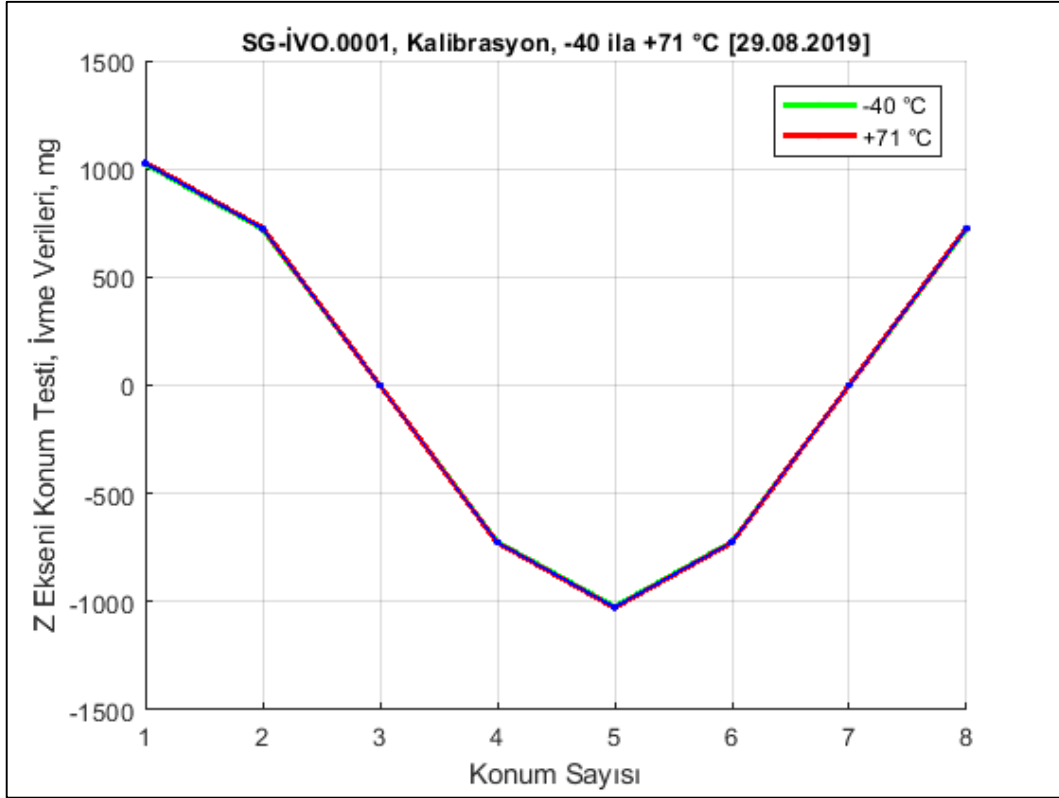
Şekil 6. İvmeölçer Allan Varyans grafiği – VRW 0.002 mg/√Hz

Yukarıda verilen hız rastgele yürüme kararsızlığı (VRW) grafiğinde görüldüğü gibi ivmeölçer elektroniğinin çalışması sırasında süreye bağlı olarak değişen gürültü karakteri oldukça düşüktür (0.002 mg/√Hz). Sabit kayma hatasının zamana yayılmış kararsızlık grafiği Şekil 4.10 'da görüldüğü gibi 2  $\mu$ g olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kapsamında durgun hal analizleri sonucu ivmeölçer elektroniğinin yeterince kararlı performans gösterdiği saptanmıştır.

Askeri ve havacılık uygulamalarında kullanılan elektrikli ve mekanik cihazların, sıcaklık aralığı dahil olmak üzere daha fazla çevresel değişkenliğe dayanması gerekebilir. Şimdiye kadar yapılan testler, oda sıcaklığında ivmeölçer okuma kartının taktik seviye kullanımına uygun olduğunu göstermektedir. Kullanım alanlarının gereği olarak, ivmeölçer okuma kartının yüksek ve düşük sıcaklıklarda doğru veri alıp işleyip iletmesi gerekmektedir.

Yüksek ve düşük sıcaklık testlerinin metodu MİL-STD-810G'den alınan sıcaklık profiline uygun olarak hazırlanmıştır. Bu testin gereği olarak 2 eksenli hareket benzetimcisi önceden  $-40$  °C sıcaklığına set edilmiştir. Kabin sıcaklığı stabil hale geldikten sonra testlere başlanılmıştır. Oluşturulan test senaryosunun süresi 8 saat olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ilk iki saat  $-40$  °C'de koşullandırılmış daha sonra 6 saat boyunca, sıcaklık  $0.33$  °C/dk ile  $-40$  °C'den  $+71$  °C'ye çıkarılmıştır. Bu sırada 2 eksenli hareket benzetimcisi z ekseninde 1G görececek şekilde konumlandırılmıştır. Benzetimci 6 saat boyunca üç eksen için de 8 konum testi 24 kez tekrar edilmiştir.

İvmeölçer okuma kartının oda sıcaklığında sabit kayma ortalama değerinin  $0.369$  mg olduğu, tekrarlanabilirlik değerinin ise  $0.008$  mg olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında yapılan testlerin sınır değerlerin oldukça içinde olduğu gözlemlendikten sonra ise sıcaklık ile kalibrasyon testlerine geçilmiş ve oradaki sonuçların da yine sınır değerler içinde kalması MATLAB/SIMULINK modeline bağlı kalınarak oluşturulan modelin taktik seviye kullanımlar açısından uygun olduğunu göstermiştir.



Şekil 7. Z eksini ivme verisi

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kompleks sistemlerin modellenmesi sistemin davranışının kavramak açısından tasarım aşamasında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Tasarım ve üretim sürecinin oldukça karmaşık, yeni ve maliyetli olması açısından ele aldığımız ivme ölçüm devresi ilk aşamada modellenerek tasarım süreci başlatılmıştır. Bu çalışmada öncelikle sensörün bütün yapısının nasıl çalıştığı analiz edilmiştir. Bu analizlerden yola çıkılarak sensörün okuma bloğu üzerinde kuramsal blok diyagramlar geliştirilmiştir. Bu blok diyagramlar ve kullanılan matematiksel modeller MATLAB/SIMULINK kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan modelin gerçeğe en yakın sonuçları vermesi açısından, gürültü kaynakları, sinyal gecikmeleri, bant genişlikleri gibi yukarıda bahsedilen etkenler modele eklenmiştir. MATLAB/ SIMULINK modelinde yapılan çalışmalar kapsamında sistemin çalışma frekansı, çözünürlüğü ve kullanılacak bileşenler dahil olmak üzere pek çok veri gerçekleştirme aşamasına geçmeden elde edilmiştir. Model üzerinde çalışma olanağı, baskı devre kartta görülecek geri dönüşü olmayan hataları saniyeler içinde bize sunmaktadır. Oluşturulan model sayesinde mekanik yapıda meydana gelecek değişiklikler ya da elektronik bileşenlerde yapılacak değişiklikleri sürekli kontrol etme ve tasarımı ona göre şekillendirme imkanı sağlamaktadır. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması için oluşturulan modelin prototip çalışmaları yapmak, bu çalışma boyunca oluşturulan simülasyon modelinin çalıştığının kanıtlanması açısından oldukça önem teşkil etmiştir. Alınan sonuçlar incelendiğinde hem modelin hem de prototipin tutarlı sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın deneysel uygulamaları için gerekli donanımı sağlayan TÜBİTAK-SAGE'ye teşekkürlerimizi sunarız.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Y. Liang, X. Liu, C. Weiping, Z. Zhou, High resolution interface circuit for closed-loop accelerometer, IEEE Journal of Semiconductors, 32(4), May 2011. 10.1088/1674-4926/32/4/045005
- [2] İ. E. Ocak, H. Kulah, R. Kepenk, T. Akin, A high performance  $\Sigma$ - $\Delta$  Readout circuitry for  $\mu\text{g}$  resolution microaccelerometers» IEEE Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 64(2), 137-145, August 2010, 10.1007/s10470-009-9433-4
- [3] Y. Terzioglu, S. E. Alper, K. Azgin, T. Akin, A capacitive MEMS accelerometer readout with concurrent detection and feedback using discrete components, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, July 2014, 10.1109/PLANS.2014.6851351
- [4] N. Yazdi, H. Kulah, K. Najafi, J. F. Dawson, M. D. Ganley, A. C. Martin, S. J. Porter ve D. W. P. Thomas, Precision readout circuits for capacitive microaccelerometers, IEEE Sensors, p. 28-31, 10.1109/ICSENS.2004.1426091
- [5] J.H. Lu, M. Inerowicz, S. Joo, J. K. Kwon, B. Jung, A Low-Power, Wide-Dynamic-Range Semi-Digital Universal Sensor Readout Circuit Using Pulsewidth Modulation, IEEE Sensors Journal Volume: 11 , Issue: 5 , May 2011 ,10.1109/JSEN.2010.2085430
- [6] O. Kaplan, Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(1): 37-48, 2019 10.29109/gujsc.475869
- [7] J.C Stiles, Quartz Accelerometer, U.S. Patent US3209601A
- [8] J. Soenab, A. Vodab, C. Condeminea, Controller design for a closed-loop micromachined accelerometer, Volume 15, Issue 1, (P)57-68, January 2007, 10.1109/InertialSensors.2016.7745674
- [9] C. M. Philip , "Practical Accelerometer Testing", Royal Aircraft Establishment, December 1998



## Effects of Air Excess Ratio on Combustion and Engine Performance in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine fuelled with Hexane and N-Heptane Fuel Mixtures

Emre YILMAZ 

Sakarya University of Applied Sciences, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 54300, Arifiye/SAKARYA

### Article Info:

Research article

Received: 31/10/2019

Revision 09/12/2019

Accepted: 21/12/2019

### Highlights

- Air Excess Ratio.
- Homogeneous Charge Compression Ignition.
- Emissions.

### Keywords

Air Fuel Ratio  
Homogeneous Charge  
Compression Ignition  
Engine Performance

### Graphical/Tabular Abstract

Homogeneous charge compression ignition engines are engines with low temperature combustion tendency and high thermal efficiency. HCCI combustion is highly affected by engine operating parameters. In this study, a single-cylinder four-stroke spark-ignition engine was converted to a homogeneous charge compression ignition engine. The test engine was operated with hexane and n-heptane fuel mixtures at 1400 rpm and between 1.9 and 2.74 air excess ratio in full load HCCI combustion mode.

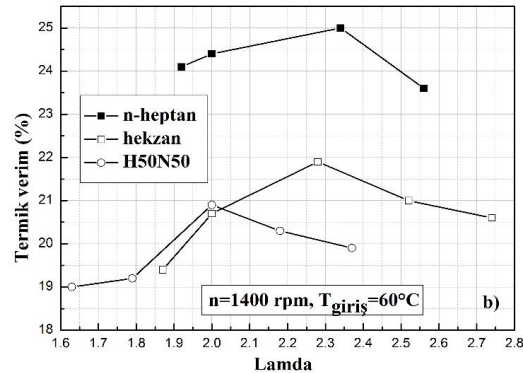


Figure A. Thermal efficiency of the engine for n-heptane and hexane

**Purpose:** The aim of the study is to investigate the effects of air excess ratio on combustion and engine performance in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine powered with hexane and n-heptane fuel mixtures.

**Theory and Methods:** Experimental study was performed on an HCCI engine that was converted from spark ignition (SI) engine. Three pure n-heptane, pur hexane and a fuel blend containing 50% n-neptane and 50% hexane by volume were used as test fuels. Experiments were carried out at constant intake air temperature of 60 °C, engine speed of 1400 rpm for different lambda values. The raw in-cylinder pressure data was processed by a MATLAB code.

**Results:** The results have shown that hexane provided more leaner combustion compared to n-heptane. The maximum air excess value was 2.56 for n-heptane while it was 2.74 for hexane fuel. On the other hand hexane caused a delay on start on combustion due to its higher octane rating. As a result of this combustion phase also retarded. Maximum thermal efficiency was observed with n-heptane as about 25 %.

**Conclusion:** An experimental was carried out to investigate the effects of n-heptane and hexane fuels on combustion, performance and emission characteristics of a homogeneous charged compression ignition engine. High octane rating of the hexane was enhanced the control of the combustion in HCCI engine. In addition to this, hexane provided more leaner combustion than n-heptane. However, high octane rating of the hexane caused a delay on combustion phase and start of the combustion. As a result of this, thermal efficiency of the HCCI engine dropped compared to n-heptane combustion.



GU J Sci, Part C, 8(1): 26-39 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

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

# Hekzan ve N-Heptan Yakıt Karışımları ile Çalışan Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli (HCCI) Bir Motorda Hava Fazlalık Katsayısının Yanma ve Motor Performansı Üzerindeki Etkileri

Emre YILMAZ

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 54300, Arifiye/SAKARYA

## Öz

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar düşük sıcaklık yanma eğilimine ve yüksek termik verime sahip motorlardır. Yanma üzerinde doğrudan kontrolün olmadığı bu motorların çalışma aralığı vuruntu ve tutuşmama problemleri nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Bu noktada silindire alınan karışım kompozisyonu ve farklı çalışma parametreleri ile özellikle yüksek yüklerde vuruntu probleminin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

HCCI yanması motor çalışma parametrelerinden oldukça etkilenmektedir. Bu çalışmada tek silindirli dört zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motor homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motora dönüştürülmüştür. Deney motoru hekzan ve n-heptan yakıt karışımları ile 1400 d/d'da, 1.9 ile 2.74 hava fazlalık katsayısı (HFK) değerleri arasında, tam yükte HCCI yanma modunda çalıştırılmıştır. Hekzan yakıtının silindir basıncı, ısı dağılımı, silindir içi sıcaklık, yanma süresi, yanma başlangıcı, çevrimsel farklılıklar, vuruntu yoğunluğu, indike ortalama efektif basınç (imep), termik verim ve emisyonlar (HC ve CO) üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sabit emme havası giriş sıcaklığında yapılan deneylerde hava fazlalığı arttıkça silindir basıncının genişletilebileceği görülmüştür.

## Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi**Başvuru: 31/10/2019**Düzeltilme: 09/12/2019**Kabul: 21/12/2019*

## Anahtar Kelimeler

*Hava Yakıt Oranı**Homojen Dolgulu**Sıkıştırma ile Ateşlemeli**Motor Performansı*

## Keywords

*Air Fuel Ratio**Homogeneous Charge**Compression Ignition**Engine Performance*

## Effects of Air Excess Ratio on Combustion and Engine Performance in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine fuelled with Hexane and N-Heptane Fuel Mixtures

### Abstract

Homogeneous charge compression ignition engines are engines with low temperature combustion tendency and high thermal efficiency. The operating range of these engines, where there is no direct control over combustion, is limited because of knock and misfire problems. At this point, it is aimed to eliminate the knocking problem especially at high loads with the mixture composition taken into the cylinder and different operating parameters.

HCCI combustion is highly affected by engine operating parameters. In this study, a single-cylinder four-stroke spark-ignition engine was converted to a homogeneous charge compression ignition engine. The test engine was operated with hexane and n-heptane fuel mixtures at 1400 rpm and between 1.9 and 2.74 air excess ratio in full load HCCI combustion mode. The effects of hexane fuel on cylinder pressure, heat release rate, in-cylinder temperature, combustion duration, start of combustion, cyclic variations, knock density, indicated mean effective pressure (imep), thermal efficiency and emissions (HC and CO) were investigated experimentally. In the experiments carried out at constant intake air inlet temperature, it was observed that the cylinder pressure and heat release rate decreased with increasing air excess ratio. As a result, HCCI combustion was found to be highly affected by air excess ratio and fuel composition. It has also been found that the range of operation can be extended in the knock boundary zone in HCCI combustion.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlar üzerinde çalışılan en önemli konulardan biri düşük sıcaklık yanmasıdır. Konvansiyonel çevrimlerde yanma sonu gaz sıcaklığı yükselerek NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda motorların termik verimleri çok fazla arttırılamamaktadır. Sıkıştırma

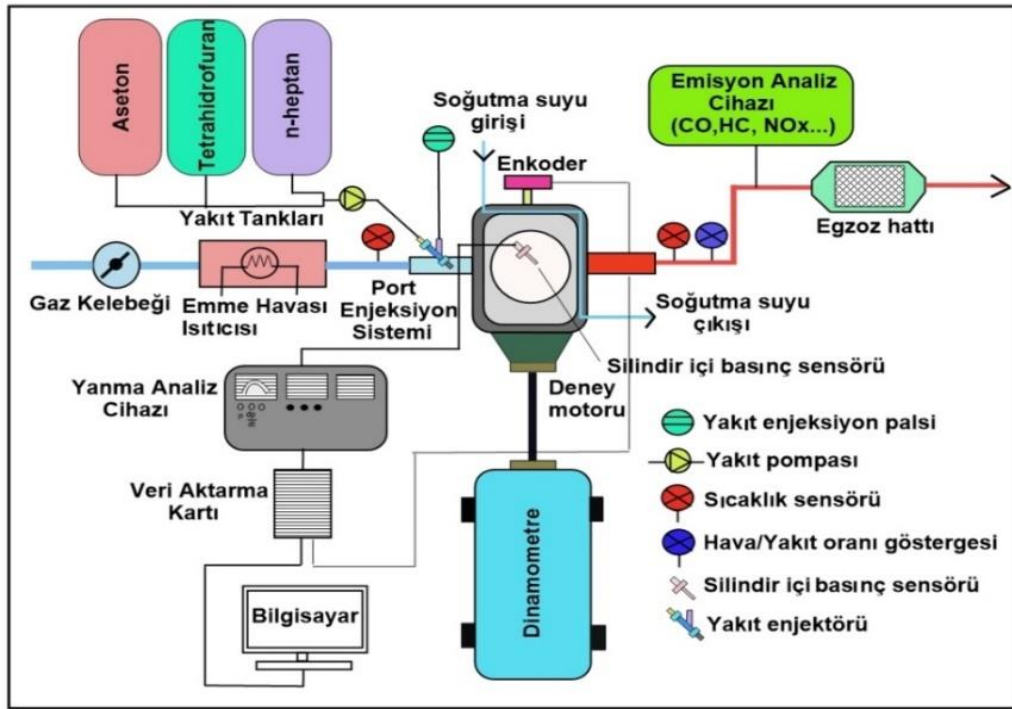
ile ateşlemeli motorlarda özellikle zengin karışımlara doğru  $\text{NO}_x$  ve is emisyonları artış göstermekte, birlikte azaltılamamaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlar stokiyometrik karışım oranlarına yakın hava-yakıt oranlarında çalıştırılmakta termik verimleri düşük sıkıştırma oranlarından dolayı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlara göre azalmaktadır [1-3]. Katalitik konvertör, dizel partikül filtresi gibi egzoz gazlarını indirgeme ve azaltma sistemleri maliyetli ve uygulama açısından sınırlamalar getirdiğinden araştırmacılar düşük sıcaklık yanma modları üzerinde yoğunlaşmaktadırlar. Bu noktada homojen fakir karışımın kendiliğinden tutuşturulması ile meydana gelen homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli yanma (HCCI) büyük ilgi çekmektedir. HCCI yanması fakir homojen karışımın yanma odasının tamamında eş zamanlı tutuşarak kendiliğinden yanması ilkesine dayanmaktadır. Fakir karışımın yanması sonucu yanma sonu gaz sıcaklığı azalmakta, dizel motorlardan kaynaklanan is ve  $\text{NO}_x$  emisyonları eş zamanlı azaltılabilmektedir [2-8]. Yanma odasının genelinde fakir karışımın tamamının oksidasyon reaksiyonlarına iştirak ettirilmesi ile termik verim arttırılabilmektedir. Homojen dolgunun kendiliğinden yanması esnasında ısı dağılımı iki kademe ele alınmaktadır. Bunlar düşük sıcaklık ısı dağılımı ve yüksek sıcaklık ısı dağılımıdır. Bunun yanında kendiliğinden yanma safhasında yanma üzerinde bir kontrol bulunmamaktadır [3-9]. Dolayısı ile kendiliğinden yanma sıkıştırma sonundaki karışımın kompozisyonu ve yanma odası sıcaklığı gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Aşırı fakir karışımlarda ve düşük motor yüklerinde ateşlenememe problemi görülebilmektedir. Benzer şekilde özellikle zengin karışımlarda ve yüksek motor yüklerinde vuruntu görülmektedir. Karışımın aniden ve hızlı bir şekilde yanmasında bağlı olarak basınç artış oranı artmakta ve istenmeyen vuruntu görülmektedir. HCCI yanmasında kontrol edilmesi gereken en önemli noktalardan biri hızlı ısı dağılımına bağlı olarak meydana gelen bu vuruntudur. HCCI motorun geniş yük ve devir aralığında çalışmasını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumun kontrol edilmesi için, egzoz gazı geri dönüşümü (EGR), değişken supap mekanizması, süperşarj, değişken sıkıştırma oranı ve farklı alternatif yakıtların kullanılması gibi bir çok uygulama yapılmaktadır. HCCI yanmasını direkt olarak etkileyen değişkenlerden biri farklı kimyasal özelliklerdeki yakıtlardır. Özellikle oktan sayısı yüksek kendiliğinden tutuşma temayülü düşük yakıtlar ile hızlı ısı dağılımı önenebilmekte, HCCI yanması kontrol edilebilmektedir. Bu doğrultuda, oktan sayısı referans yakıtlara göre nispeten yüksek yakıtlar kullanılabilmektedir [4-16]. Uyumaz [17] n-bütanol ve izopropanol yakıtlarının farklı emme giriş sıcaklıklarında HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. 1500 d/d ve  $\lambda=2'$  de yapılan deneylerde izopropanolün n-bütanole göre vuruntuya daha fazla direnç gösterdiğini belirtmiştir. Termik verim açısından n-bütanolün izopropanale göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Çınar ve arkadaşları [18] %20 n-heptan ve %80 izooktan yakıt karışımı ile (RON80) çalışan HCCI bir motorda emme havası giriş sıcaklığının HCCI yanması ve performans üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Emme havası giriş sıcaklığı arttıkça yanmanın avansa alındığını, yanma süresinin azaldığını ifade etmişlerdir. Çınar ve arkadaşları bir başka çalışmada [19] farklı değişken kam mekanizmaların HCCI yanması üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kullanılan dört farklı kam mekanizması ile kararlı HCCI yanması 800-1900 d/d,  $\lambda=0.5-2$  değerleri arasında sağlanmıştır. Düşük supap kalkma miktarına sahip kam mekanizmaları ile HCCI çalışma aralığının genişletilebileceği görülmüştür. Çınar ve arkadaşları [21] art gaz miktarının HCCI yanması üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırmışlardır. 1200 d/d'da emme 5.5-egzoz 3.5 mm kam mekanizması ile indike termik verim emme 3.5-egzoz 3.5 mm kam mekanizmasına göre %17.91 arttığını görmüşlerdir. Uyumaz ve arkadaşları [21] reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda (RCCI) lamdanın yanma üzerindeki etkilerini incelemiştir. RCCI yanması yanma odasına gönderilen yakıtın % 40'ı porttan izooktan, %60'ı direkt silindire n-heptan püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Lamda arttıkça termik verim artmış, özgül yakıt tüketimim azalmıştır. Aynı zamanda karışım fakirleştikçe çevrimsel farklılıkların arttığını görmüşlerdir. Polat ve arkadaşları [22] n-heptan yakıtı ile çalışan HCCI bir motorda enjeksiyon zamanlamasının HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Enjeksiyon avansa alındığında maksimum silindir basıncı artmış ve yanma avansa alınmıştır. Aynı zamanda yakıt üst ölü noktaya (ÜÖN) yakın püskürtüldüğünde tek kademe HCCI yanmasının olduğunu görmüşlerdir. Uyumaz ve Solmaz [23] emme havası giriş sıcaklığı ve ön karışım yakıt oranının RCCI yanması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Benzinli motor 1000 d/d'da 40°C, 60°C ve 80°C emme havası giriş sıcaklıklarında PRF20, PRF40ve PRF 60 yakıtları ile RCCI modda çalıştırılmıştır. 60°C emme giriş havası sıcaklığında maksimum indike termik verimin PRF20 yakıtına göre PRF60 yakıtı ile %7.4 arttığını görmüşlerdir. Uyumaz ve Çınar [24] düşük supap kalkma miktarına sahip kam mekanizmaları ile art gaz miktarının HCCI yanması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Emme 5.5-Egzoz 3.5 mm kam mekanizması ile HCCI motorun vuruntudan ve ateşlenememe bölgelerinden uzak çalıştırılabildiğini görmüşlerdir.



Bu çalışmada heksan ve n-heptan yakıtı ve %50-50 karışımları ile tam yükte, 1400 d/d'da çalışan HCCI bir motorda hava fazlalık katsayısının yanma, motor performansı ve CO-HC emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla tek silindirli, dört zamanlı benzinli bir motor HCCI motora dönüştürülmüştür. N-heptan yakıtına heksan ilavesi ile silindir basıncı, ısı dağılımı, yanma süresi, indike ortalama efektif basınç (imep), termik verim, çevrimsel farklılıkların değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

Heksan yakıtının HCCI yanması üzerindeki etkilerini görmek için motor deneyleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Deneyler kararlı HCCI yanmasının sağlandığı 1400 d/d'da n-heptan, heksan, ve n-heptan / heksan yakıt karışımı ile (H50N50), sabit 60 °C emme havası giriş sıcaklığında yapılmıştır. Hava fazlalık katsayısı 1.9 ile 2.74 arasında değiştirilmiştir. Deney motoru 6500 d/d'da 30kW güç absorbe edebilen DC dinamometreye bağlanmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Motor devri, motor yükü, yakıt enjeksiyon pulsü, ateşleme, emme havası giriş sıcaklığı, motor yağı sıcaklığı gibi parametreler dinamometre kontrol panelinden değiştirilebilmekte ve kontrol edilmektedir. Hava fazlalık katsayısının belirlenmesi için Bosch marka egzoz gaz analiz cihazından yararlanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği (The experimental setup)

Yanma analizinin yapılabilmesi için yanma odasına bağlı Kistler 6121 marka silindir basınç sensörü kullanılmıştır. Motor devrinin ve üst ölü nokta bilgisi için krank miline bir turda 1000 pals üreten enkoder bağlanmıştır. Silindir içi basınç verileri 0.36° krank açısı aralıklarla ölçülebilmektedir. Alınan silindir içi basınç sinyalleri yanma analiz cihazı ile yükseltilmiş ve National Instrument marka veri aktarım kartına ham veriler aktarılmıştır. Veri aktarım kartı ile analog silindir basınç sinyalleri dijital verilere dönüştürülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Dijital silindir içi basınç sinyalleri Matlab dilinde yazılan bir program ile işlenmiş, ısı dağılımı, yanma safhaları, motor performans parametreleri belirlenmiştir. Bosch marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılarak HC, CO ve hava fazlalık katsayısı değerleri belirlenmiştir. Kullanılan egzoz gaz analiz cihazının özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Deney motorunun teknik özellikleri (Technical features of the test engine)

Model	Ricardo Hydra
Silindir sayısı	1
Çap x Kurs	80,26 x 88,9 mm
Silindir hacmi	0,54 L
Maksimum devir	5400 d/d
Maksimum güç	15 kW
Sıkıştırma oranı	13/1
Supap sistemi	Üstten tek eksantrikli
Supap kalkma miktarı	Emme supabı 5.5mm Egzoz supabı 3.5 mm
Yakıt sistemi	Port tipi yakıt enjeksiyonu

**Tablo 2.** Bosch egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri (Bosch exhaust gas analyzer specifications)

	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO (% vol)	0.000-10.00	0.001
CO2 (% vol)	0.00-18.00	0.01
HC (ppm)	0-9999	1
O2 (% vol)	0.00-22.00	0.001
$\lambda$	0.500-9.999	0.001
NO (ppm vol)	0-5000	$\leq 1$

Isı dağılımı hesabı için Termodinamiğin 1. yasasına dayalı aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda silindir gaz kaçaklarının olmadığı, çevrimde kullanılan gazın ideal gaz olduğu kabulleri yapılmıştır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad 1$$

$dQ$ ,  $dQ_{heat}$  ve  $d\theta$  sırasıyla ısı dağılım oranını, yanma odasından silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı ve krank açısını ifade etmektedir. Deneylerde n-heptan ve hekzan yakıtları kullanılmıştır. Kullanılan yakıtların bazı özellikleri Tablo 3’de verilmektedir. Yapılan deneylerde dört farklı test yakıtı kullanılmıştır. Kullanılan test yakıtları ve karışım yüzdeleri Tablo 4’de görülmektedir.

**Tablo 3.** Deney yakıtlarının bazı özellikleri (Some properties of test fuels)

	n-Hekzan	n-Heptan
Kimyasal formülü	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	659	679.5
Oktan sayısı	36	-
Yanma ısısı(kJ/mol)	4163.2	4817
Kaynama noktası (°C)	69	98
Mol kütlesi (g/mol)	86.17	100.16

**Tablo 4.** Test yakıtları ve karışım yüzdeleri (Test fuels and mixing percentages)

Test yakıtı	Karışım Yüzdeleri
n-heptan	% 100 n-heptan
Hekzan	% 100 hekzan
H50N50	%50 Hekzan/% 50 n-heptan

Vuruntu yoğunluğu maksimum silindir basıncı artış oranı ve motor devrinden etkilenmektedir. Vuruntu yoğunluğu eşitlik (2) ile belirlenmiştir. Bu eşitlikte  $\gamma$  politropik indeksi,  $\frac{dP}{dt}$  maksimum basınç artış oranını  $P_{\max}$  ve  $T_{\max}$  maksimum basınç ve sıcaklıkları göstermektedir.

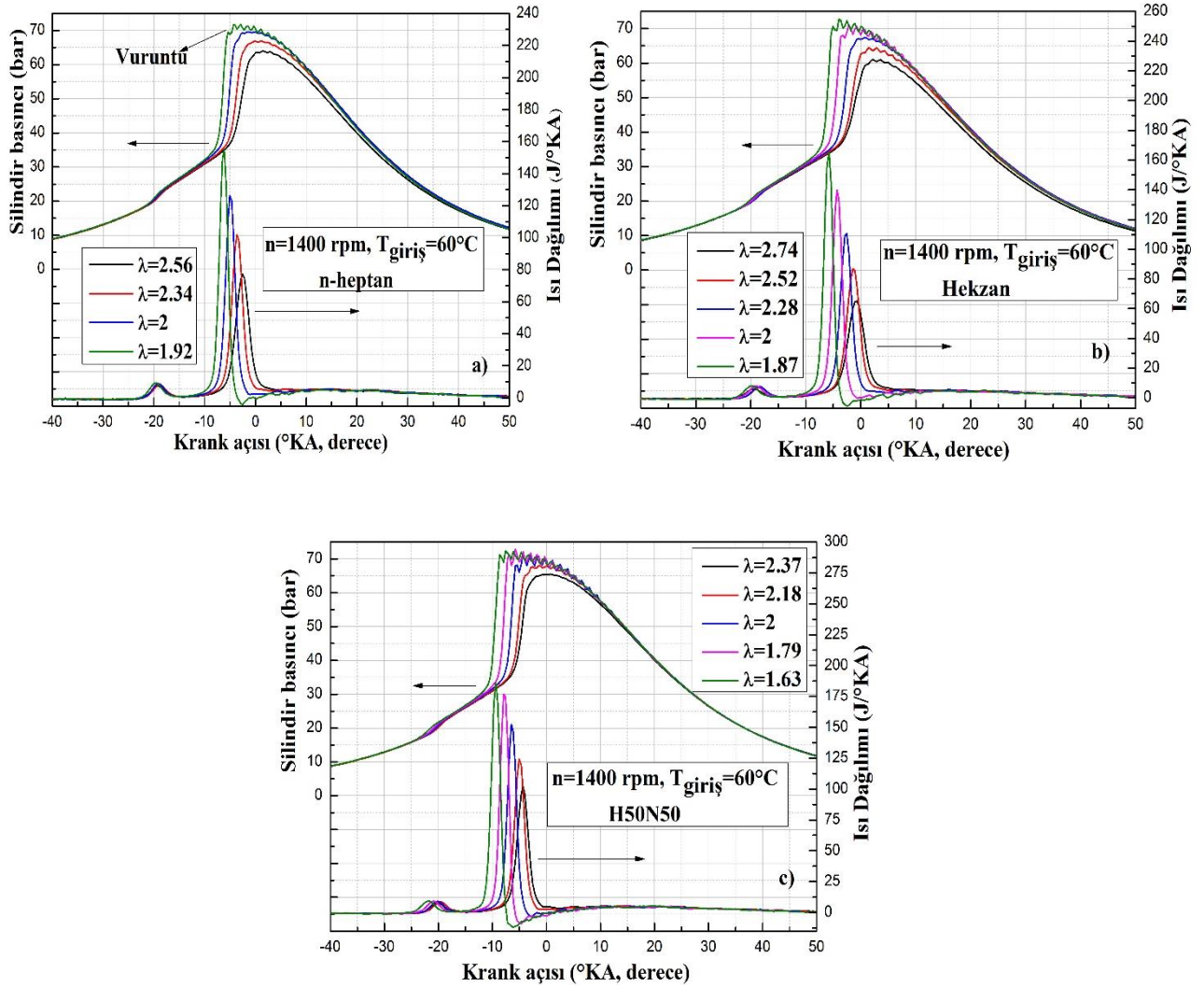
$$RI = \frac{1}{2\gamma} \left( \frac{\beta \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max}}{P_{\max}} \right)^2 \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{\max}} \quad 2$$

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

HCCI yanması sıkıştırma stroku öncesi yanma odası termodinamik durumundan direkt etkilenmektedir. Yakıtın kimyasal özellikleri kendiliğinden tutuşma kabiliyeti oksidasyon reaksiyonlarının seyrini değiştirmektedir. Bu noktada yakıtın oktan sayısı HCCI yanmasında görülen vuruntu problemini azaltmakta aynı zamanda yanma fazının kontrol edilebilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada n-heptan ve hekzan yakıt karışımlarının HCCI yanması üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Şekil 2 heptan ve hekzan yakıt karışımlarının silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Deney motoru HCCI yanma modunda 1400 d/d'da kararlı bir şekilde çalıştırılmıştır. N-heptan ile yapılan deneylerde karışım zenginleştikçe vuruntu eğiliminin arttığı görülmektedir. Tüm test yakıtları için lamda artıkça silindir basıncı ve ısı dağılımı azalmaktadır. Silindire sürülen yakıt enerjisi azaldıkça açığa çıkan ısı miktarı azalmaktadır. Düşük sıcaklık yanması olan HCCI yanmasında iki aşamalı ısı dağılımı görülmektedir. Bunlar düşük sıcaklık yanması ve yüksek sıcaklık yanmasıdır. Düşük sıcaklık yanması yakıt kompozisyonundan oldukça etkilenmektedir. Yüksek sıcaklık yanma reaksiyonları ise yaklaşık 950 K civarında başlamakta ve ana oksidasyon reaksiyonlarını içermektedir [1]. Hekzan yakıtının ilavesi ile vuruntu eğilimi azalmaktadır. Hekzanın oktan sayısının n-heptan yakıtına göre yüksek olması kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarının daha geç oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum meydana gelen hızlı ve ani ısı dağılımının yavaşlamasına neden olmaktadır. Karışım zenginleştikçe yanma odası sıcaklığı artış göstermekte basınç artış oranı yükselmektedir. Sonuçta istenmeyen vuruntu görülmektedir.

HCCI yanmasının seyri yanma başlangıcından etkilenmektedir. Karışım kompozisyonunun zengin olması yanma odasının genelinde eş zamanlı kendiliğinden gerçekleşen kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının hızlı seyretmesine neden olmaktadır. Sonuçta yanma oranı ve silindir içi gaz sıcaklığı artmaktadır. Hekzan yakıtının n-heptan yakıtına ilavesi ve karışımın fakirleştirilmesi ile HCCI yanma fazının kontrol edilebileceği görülmektedir.

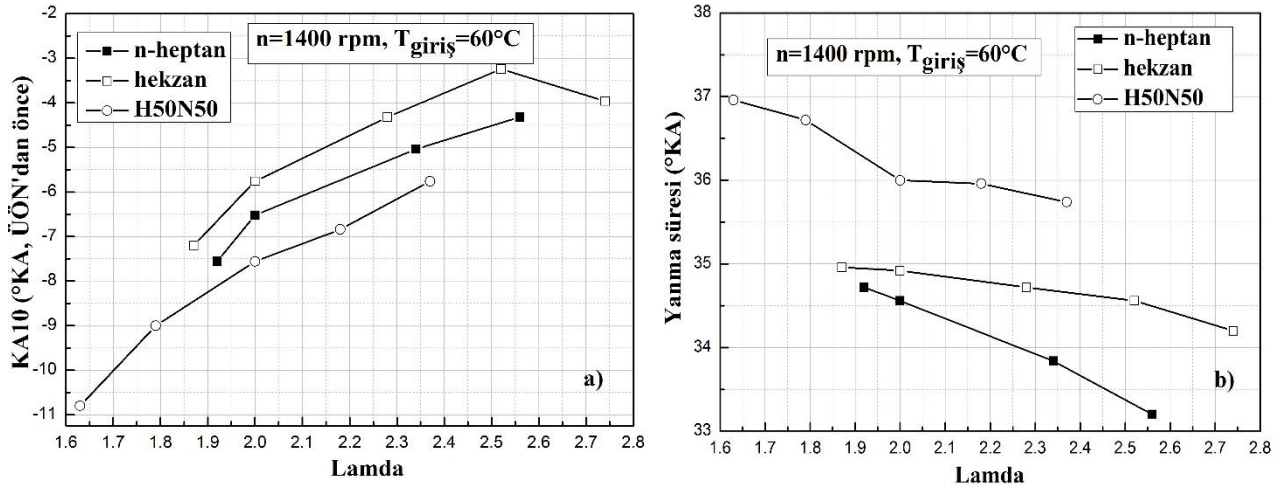
Yapılan çalışmada hava fazlalık katsayısının HCCI yanması üzerindeki etkilerini görmek için yakıt kompozisyonu ve lamda değiştirilmiş, emme havası giriş sıcaklığı 60°C sabitlenmiştir. Lamda arttıkça kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarının rötara alındığı yanmanın geciktiği görülmektedir. Karışım yakıtlardaki hekzan yakıtının oranı artmasına rağmen deney motoru  $\lambda=2.37$ ,  $\lambda=2.50$  gibi yüksek lamda oranlarında 1400 d/d'da kararlı bir şekilde çalıştırılabilmiştir.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı dağılımı değişimi (Change of cylinder pressure and heat release)

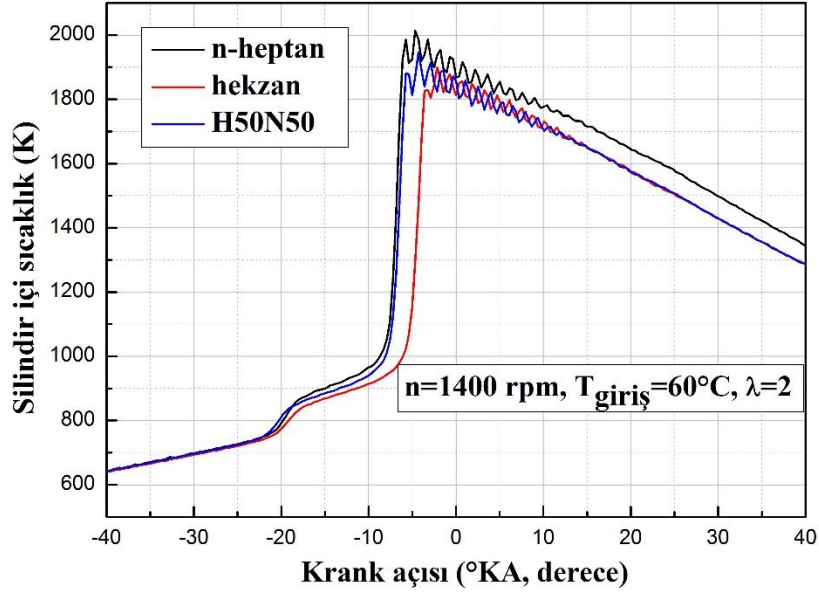
Şekil 3 test yakıtları ile yapılan deneylerde KA10 ve yanma süresinin lamdaya bağlı değişimini göstermektedir. KA10 silindire alınan karışımın %10'unun yanmasını tamamladığı krank açısına karşılık gelmektedir. Literatürde yanma başlangıcı olarak ta ifade edilebilmektedir. Lamda arttıkça tüm test yakıtları için KA10 değerinin ÜÖN'ya yaklaştığı yani yanmanın rötara alındığı görülmektedir. Karışımın fakirleşmesi yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına ve kendiliğinden tutuşmaya başlama şartlarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Yakıt moleküllerinin azalması ve açığa çıkan ısı enerjisinin azalması yanma başlangıcını geciktirmektedir. Hekzan yakıtı ile yüksek oktan sayısından dolayı n-heptan yakıtına göre KA10 değerinin rötara alındığı görülmüştür. N-heptan yakıtına hekzan ilave edilmesi ile yanmanın avansa alındığını ifade etmek mümkündür. Özellikle stokiyometrik orana yakın zengin karışımlarda ( $\lambda=1.63$  ve  $\lambda=1.79$ ) H50N50 ile yanma başlangıcının daha fazla avansa alındığı görülmektedir. Kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının başlayabilmesi için yakıt molekülleri ile oksijen molekülleri daha erken bir araya gelerek yanmanın daha önce başlamasına neden olmaktadır. Yanma analizinde diğer önemli parametre yanma sürecinin ne kadar devam ettiğidir. Şekil 3-b test yakıtları ile yanma süresinin değişimini

göstermektedir. Lamda arttıkça tüm test yakıtları için yanma süresi azalma eğilimi göstermektedir. Minimum yanma süresi düşük vuruntu direncinden dolayı n-heptan yakıtı ile elde edilmiştir. Yakıt karışımlarındaki hekzan oranı arttıkça yanma süresinin uzadığı görülmüştür. Hekzanın n-heptan yakıtına göre yüksek oktan sayısı ve düşük yanma ısısından dolayı toplam yanma süresi artmaktadır. Yanma sonu açığa çıkan daha düşük ısı dağılımı kendiliğinden tutuşma şartlarını kötüleştirir. Bu noktada silindir cidarına yakın yüzeylerde alev yayılım hızı yavaşlamakta ve cidarda yanma gerçekleşmemektedir. Maksimum yanma süresi  $\lambda=1.63$  lamda değerinde H50N50 test yakıtı ile  $36.96$  °KA olarak belirlenmiştir. Karışımın fakirleşmesi yanma sonu gaz sıcaklığının azalmasına ve alevin daha erken sonlandırılmasına neden olmaktadır. Sonuçta yanma süresi kısalmaktadır.



Şekil 3. a) CA10 değişimi ( Change of CA10) b) Yanma süresi değişimi (Change of combustion duration)

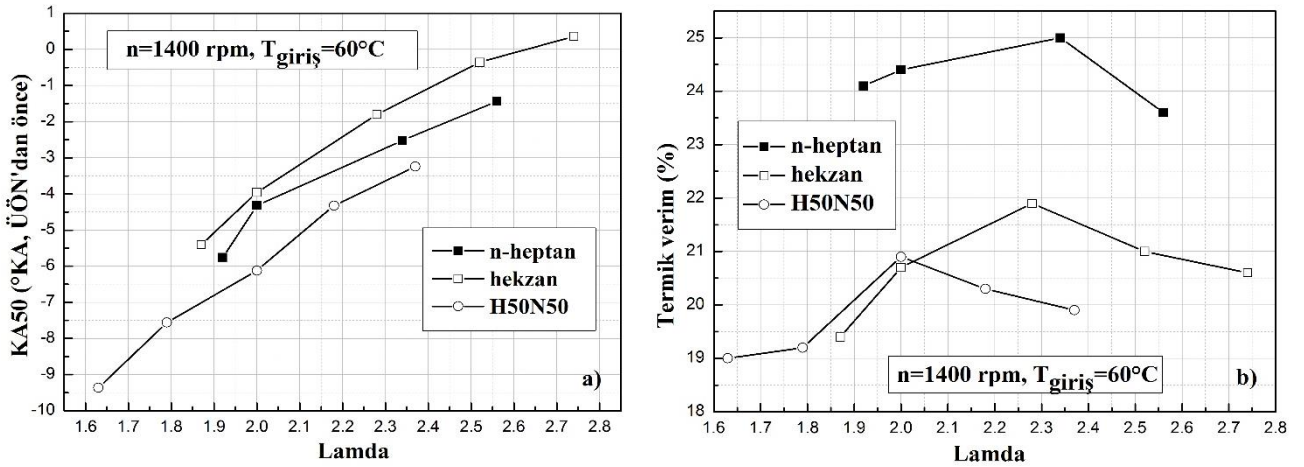
Şekil 4’de ise hekzan yakıtının silindir içi sıcaklık üzerindeki etkisi görülmektedir.  $\lambda=2$  değerinde yapılan deneylerde karışım yakıtlardaki hekzan miktarı arttıkça silindir içi sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Maksimum silindir içi sıcaklık n-heptan yakıtı ile elde edilmiştir. N-heptan yakıtının yanma ısısının yüksek olması, oktan sayısının düşük olması silindir içi sıcaklığın daha fazla olmasına neden olmaktadır. Ani ve hızlı bir şekilde gerçekleşen yanma odası gaz sıcaklığı birden artmaktadır. Hekzan ilavesi ile karışımın ısıl enerjisi azalmaktadır. Sonuçta n-heptan yakıtına hekzan ilave edildikçe silindir gaz sıcaklığı azalmaktadır. Aynı zamanda n-heptan yakıtının hekzana göre yoğunluğunun yüksek olması birim hacimde kütlece daha fazla yakıt molekülünün reaksiyona girmesine neden olmakta, yanma odasına salınana ısı artmaktadır. Maksimum silindir içi sıcaklık n-heptan yakıtı ile  $\lambda=2$  ‘de 2013 K hekzan ile 1954 K şeklinde tahmin edilmiştir.



**Şekil 4.** Hekzan yakıtının silindir içi sıcaklık üzerindeki etkisi (Effect of hexane fuel on in-cylinder temperature)

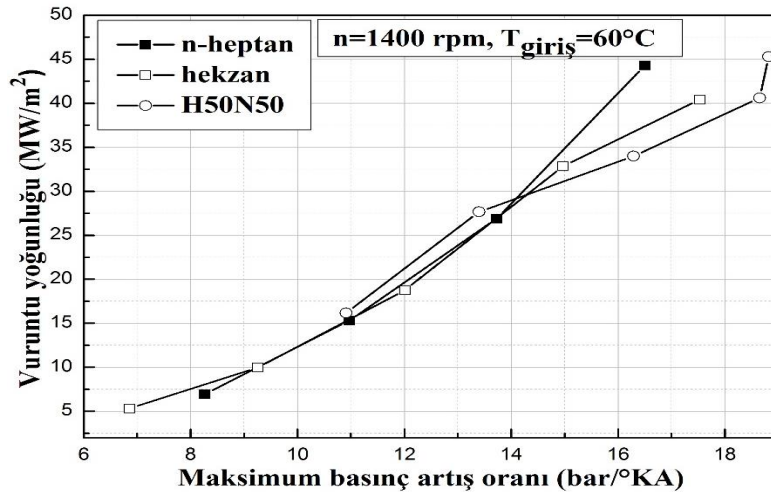
Kümülatif ısı dağılımı normalize işlemine tabi tutulduğunda yanma safhaları hakkında bize bilgi vermektedir. Yanma safhaları arasında diğer önemli değişken KA50 dir. KA50 karışımının yarısının yanmasını tamamladığı krank açısını ifade etmektedir. Şekil 5-a test yakıtları ile çalışan HCCI motorunda lamdanın KA50 üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 5-a incelendiğinde lamda arttıkça KA50 değerinin rötara alındığı görülmektedir. Fakir karışımın kendiliğinden tutuşması sonucu yanma sonu gaz sıcaklığı azalmaktadır. Karışımın yarısının yanmasını tamamlaması için gereken süre uzamaktadır. Zengin karışım oranlarında yakıt konsantrasyonunun yüksek olması kendiliğinden tutuşma temayülünü arttırmaktadır. Hekzanın oktan sayısının yüksek olması KA50 nin rötara alınmasına neden olabilmektedir. Minimum KA50 değerleri H50N50 ile elde edilmiştir. Fakir karışımlarda silindir içi sıcaklık azalmakta KA50 gecikmektedir. Test yakıtlarının oktan sayılarının düşük olması KA50 değerinin ÜÖN'dan önce elde edilmesine neden olmuştur. KA50 ile termik verim arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Termik verimin yüksek olabilmesi için KA50'nin ÜÖN'dan hemen sonra (5-10 °KA) elde edilmesi gerekir. Şekil 5-b'de görüldüğü gibi KA50 rötara alındıkça termik verimin arttığı görülmektedir. Tüm test yakıtları için termik verim belli bir lamda değerine kadar artmakta daha sonra azalmaktadır. Karışımın çok fazla fakirleşmesi silindir cidarında alevin sönmeye neden olmakta, yanma esnasında gaz sıcaklığını azaltmaktadır. Sonuçta termik verim azalmaktadır. Termik verim karışımın biraz fakirce olduğu hava yakıt oranlarında artış göstermektedir. Maksimum termik verim n-heptan yakıtı ile  $\lambda=2.34$ 'de %25 olarak hesaplanmıştır. Hekzan yakıtı ile termik verim n-heptana göre azalmıştır. Hekzan yakıtının ısı enerjisi ve yoğunluğunun n-heptana göre düşük olması termik verimin azalmasına neden olmuştur.





Şekil 5. a) KA50 değişimi (Change of CA50) b) Termik verim (Thermal efficiency)

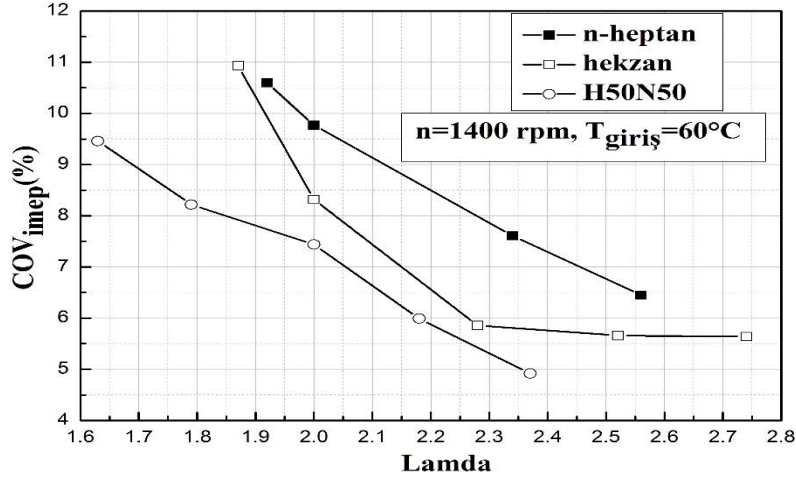
Vuruntu yoğunluğu motor devri, maksimum basınç artış oranına bağlı olarak hesaplanan bir parametredir. Maksimum basınç artış oranı çevrimde krank açısı değişimine karşılık maksimum basınç farkı değişimini ifade etmektedir. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Vuruntu yoğunluğu maksimum basınç artış oranı ile birlikte artmaktadır. Karışım zenginleştikçe yanma odasındaki yakıt enerjisi artmakta, yanma sonucu açığa daha fazla ısı çıkmaktadır. Bu durum silindir içinde basıncın aniden artmasına neden olmaktadır. N-heptan ve hekzan yakıtları incelendiğinde vuruntu yoğunluğu açısından belirgin bir fark görülmemektedir. N-heptana hekzan ilave edildiğinde vuruntu yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Sabit lamda değerinde H50N50 yakıtı ile n-heptana göre vuruntu yoğunluğu artmıştır. Maksimum vuruntu yoğunluğu H50N50 yakıtı ile hesaplanmıştır.



Şekil 6. Maksimum basınç artış oranına bağlı vuruntu yoğunluğu (Knock intensity due to maximum pressure rise rate)

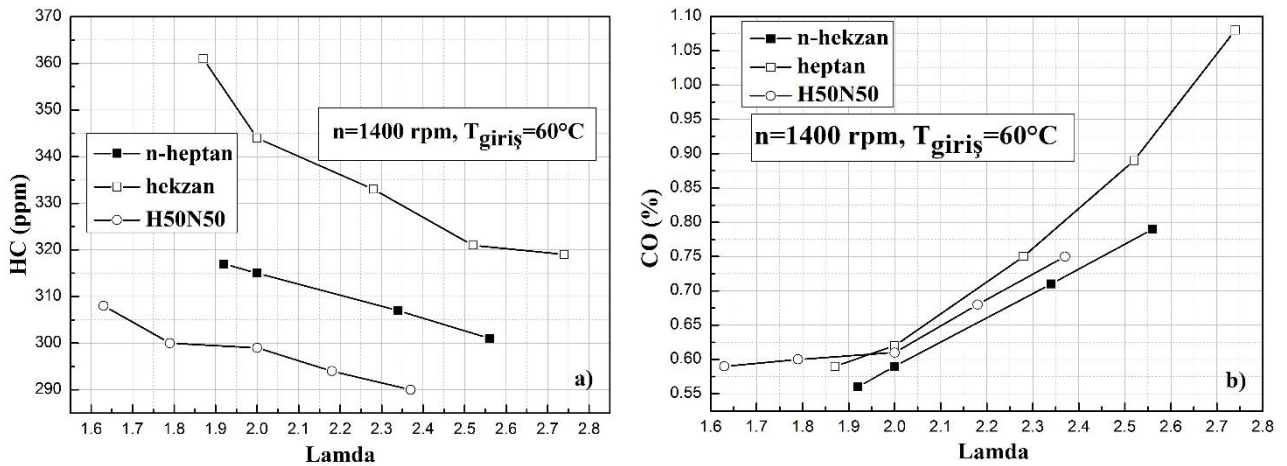
Silindire alınan karışım kompozisyonu çevrimden çevrime değişmektedir. Bir önceki çevrimden kalan art gazlar, segman ve supaplardan kaçan gazlar sıkıştırma stroku sonundaki karışımın halini ve termodinamik şartları değiştirmektedir. Sonuçta elde edilen silindir basıncı değişmekte ve çevrimsel farklılıklar görülmektedir. Literatürde çevrimsel farklılıkların %10'u geçmemesi istenmektedir [2]. Özellikle yanma odasında kalan art gazlar taze karışımın özelliğini bozmakta ısı dağılımı azalmaktadır. Şekil 7'de lamdaya bağlı çevrimsel farklılıklar görülmektedir. Lamda arttıkça çevrimsel farklılıklar azalmaktadır. Karışımın fakirleşmesi ile daha stabil ve kararlı HCCI yanmasının sağlandığı görülmektedir. Yüksek lamda değerlerinde ısı dağılımı yavaşlamakta ve azalmaktadır. Yakıt enerjisinin azalması oksidasyon oranını azaltmaktadır. N-heptan yakıtı ile karşılaştırıldığında COV<sub>imep</sub> hekzan ve H50N50 yakıtları ile azalmıştır.

Ancak H75N25 yakıtı ile maksimum çevrimsel farklılık görülmüştür. Hekzanın oktan sayısının düşük olması yanmanın daha kararlı sağlanmasına neden olduğu ifade edilebilir. Fakat yüksek oranda hekzan ilavesi ile karışımın ısıl enerjisi azalmakta ve çevrimsel farklar artmaktadır.



Şekil 7. Çevrimsel farklılıklar (Cyclic variations)

HCCI yanması sıkıştırma ile ateşlemeli yanmadan kaynaklanan NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarını eş zamanlı azaltabilmesine karşın fakir karışım ve düşük sıcaklık yanmasından dolayı HC ve CO formasyonları artış göstermektedir. Homojen fakir karışımın düşük sıcaklıkta yanması yanmanın tamamlanmasını engelleyebilmektedir. Bunun yanında alev silindiri cidarında sönmekte HC emisyonları oluşmaktadır. Şekil 8'de test yakıtları ile yapılan deneylerde lamdaya bağlı HC ve CO emisyonlarının değişimi görülmektedir. Şekil 8-a incelendiğinde lamda arttıkça HC emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Yoğunluğu düşük test yakıtlarının oksidasyonu için hava fazlalığına ihtiyaç vardır. Karışımın fakirleşmesi ile yakıtların ihtiyaç duyduğu oksijen yanma odasında bulunmakta, kimyasal oksidasyon reaksiyonları iyileşmektedir. Maksimum HC hekzan yakıtı ile  $\lambda=1.87$ 'de 361 ppm ölçülmüştür. Karışım zenginleşmesi yakıt moleküllerinin oksijen molekülleri ile reaksiyona girme imkânını kısıtlamakta, yanma sonu gaz sıcaklığı azalmaktadır. Ancak karışım yakıtları ile HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Hekzan yakıtı ile n-heptan yakıtı karıştırıldığında kendiliğinden tutuşma özellikleri iyileştirilebilmekte, karışım daha önce tutuşmaya başlamaktadır. HCCI yanması yanma başlangıcından oldukça etkilendiğinden yanma süreci daha hızlı alev hızı ile iyileşmektedir. Sonuçta HC emisyonları azalmaktadır.



Şekil 8. a) HC emisyonları (HC emissions) b) CO emisyonları (CO emissions)

CO eksik oksijen ve düşük reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak oluşan eksik yanma ürünüdür. Şekil 8-b incelendiğinde lamda arttıkça CO artmaktadır. Karışımın fakirleşmesi HCCI yanmasında silindiri içi gaz sıcaklığının azalmasına CO<sub>2</sub> formasyonuna engel olmaktadır. Yanma odasında yeterli oksijen konsantrasyonu olmasına rağmen düşük reaksiyon sıcaklığı CO oluşumunu hızlandırmaktadır. Tüm test



yakıtları için lamda arttıkça CO artmaktadır. Maksimum CO hekzan ile  $\lambda=2.74$ 'de %1.08 ölçülmüştür. Minimum CO emisyonu sabit lamda değerinde n-heptan ile ölçülmüştür. Hekzana belli oranda n-heptan ilavesi yanma reaksiyonlarını iyileştirmiş CO azalmıştır. N-heptan yakıtının düşük vuruntu direnci kendiliğinden yanma reaksiyonlarının hızlı seyretmesine neden olmaktadır. Bu durum yanma hızının ve yanma oranının artmasına neden olduğu görülmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

HCCI yanmasının en önemli problemlerinden biri yüksek yüklerde vuruntu sorunudur. Hızlı ve ani ısı dağılımına bağlı olarak yanma hızı aşırı artmakta, piston üzerine birim krank açısı değişimine bağlı olarak uygulanan basınç artmaktadır. Meydana gelen bu vuruntu motor parçalarının ömrünü azaltmakta, HCCI motorun çalışma aralığı daralmaktadır. Bu noktada hava-yakıt oranı ve farklı özelliklerde yakıtların kullanılması ile HCCI yanması kontrol edilebilmektedir. Bu çalışmanın amacı n-heptan yakıtına hekzan ilave edilerek yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmaktır. N-heptan ile özellikle düşük lamda değerlerinde vuruntu görülmüştür. Hekzan ilavesi ile vuruntu eğiliminin azaldığı görülmüştür. 1400 d/d'da yapılan deneylerde deney motorunun karışım yakıtlar ile (H50N50)  $\lambda=1.63$ - $\lambda=2.50$  lamda aralığında kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür. H50N50 yakıtı ile diğer yakıtlara göre yanma başlangıcının avansa alındığı karışım fakirleştikçe tüm test yakıtları için yanmanın geciktirildiği görülmüştür. Karışım yakıtlar ile hekzanın düşük ısı enerjisi ve yoğunluğundan dolayı termik verimin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda H50N50 ve hekzan yakıtları ile n-heptana göre çevrimsel farklılıklar azalmıştır. Benzer şekilde karışım yakıtlar ile HC emisyonlarının n-heptana göre azaltılabileceği görülmüştür. Ancak CO emisyonları n-heptan yakıtına göre artış göstermektedir. Sonuçta n-heptan yakıtına belli oranlarda hekzan ilavesi ile vuruntu temayülünün azaltılabileceği, HCCI motorlarda çalışma aralığının genişletilebileceği görülmüştür. Hekzanın n-heptana göre yüksek oktan sayısı yanmanın kontrol edilmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

#### KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

CO	: Karbonmonoksit
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli yanma
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
EGR	: Egzoz gazı geri dönüşümü
RCCI	: Reaktif kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli yanma
$dQ$	: Isı dağılımı (joule)
$dQ_{heat}$	: Yanma odasından silindir cidarlarına transfer edilen ısı (joule)
$d\theta$	: Krank açısı değişimi (derece)
V	: Silindir hacmi ( $m^3$ )
P	: Silindir basıncı (bar)
k	: Özgül ısıların oranı
$\gamma$	: Politropik indeks
$P_{max}$	: Maksimum silindir basıncı (bar)
$T_{max}$	: Maksimum silindir sıcaklığı (K)
$dP/dt$	: Maksimum basınç artış oranı (bar/derece)

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Zhao, H., (2007). *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, London, England: Woodhead Publishing Limited, 5-15.
- [2] Heywood, J.B., (1988), *Internal Combustion Engines Fundamentals*, New York, USA: McGraw-Hill, 3-20.
- [3] Eng J. A., Characterization of Pressure Wave Oscillation in HCCI Combustion, *SAE Technical Paper*, 2002-01-2859, (2002).
- [4] Stone, R., (1999), *Introduction to Internal Combustion Engines*, Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013-0, Tesseroux, I.; Toxicoll, Lett., 149, 295-300.
- [5] He, B-Q., Yuan, J., Liu M-B, Zhao H., Combustion and emission characteristics of a n-butanol HCCI engine, *Fuel*, 115: 758–64, (2014).
- [6] Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M., An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using incylinder blending of diesel and gasoline fuels, *Applied Thermal Engineering*, 63, 66-76, (2014).
- [7] Kokjohn, SL, Hanson, RM, Splitter, DA, RD., Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending, *SAE Technical Paper*, 2009-01-2647, (2009).
- [8] Can O., Cinar C., Sahin F., Effects of Premixed Gasoline Charge on HCCI-DI Engine Combustion and Exhaust Emissions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24, 2, 229-236, (2009).
- [9] Tsurushima, T., A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32: 2835-2841, (2009).
- [10] Splitter D., Reitz R., Hanson R., High efficiency, low emissions RCCI combustion by use of a fuel additive, *SAE International*, 2010-01-2167, (2010).
- [11] Polat, S, An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether–ethanol fuel blends. *Fuel Processing Technology*, 143: 140-150, (2016).
- [12] Dempsey. A., Walker, N., Gingrich, E., Reitz, RD., Comparison of Low Temperature Combustion Strategies For Advanced Compression Ignition Engines With a Focus on Controllability. *Combustion Science Technology*, 86, 2, 210-41, (2014).
- [13] Solmaz, H., Combustion, Performance and Emission Characteristics of Fusel Oil in a Spark Ignition Engine. *Fuel Processing Technology*, 133, 20-28, (2015).
- [14] Splitter, D., Wissink, M., DelVescovo, D., Reitz, R., RCCI Engine Operation Towards 60% Thermal Efficiency. *SAE International*, 2013-01-0279, (2013).
- [15] Hanson, R., Reitz, R., Transient RCCI Operation in a Light-Duty Multi-Cylinder Engine. *SAE Technical Paper*, 2013-24-0050, (2013).
- [16] Reitz, R.D., Duraisamy, G., Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, in-press. 1-60, (2014).
- [17] Uyumaz, A. An experimental investigation into combustion and performance characteristics of an HCCI gasoline engine fueled with n-heptane, isopropanol and n-butanol fuel blends at different inlet air temperatures. *Energy Conversion and Management*, 98, 199-207, (2015).

- [18]Çınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Şahin, F., Polat, S., Yılmaz, E., Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% iso-octane fuels, *Fuel Processing Technology*, 130, 275–281, (2015).
- [19]Çınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Topgöl, T., Effects of valve lift on the combustion and emissions of a HCCI gasoline engine, *Energy Conversion and Management*, 94, 159–168, (2015).
- [20]Çınar, C., Uyumaz, A., Polat, S., Yılmaz, E., Can, Ö., Solmaz, H., Combustion and performance characteristics of an HCCI engine utilizing trapped residual gas via reduced valve lift, *Applied Thermal Engineering*, 100, 586–594, (2016).
- [21]Uyumaz, A., Solmaz, H., Boz, F., Yılmaz, E., Polat, S., Reaktif Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Lamdanın Yanma Karakteristiklerine Etkileri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 1146-1156, (2017).
- [22]Polat, S., Yücesu, H.S., Kannan, K., Uyumaz, A., Solmaz, H., Shahbakhti, M., Experimental Comparison of Different Injection Timings in an HCCI Engine Fueled with N-Heptane, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1, 1, 1-6 (2017).
- [23]Uyumaz, A., Solmaz, H., Emme Havaşı Giriş Sıcaklığı ve Ön Karışımli Yakıt Oranının RCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri, *Politeknik Dergisi*, 20 (3) : 689-698, (2017).
- [24]Uyumaz, A., Çınar, C., (2015). Understanding the Effects of Residual Gas Trapping on Combustion Characteristics, Engine Performance and Operating Range in a HCCI Engine, *Proceedings of 48th The IIER International Conference*, 21-27, Barcelona Spain.



## Investigation of Change Process of Interior Equipment Elements of Housing Users with Different Socio-Economic Status (SES)

Kemal YILDIRIM<sup>1,\*</sup>, Mükerrerem GÜNÇIKTI<sup>2</sup>, N. Mine ÇELEBİ YAZICIOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> Mamak Battalgazi Vocational and Technical Anatolian High School, 06165, Mamak/ANKARA

<sup>3</sup> Çankaya University Faculty of Architecture, Department of Interior Architecture, 06520, Çankaya / ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the duration of changing the interior fittings of residential users with different socio-economic status (SES), the reasons for wanting to change or not, were determined. In this study conducted for this purpose, the results obtained and the suggestions developed were explained in a systematic order.

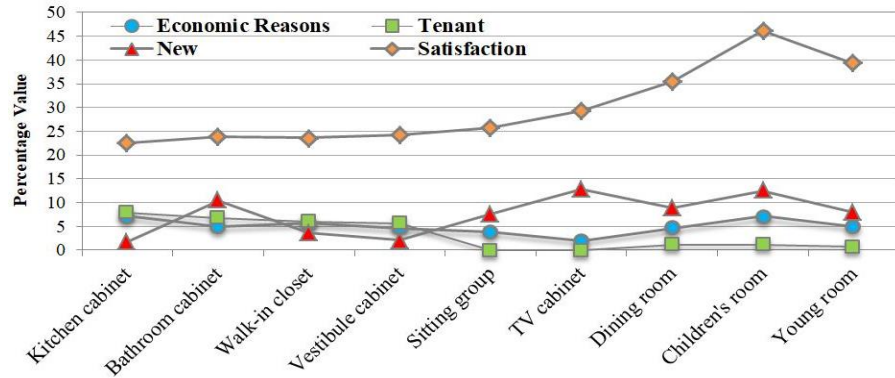


Figure A. Reasons of participants not wanting to change the interior elements

### Article Info:

Research article

Received: 31/10/2019

Revision 01/11/2019

Accepted: 21/12/2019

### Highlights

- Design management.
- Interior planning.
- Furniture planning.

### Keywords

Socio-Economic Status  
House  
Interior  
Equipment Element  
Design

**Purpose:** In this study, it was aimed to investigate and determine how often and for what reason the users of different socio-economic Status (SES) want to change the indoor equipment in their houses.

**Theory and Methods:** For this purpose, a totally 280 occupant participated in the questionnaire which was prepared considering three different SES groups, lower, middle and upper. The results were evaluated with SPSS program.

**Results:** According to the results, it was found that the average duration of the replacement of the interior equipment elements of the participants was between 6-10 years and the frequency of replacement of the elements decreased as the SES increased. In addition, when the reasons of the participants want to change the interior elements are examined; old, deteriorated / broken, aesthetic appearance, material quality, storage failure, measurement error, labor quality and lack of maintenance-service issues appear to come forward

**Conclusion:** Based on these results; furniture companies and manufacturers can develop marketing strategies by considering the times of changing the interior fittings of the users of residential buildings with different SES, the conditions of wanting to change, the reasons for wanting to change and not, and the relationship between the interior equipment elements and the perception of housing is evaluated from a different perspective. Design decisions can be determined according to the needs or expectations of economic users.



## Farklı Sosyo-Ekonomik Düzeye (SED) Sahip Konut Kullanıcılarının İç Mekân Donatılarını Değiştirme Süreçlerinin İncelenmesi

Kemal YILDIRIM<sup>1,\*</sup> , Mükerrerem GÜNÇIKTI<sup>2</sup> , N. Mine ÇELEBİ YAZICIOĞLU<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçışleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> Mamak Battalgazi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 06165, Mamak/ANKARA

<sup>3</sup> Çankaya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, 06520, Çankaya / ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, farklı sosyo-ekonomik düzeylere (SED) sahip kullanıcıların, konutlarında bulunan iç mekân donatılarını hangi sıklıkla ve hangi nedenle değiştirmek istedikleri ve ya istemediklerinin irdelenmesi ve belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, alt, orta ve üst olmak üzere üç farklı SED grubu göz önünde bulundurularak hazırlanan ankete toplam 280 kullanıcı katılmıştır. Elde edilen sonuçlara ait veriler SPSS programıyla değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, genel olarak katılımcıların konut iç donatı elemanlarını değiştirme sürelerinin ortalama 6-10 yıl arasında olduğu, SED yükseldikçe donatı elemanlarını değiştirme sıklığının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca katılımcıların donatı elemanlarını değiştirmek isteme nedenleri irdelendiğinde sırasıyla; eskidi, bozuldu/kırıldı, estetik görünüş, malzeme kalitesi, depolama yetersizliği, ölçü hatası, işçilik kalitesi ve bakım-servis yetersizliği gibi hususların öne çıktığı görülmektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 31/10/2019

Düzeltilme: 01/11/2019

Kabul: 21/12/2019

### Anahtar Kelimeler

Sosyo-Ekonomik Düzey

Konut

İç Mekân

Donatı Elemanı

Tasarım

### Keywords

Socio-Economic Status

House

Interior

Equipment Element

Design

## Investigation of Change Process of Interior Equipment Elements of Housing Users with Different Socio-Economic Status (SES)

### Abstract

In this study, it was aimed to investigate and determine how often and for what reason the users of different socio-economic Status (SES) want to change the indoor equipment in their houses. For this purpose, a totally 280 occupant participated in the questionnaire which was prepared considering three different SES groups, lower, middle and upper. The results were evaluated with SPSS program. According to the results, it was found that the average duration of the replacement of the interior equipment elements of the participants was between 6-10 years and the frequency of replacement of the elements decreased as the SES increased. In addition, when the reasons of the participants want to change the interior elements are examined; old, deteriorated / broken, aesthetic appearance, material quality, storage failure, measurement error, labor quality and lack of maintenance-service issues appear to come forward.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanoğlu, doğayla olan var olma mücadelesinde kendisini, ailesini ve yaşamsal temel gereksinimlerini dış doğa koşullarından, diğer canlılardan koruma ve barınma zorunluluğu içinde olmuştur. Yerleşik yaşam kültürünün bir ürünü olarak konut, değişik iklim koşulları ve farklı kültürler sonucunda farklı bölgelerde, farklı yapı malzemesi ve formlarla günümüze kadar gelmiştir. Tarihi anlamda konut; iletişim, etkileşim, zaman, mekân ve anlamın örgütlü bir örüntüsüdür. Nitelikleri nedeniyle de konutlar, korunmuş alana sahip, özel kimlik ve kişisel değer taşıyan mekânlar olarak ta ifade edilebilir [1-3].

İnsanların zamanının önemli kısımlarını geçirdikleri konut, kullanıcısı ile bir ilişki halindedir. Ekonomik ve sosyal durum bireyleri büyük oranda etkilediğinden şartlar doğrultusunda konut kullanıcı iletişimi

değişmektedir. Ortada bir iletişim bulunmaktadır ve bu iletişimi fiziksel çevre belirlemektedir [4,5]. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte insanların hayatlarında sıklıkla kullandıkları birçok materyal, ürün, eşya vb. değişime uğramıştır [6].

Bireylerde ekonomik durum, sosyal çevre ve yaşam biçimi belirli standartlar oluşturmaktadır. Bu standartları gerçekleştirme düzeyine göre bireylerde memnuniyet seviyesi değişmekte ve memnuniyet seviyesinde artış meydana gelmektedir. Çünkü konutta geçirdiği zamanda birey, yaşam tarzını yansıtmakta ve konutunda kalite aramaktadır. Bireysel özellikler neticesinde ortaya çıkan ihtiyaçlar, ekonomik durum doğrultusunda karşılanmakta ve bireylerin kontrolü dışında gelişebilmektedir [7].

Eylem ihtiyaçlarına göre oluşturulan her bir konut mekânının işlevsel ve algısal kalitesi, kullanıcısı olan insanın istek ve ihtiyaçları ile mekânın mimari özellikleri, sabit/hareketli donatı elemanları ve aksesuarlar arasındaki soyut, somut yâda işlevsel ilişkilerin doğru bir şekilde sorgulanmasıyla elde edilebilir. Sonuç olarak insan, mekân ve donatı elemanı arasındaki ilişkiler en uygun düzeyde tutulduğunda kullanıcı konforuna ve mutluluğuna olumlu yönde katkılar sağlanmış olunacaktır [8]. İç mekân donatı elemanlarından olan mobilya; kültürel, fizyolojik ve estetik gereksinimleri karşılamaktadır. Genel anlamda mobilya, yaşanan mekânın süslenmesine ve çeşitli amaçlarla donatılmasına yarayan eşya olarak nitelendirilmektedir [9]. Konutlarda kullanılan mobilyalar mimari ve insanlar arasında geçişi sağlayan önemli bir ara unsurdur. Mobilya ona anlam yüklenene kadar bir oda, boş bir mekândır. Yalnız, mobilya ile bu mekân yatak odası, çalışma odası, yemek odası ve oturma odası durumuna gelir [10].

Mobilyaların seçiminde gereksinimler, ekonomik durum ve kişisel zevk oldukça önem arz eder. Bununla birlikte uzun ömürlülük, sağlamlık ve kullanılabilirlik gibi hususlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Diğer ev eşyalarına göre daha pahalı olan mobilyalar, kullanıcı-mobilya ilişkileri göz önünde bulundurularak iyi bir seçim yapılırsa uzun yıllar kullanılabilir. Bu sebeple kalite, fiyat, sağlamlık ve çeşit konusunda iyi bir araştırma yapılmadan mobilya satın alınmamalıdır [11].

Kullanıcı ve donatı elemanı ilişkisi farklı araştırmacılar tarafından pek çok araştırmaya konu olmuş önemli bir husustur. Bu bağlamda alan yazınındaki çalışmalara bakılacak olursa; Bilgin [12] çalışmasında, ailelerin kullandıkları eşya ve insan-eşya ilişkilerini incelemiş; ailelerin sosyo-ekonomik düzeylerine (SED) bağlı olarak eşyalarını değiştirdiğini ve kullanıcıların yaşam biçimi ile eşyaları arasında belirli bir uyumun olduğunu ortaya koymuştur. Bilgin'e göre 1980'li yıllarda Türkiye'de yaşanan politik ve ekonomik değişim süreci insanların tüketim alışkanlıklarını değiştirmiş, yeni tüketici ihtiyaç ve beklentilerini ortaya çıkarmıştır. Türk tüketicilerin satın alma gücünün yükselmesiyle birlikte farklı, estetik, kaliteli kısacası "lüks" sınıfına giren ürünlere olan talepleri de artmıştır.

Yine başka bir çalışmada Işık [13], çeşitli SED ailelerinin yaşam biçimini, konut kullanımını, iç mekân düzenlemelerini, eşyanın nitelik ve nicelikleri ile depolama sorunlarını araştırarak; orta ve üst SED'e hitap eden konutların büyüklüğü, donatı elemanlarının düzenlenişi ve bireylerin yaşam şekilleri arasında bir benzerlik olduğunu tespit etmiştir.

Yıldırım, Başkaya, Hidayetoğlu [14] farklı sosyo-ekonomik düzeye sahip blok-konut kullanıcılarının sabit iç donatım elemanlarından memnuniyeti konusunu araştırmışlar, orta ve üst gelir gurubundaki kullanıcıların sabit iç donatım elemanlarından memnuniyet ve şikâyetlerini incelemişler ve şöyle bir sonuca varmışlardır. Yıldırım ve diğerlerine [14] göre kullanıcılar, müteahhitlerce yapılan iç donatı elemanlarının; estetik, malzeme kalitesi, ölçü, depolama kapasitesi ve işçilik kalitesinden yakınmaktadırlar. Araştırılan konut kullanıcılarının büyük bir kısmının şikâyetleri; malzeme ve işçilik kalitesinde yoğunlaşmaktadır.

Burdurlu, İlçe ve Ciritoğlu'nun [15] mobilya ürün özellikleri ile ilgili tüketicilerin tercih önceliklerini inceledikleri çalışmanın sonucunda tüketicilerin mobilya satın alırken öncelik verdikleri ürün niteliklerini ilk sırada mobilyanın fiyatı, ikinci sırada mobilyanın kalitesi ve üçüncü sırada mobilyanın kalite belgesinin olması şeklinde belirlemişlerdir. Ayrıca, ürün nitelikleri tercihinde öncelik sıralaması göz önüne alınmayıp toplam tercih göz önüne alındığı takdirde mobilyanın kalitesi ve kalite belgesinin bulunması satın almada en çok aranan ürün özelliği olarak tespit edilmiştir.

Arslan, Sönmez ve Burdurlu [16] tüketicilerin kullandıkları döşemeli mobilyalar ile ilgili şikâyetlerinin belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmada, tüketici nitelikleri göz önünde bulundurulduğunda döşemeli mobilyalar ile ilgili en fazla şikâyet konusunun kumaş eskimesinde olduğu belirlenmiştir. Bunu, ses-gıcırtı yapma ile ek yerlerinden açılma, döşemelerde çökme ve süngerlerin yıpranması şikâyet konuları takip

etmektedir. En az şikâyet ise boya ve vernikte dökülme ile kumaşta dökülme sorunlarıdır. Kullanıcıların döşemeli mobilyaları değiştirme sebeplerinin başında kullanım ömrünü doldurması ve ev değişiminin olduğu belirlenmiştir. Bir diğer değiştirme sebebi ise evlilik ve sosyal statünün değişmesi neticesinde yeni mobilyalara gereksinim duyulması olmuştur. Yine bu çalışma sonuçlarına göre bazı değişkenlerde farklılıklar belirlenmiştir. Gelir seviyesi arttıkça mobilyalar özelliklerinden beklentiler de artmaktadır. Bu nedenle üst gelir grubundaki bireyler genellikle döşemeli mobilyalar ile ilgili karşılaştıkları küçük sorunları bile şikâyet konusu haline getirmektedirler.

Şimşek [17] konut iç mekân donatı elemanları ile teknolojik ürünler arası ilişkilerin kullanıcı memnuniyetine etkilerini incelediği çalışmada konutlarda bulunan iç mekân donatı elemanları ile birlikte kullanılan; bilgisayar, fırın, ankastre ocak, televizyon vb. teknolojik ürünlerin boyutsal standartlar açısından ilişkilerinde, kullanıcıların karşılaştıkları sorunların tespit edilmesini amaçlamış ve şu sonuca varmıştır. Şimşek'e göre konut kullanıcılarının büyük bir kısmının donatı elemanları ile teknolojik ürünler arasındaki ilişkiden memnun olmadıkları, bu memnuniyetsizliğin öncelikle proje/tasarım hataları olmak üzere ölçü ve imalat hatalarından kaynaklandığı tespit edilmiş olup üreticilerin teknolojiyi yeterince takip etmedikleri sonucuna varılmıştır.

Akyüz [18] tarafından yapılan mobilya satın almada tüketici davranışlarını etkileyen psikolojik, sosyo-psikolojik, sosyo-kültürel faktörlerin incelendiği araştırma sonucunda; eğitim seviyesinin ve gelir seviyesinin artışı fiyatın önem derecesinin azalmasına neden olduğu, markanın önem derecesinin gelir seviyesi artışıyla arttığı gözlenmiştir. Yaş grupları açısından markanın öneminde anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Tüketicilerin eğitim seviyelerindeki artış ürünlerde garantiye verilen önemi arttırmıştır. Görünüm faktörü üst sınıf tüketicilerde diğer sınıf tüketicilere göre daha önem kazanırken orta sınıf tüketiciler için bu oran alt sınıf tüketicilerden daha az önemli bulunmuştur.

Farklı SED'e sahip konut kullanıcılarının mobilyalarını satın alırken dikkate aldığı hususlar önemlidir. Çünkü sınırlı doğal kaynaklar ve sınırsız insan ihtiyaçları göz önüne alındığında; insanların ihtiyaç ve beklentilerinin tam karşılanması insan mutluluğuna katkı sağlayacaktır. Ayrıca az kullanılan ve geri dönüştürülen mobilyalar doğanın ve çevrenin korunmasına destek olacaktır. Bu durum ekonomik olarak kullanıcıya da fayda sağlayacaktır. Türkiye'deki konut sayısı yaklaşık 23.500.000'dir [19]. Bu konut kullanıcılarının deneyimleri sonucunda mobilya satın alırken dikkate aldığı hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Yoksulluk sınırının altında yaşayan bireylerin oranı %21,2'dir [20]. Farklı ekonomik ve sosyal grupların yaşadığı ülkemizde kullanıcıların istek ve beklentilerinin optimum düzeyde karşılanması önem arz etmektedir. Günümüzde mobilya değiştirme sıklığı 5-7 yıl arasında değişmektedir. Ancak çevre ve ekonomi boyutu değerlendirildiğinde mobilya yaşam ömrünün daha uzun olması gerekmektedir [21].

Bu çalışmada, farklı sosyo-ekonomik düzeye (SED) sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme süreleri, değiştirmek istemeleri, değiştirmek istenme nedenleri ve değiştirmek istememe nedenleri incelenecektir. Bu kapsamda söz konusu araştırma konularını kapsayan ve test edilmek amacıyla oluşturulan hipotezler aşağıda verilmiştir.

- H1. Farklı SED'e sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme süreleri farklıdır.
- H2. Farklı SED'e sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme istekleri farklıdır.
- H3. Kullanıcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenleri farklıdır.
- H4. Kullanıcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenleri farklıdır.

## 2. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ (RESEARCH METHOD)

### 2.1. Katılımcıların Özellikleri (Characteristics of the participants)

Bu araştırmaya Ankara ilinin Çankaya ilçesinden 68 kişi (%24.3), Keçiören ilçesinden 138 kişi (%47.1) ve Altındağ ilçesinden 80 kişi (%28.6) olmak üzere toplam 280 konut kullanıcısı katılmıştır. Katılımcıların %60,4'ünün erkek, %39,6'sının kadın, %64,6'sının ortaöğretim mezunu, %25'inin lisans ve %10,4'ünün ise lisansüstü eğitim düzeyine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca %38,2'sinin kiracı, %61,8'i ev sahibi



olduğu, 2019 yılı şubat ayı itibarıyla %28,6'sının ortalama 1500-3499 TL, %47,1'inin ortalama 3500-7499 TL ve %24,3'ünün ise ortalama 7500 TL ve üzerinde aile gelirinin olduğu belirlenmiştir.

## 2.2. Anket Tasarımı (Questionnaire Design)

Araştırma hipotezleri bir anket yardımıyla ölçülmüştür. Bu anketin tasarımında daha önceki araştırmalarda geçerli ve güvenilir bulunmuş [13,14,22-24] konut değerlendirme anketlerinden faydalanılmıştır. Anket soru formu iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım, katılımcıların genel bilgileri (cinsiyet, yaş, eğitim seviyesi, evin mülkiyet durumu, aylık toplam aile geliri, ikamet edilen ilçe ve mahalle), ikinci kısım ise katılımcıların mutfak dolabı, banyo dolabı, gömme dolap, vestiyer, oturma grubu, TV dolabı, yemek odası, çocuk odası ve genç odası mobilyalarının değiştirilme süresi, değiştirme isteği, değiştirmek istenme nedenleri ve değiştirmek istememe nedenlerine yönelik sorularından oluşmaktadır.

## 2.3. Araştırma Ortamı ve Prosedür (Research Environment and Procedure)

Araştırma bölgesi Ankara ilidir. Araştırma evreni belirlenirken Ankara'nın Kentsel Yoksulluk Haritası [25] çalışmasından faydalanılarak Ankara'nın merkez ilçeleri arasında yer alan Çankaya, Keçiören ve Altındağ ilçeleri araştırma ortamı olarak seçilmiştir [20]. SED'lerin belirlenme sürecinde araştırmanın kapsamını; daha önce bazı araştırmacıların kullandığı [12,13,22,23,26] konutun büyüklüğü, yeri, malzeme ve işçilik gibi inşaat kalitesine göre Bayındırlık Bakanlığının konut sınıfı tanımlaması ve Belediyelerin rayiç vergi değerleri ile konut kullanıcılarının eğitimi, geliri, mesleği gibi diğer demografik kriterlerde dikkate alınarak Ankara il merkezi sınırları içindeki üç farklı SED grubunu temsil ettiği düşünülen konutlar oluşturmaktadır.

Örneklem Evreni içindeki toplam nüfus sayısının ortalama hane halkı büyüklüğü 3,4 bireye [20] bölünmesiyle araştırma örneklem evrenindeki yaklaşık konut sayısı 647277 adet olarak hesaplanmıştır. Araştırmada evreni temsil eden 280 konutlu örneklemin yeterli büyüklükte olduğu kabul edilmiştir. Araştırma anketi rastgele örnekleme metodu ile 2019 yılı şubat ayı boyunca hafta içi ve hafta sonu olmak üzere günün mesai saatleri içerisinde katılımcılarla yüz yüze görüşülerek uygulanmıştır.

## 2.4. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Araştırma verilerinin anlaşılabilirliği ve aynı yöntemle elde edilmiş verilerle karşılaştırılabilirliği için verilerin belirli kurallar çerçevesinde özetlenerek sunulmasını gerektirmiştir. Bu bakımdan, araştırma amacına uygun istatistiksel teknikler kullanılmıştır. Araştırma anketi ile elde edilen verilerin standart sapma değerleri, ortalamaları ve yüzdelik oranları hesaplanmış, buna ek olarak ki kare analizi de yapılmıştır. Bu verilerin Cronbach Alpha güvenilirlik testleri yapılarak bağımsız değişkenler arası ilişkilerin istatistiksel açıdan anlamlı bulunup bulunmadığı ki kare ile test edilmiştir.

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

### 3.1. Güvenilirlik Analizleri (Reliability Analysis)

Literatürde; Cronbach [27], Kaplan ve Saccuzzo [28] ve Panayides [29] tarafından yapılan araştırmalarda alfa güven katsayıları 0,60'ın üzerinde olduğunda "güvenilir" olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir. Bu araştırma ölçeğinin güvenilirliği 0,85 olarak tespit edilmiştir. Buna göre, bu çalışmada elde edilen veriler "güvenilir" olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada ulaşılan araştırma verileri uygun istatistiksel yöntemlerle test edilerek elde edilen bulgular sistematik bir sırayla aşağıda verilmiştir.

### 3.2. Donatıların Değiştirilme Süreleri (Replacement Periods of Interior Elements)

Farklı SED'e sahip katılımcıların iç mekân donatıları (mobilyalarını) değiştirme sürelerine ilişkin sorulara verdiği cevapların frekans sayıları ve yüzdelik değerleri ile ki kare testi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirme süreleri

Donatıların Değiştirilme Süreleri	Sosyo-Ekonomik Düzey								Kikare Sonuçları			
	ASED		OSED		USED		Toplam		X <sup>2</sup>	df	Sig.	
	N	%	N	%	N	%	N	%				
<b>Mutfak dolabı</b>	1-5 yıl	-	-	1	0,40	15	5,50	16	5,80	119,847	34	0,000*
	6-10 yıl	23	8,20	79	28,20	37	13,20	139	49,60			
	11 yıl üzeri	57	20,20	52	18,70	16	5,70	125	44,70			
<b>Banyo dolabı</b>	1-5 yıl	11	4,00	47	16,80	36	12,90	94	33,50	92,238	22	0,000*
	6-10 yıl	58	20,70	79	28,30	30	10,70	167	59,80			
	11 yıl üzeri	11	3,90	6	2,20	2	0,70	19	6,80			
<b>Gömme dolap</b>	1-5 yıl	1	0,40	3	1,20	15	6,00	19	7,60	98,727	32	0,000*
	6-10 yıl	18	7,20	75	29,60	39	15,60	132	52,20			
	11 yıl üzeri	51	20,20	43	17,20	8	3,20	102	40,30			
<b>Vestiyer</b>	1-5 yıl	1	0,40	4	1,50	15	5,50	20	7,40	106,497	32	0,000*
	6-10 yıl	22	8,10	79	28,80	42	15,30	143	52,20			
	11 yıl üzeri	55	20,20	46	16,90	10	3,70	111	40,50			
<b>Oturma grubu</b>	1-5 yıl	7	2,50	42	15,10	38	13,60	87	31,10	138,332	26	0,000*
	6-10 yıl	41	14,70	78	27,80	27	9,60	146	52,10			
	11 yıl üzeri	32	11,50	12	4,30	3	1,20	47	16,80			
<b>TV dolabı</b>	1-5 yıl	8	2,80	43	15,60	35	12,70	86	31,00	81,313	28	0,000*
	6-10 yıl	49	17,80	75	27,20	29	10,50	153	55,50			
	11 yıl üzeri	21	7,50	12	4,30	4	1,50	37	13,50			
<b>Yemek odası</b>	1-5 yıl	7	2,50	34	12,20	34	12,10	75	26,70	99,455	24	0,000*
	6-10 yıl	51	18,30	87	31,10	32	11,40	170	60,70			
	11 yıl üzeri	22	7,80	11	4,00	2	0,80	35	12,60			
<b>Çocuk odası</b>	1-5 yıl	12	4,60	29	11,00	52	19,60	93	35,10	143,743	28	0,000*
	6-10 yıl	48	18,10	84	31,70	11	4,20	143	54,00			
	11 yıl üzeri	16	6,00	13	5,00	0	0,00	29	10,90			
<b>Genç odası</b>	1-5 yıl	14	5,70	29	11,80	29	11,70	72	29,30	71,847	26	0,000*
	6-10 yıl	36	14,60	66	26,80	25	10,20	127	51,60			
	11 yıl üzeri	20	8,00	24	9,70	3	1,20	47	19,10			

Not: N: Katılımcı sayısı, %: Yüzdelerik değer, df: Serbestlik derecesi, X<sup>2</sup>: Kikare değeri. \*P< 0,001 düzeyinde önemlidir.

Tablo 1'de, bu soruya cevap veren katılımcıların sayısal değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1'de verilen sonuçlardan, katılımcıların SED'lerine göre iç mekân donatılarını değiştirme sürelerine ilişkin sorulara verdiği cevaplar arasında tüm iç mekân donatıları için p<0,001 düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre, cevap veren katılımcıların önemli bir kısmı mutfak dolabını (%49,6), banyo dolabını (%59,8), gömme dolabını (%52,2), vestiyerini (%52,2), oturma grubunu (%52,1), TV dolabını (%55,5), yemek odası mobilyasını (%60,7), çocuk odası mobilyasını (%54) ve genç odası mobilyasını (%51,6) 6-10 yıl arasında bir sürede değiştirdiğini bildirmektedir. Öte yandan, katılımcıların yarısına yakın bir kısmı mutfak dolabını (%44,7), gömme dolabını (%40,3) ve vestiyerini (%40,5) 11 yıl ve üzerinde bir sürede değiştirdiğini bildirmektedir. Diğer taraftan ASEED katılımcılarının önemli bir kısmı mutfak dolabını, gömme dolabını ve vestiyerini 11 yıl ve üzeri bir zamanda değiştirirken, ÜSEED katılımcıların banyo dolabını, oturma grubunu, TV dolabını, yemek odası mobilyasını, çocuk odası mobilyasını ve genç odası mobilyasını 1-5 yıl arasında bir sürede değiştirmektedir. Bu sonuçlar, "Farklı SED'e sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme süreleri farklıdır" (H1) hipotezinin desteklendiğini göstermektedir.

### 3.3. Donatıların Değiştirilme İsteği (Request to Replace Interior Elements)

Farklı SED'e sahip katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istemelerine ilişkin sorulara verdiği cevapların frekans sayıları ve yüzdelerik değerleri ile ki kare testi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen sonuçlardan, farklı SED'e sahip katılımcıların mutfak dolabı, vestiyer, oturma grubu, TV dolabı, yemek odası ve genç odası mobilyalarını değiştirmeye yönelik istek durumları arasında p<0,05 düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta, her üç SED'in katılımcılarının kendi içinde mutfak dolabı, vestiyer ve oturma grubu dışındaki diğer mobilyalarında değişiklik istemediği, orta ve üst SED katılımcıların oturma grubunu değiştirmek istemediği, orta SED katılımcıların mutfak dolabını ve vestiyerini değiştirme isteğinde kararsız kaldığı görülmektedir.

**Tablo 2.** Katılımcıların iç mekân donatılarını ilişkin değiştirme talepleri

Donatıların Değiştirilmek İstenmesi	Sosyo-Ekonomik Düzey								Ki Kare Sonuçları			
	ASED		OSED		USED		Toplam		X <sup>2</sup>	df	Sig.	
	N	%	N	%	N	%	N	%				
Mutfak dolabı	İstiyorum	15	5,4	28	10	19	6,8	62	22,1	13,688	4	0,008*
	Kararsızım	24	8,6	64	22,9	20	7,1	108	38,6			
	İstemiyorum	41	14,6	40	14,3	29	10,4	110	39,3			
Banyo dolabı	İstiyorum	22	7,9	39	13,9	25	8,9	86	30,7	10,557	4	0,032 <sup>ns</sup>
	Kararsızım	23	8,2	36	12,9	6	2,1	65	23,2			
	İstemiyorum	35	12,5	57	20,4	37	13,2	129	46,1			
Gömme dolap	İstiyorum	20	7,9	43	16,9	24	9,4	87	34,3	8,728	4	0,068 <sup>ns</sup>
	Kararsızım	17	6,7	34	13,4	7	2,8	58	22,8			
	İstemiyorum	33	13	44	17,3	32	12,6	109	42,9			
Vestiyer	İstiyorum	10	3,6	25	9,1	23	8,4	58	21,2	31,025	4	0,000*
	Kararsızım	26	9,5	71	25,9	16	5,8	113	41,2			
	İstemiyorum	42	15,3	33	12	28	10,2	103	37,6			
Oturma grubu	İstiyorum	42	15	33	11,8	14	5	89	31,8	67,261	4	0,000*
	Kararsızım	37	13,2	38	13,6	12	4,3	87	31,1			
	İstemiyorum	1	0,4	61	21,8	42	15	104	37,1			
TV dolabı	İstiyorum	17	6,2	50	18,1	17	6,2	84	30,4	13,837	4	0,008*
	Kararsızım	29	10,5	24	8,7	15	5,4	68	24,6			
	İstemiyorum	32	11,6	56	20,3	36	13	124	44,9			
Yemek odası	İstiyorum	18	6,4	32	11,4	14	5	64	22,9	14,148	4	0,007*
	Kararsızım	24	8,6	44	15,7	8	2,9	76	27,1			
	İstemiyorum	38	13,6	56	20	46	16,4	140	50			
Çocuk odası	İstiyorum	9	3,4	15	5,7	11	4,2	35	13,2	3,513	4	0,476 <sup>ns</sup>
	Kararsızım	11	4,2	25	9,4	7	2,6	43	16,2			
	İstemiyorum	56	21,1	86	32,5	45	17	187	70,6			
Genç odası	İstiyorum	21	8,6	21	8,6	10	4,1	52	21,2	24,107	4	0,000*
	Kararsızım	0	0	33	13,5	12	4,9	45	18,4			
	İstemiyorum	49	20	65	26,5	34	13,9	148	60,4			

Not: N: Katılımcı sayısı, %: Yüzdelerik değer, df: Serbestlik derecesi, X<sup>2</sup>: Kikare değeri.

\*P < 0,05 düzeyinde önemlidir. ns: P < 0,05 düzeyinde önemsizdir

Bu sonuçlara genel olarak bakıldığında, tüm katılımcıların yarısından fazlasının yemek, çocuk ve genç odası mobilyalarını değiştirmek istemedikleri görülmektedir. Bu sonuçlar, “Farklı SED’e sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme istekleri farklıdır” (H2) hipotezinin genel itibariyle desteklendiğini göstermektedir.

### 3.4. Donatıların Değiştirilmek İstenme Nedenleri (Reasons for Changing Interior Elements)

Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenlerine ilişkin sorulara verdiği cevapların frekans sayıları ve yüzdelerik değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenleri

Donatıların Değiştirilmek İstenme Nedeni	İşçilik Kalitesi		Malzeme Kalitesi		Ölçü Hatası		Estetik Görünüş		Depolama Yetersiz		Eskidi		Kırıldı / Bozuldu		Servis Yetersiz	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Mutfak dolabı	8	2,9	12	4,3	6	2,1	11	3,9	18	6,4	36	12,9	28	10	6	2,1
Banyo dolabı	6	2,1	25	8,9	7	2,5	15	5,4	12	4,3	37	13,2	38	13,6	5	1,8
Gömme dolap	11	3,9	9	3,2	11	3,9	6	2,1	37	13,2	35	12,5	24	8,6	10	3,6
Vestiyer	7	2,5	8	2,9	9	3,2	5	1,8	18	6,4	23	8,2	24	8,6	7	2,5
Oturma grubu	6	2,1	22	7,9	3	1,1	37	13,2	6	2,1	56	20	28	10	5	1,8
TV dolabı	8	2,9	7	2,5	35	12,5	24	8,6	3	1,1	24	8,6	21	7,5	11	3,9
Yemek odası	7	2,5	16	5,7	5	1,8	12	4,3	4	1,4	31	11,1	18	6,4	7	2,5
Çocuk odası	0	0	2	0,7	9	3,2	2	0,7	4	1,4	18	6,4	8	2,9	0	0
Genç odası	6	2,1	11	3,9	9	3,2	4	1,4	7	2,5	26	9,3	22	7,9	2	0,7

Not: N: Katılımcı sayısı, %: Yüzdelerik değer. Katılımcılar değiştirmek isteme nedeni olarak birden fazla işaretleme yapmışlardır.

Tablo 3’de, katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenleri görülmektedir. Buna göre, katılımcılar tarafından mutfak dolabının malzeme kalitesi (%4,3), depolama yetersizliği (%6,4), eskimesi

(%12,9) ve kırılıp bozulması (%10); banyo dolabının malzeme kalitesi (%8,9), estetik görünüşü (%5,4), depolama yetersizliği (%4,3), eskimesi (%12,2) ve kırılıp bozulması (%13,6); gömme dolabın işçilik kalitesi (%3,9), ölçü hatası (3,9), depolama yetersizliği (%13,2), eskimesi (%12,5) ve kırılıp bozulması (%8,6); vestiyerin depolama yetersizliği (%6,4), eskimesi (%8,2) ve kırılıp bozulması (%8,6); salon oturma grubunun malzeme kalitesi (%8,9), estetik görünüşü (%13,2), eskimesi (%20) ve kırılıp bozulması (%10); TV dolabının ölçü hatası (%12,5), estetik görünüşü (%8,6), eskimesi (%8,6) ve kırılıp bozulması (%7,5); yemek odası mobilyasının malzeme kalitesi (%5,7), estetik görünüşü (%4,3), eskimesi (%11,1) ve kırılıp bozulması (%6,4); çocuk odası mobilyasının eskimesi (%6,4) ve kırılıp bozulması (%2,9) ve genç odası mobilyasının ise malzeme kalitesi (%3,9), eskimesi (%9,3) ve kırılıp bozulması (%7,9) değişiklik isteme nedenleri olarak bildirilmiştir. Bu sonuçlara genel olarak bakıldığında, iç mekân donatılarının değiştirilmek istenme nedenleri olarak malzeme kalitesinin, depolama yetersizliğinin, eskimesinin ve kırılıp bozulmasının öne çıktığı görülmektedir. Tablo 3’de verilen sonuçlar, “Kullanıcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenleri farklıdır” (H3) hipotezinin genel itibarıyla desteklendiğini göstermektedir.

### 3.5. Donatıların Değiştirilmek İstenmeme Nedenleri (Reasons for Not Changing the Interior Elements)

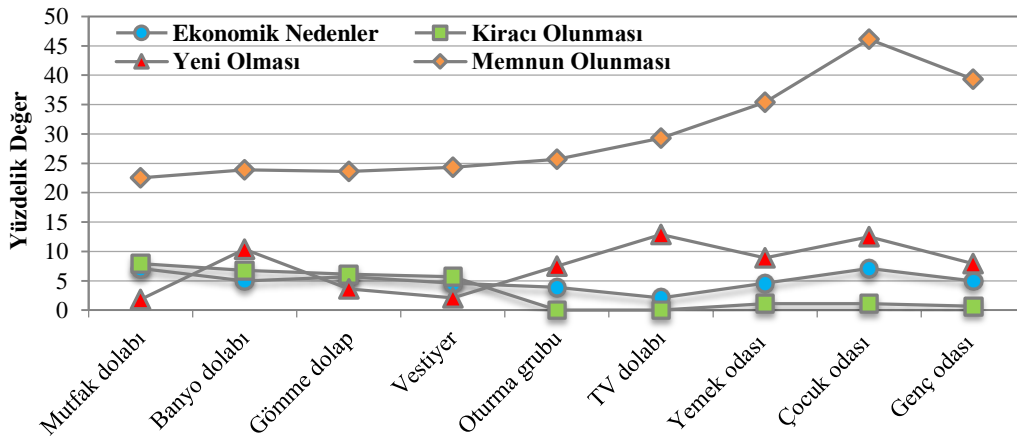
Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenlerine ilişkin sorulara verdiği cevapların frekans sayıları ve yüzdelik değerleri Tablo 4’de, grafiksel ifadesi ise Şekil 1’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenleri

Donatıların Değiştirilmek İstenmeme Nedeni	Ekonomik Nedenler		Kıracı Olunması		Yeni Olması		Memnun Olunması		Toplam	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Mutfak dolabı	20	7,1	22	7,9	5	1,8	63	22,5	110	39,3
Banyo dolabı	14	5	19	6,8	29	10,4	67	23,9	129	46,1
Gömme dolap	16	5,7	17	6,1	10	3,6	66	23,6	109	42,9
Vestiyer	13	4,6	16	5,7	6	2,1	68	24,3	103	37,6
Oturma grubu	11	3,9	-	0	21	7,5	72	25,7	104	37,1
TV dolabı	6	2,1	-	0	36	12,9	82	29,3	124	44,9
Yemek odası	13	4,6	3	1,1	25	8,9	99	35,4	140	50
Çocuk odası	20	7,1	3	1,1	35	12,5	129	46,1	187	70,6
Genç odası	14	5	2	0,7	22	7,9	110	39,3	148	60,4

Not: N: Katılımcı sayısı, %:Yüzdelik değer. Tablo 4’de, bu soruya cevap veren katılımcıların sayısal değerleri kullanılmıştır.

Tablo 4’de verilen kullanıcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenlerine bakıldığında, ekonomik nedenlerin, donatıların yeni olmasının ve donatılardan memnun olunmasının etkili olduğu, diğer taraftan konutta kiracı olunmasının ise mutfak, banyo ve gömme dolap ile vestiyer gibi sabit iç mekân donatılarının değiştirmek istememe eğiliminde etkili olduğu görülmektedir.



**Şekil 1.** Katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenleri

Bu sonuçlar, “Kullanıcıların iç mekân donatılarını değiştirmek istememe nedenleri farklıdır” (H4) hipotezinin genel itibarıyla desteklendiğini göstermektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Farklı sosyo-ekonomik düzeye (SED) sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme süreleri, değiştirmek istemeleri, değiştirmek istenme nedenleri ve değiştirmek istememe nedenlerinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmaya ilişkin elde edilen sonuçlar ve geliştirilen öneriler aşağıda sistematik bir sıra ile açıklanmıştır.

Farklı SED'lere sahip katılımcıların, iç mekân donatılarını değiştirme sürelerine ilişkin sorulara verdikleri cevaplar arasında  $p < 0,001$  düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu görülmektedir. Buna göre, katılımcıların önemli bir kısmının mutfak dolabını (%49,6), banyo dolabını (%59,8), gömme dolabını (%52,2), vestiyerini (%52,2), oturma grubunu (%52,1), TV dolabını (%55,5), yemek odası mobilyasını (%60,7), çocuk odası mobilyasını (%54) ve genç odası mobilyasını (%51,6) 6-10 yıl arasında bir sürede değiştirdiği tespit edilmiştir. Öte yandan, katılımcıların yarısına yakın bir kısmının ise mutfak dolabını (%44,7), gömme dolabını (%40,3) ve vestiyerini (%40,5) 11 yıl ve üzerinde bir sürede değiştirdiği belirlenmiştir. Diğer taraftan ASED katılımcıların önemli bir kısmı mutfak dolabını, gömme dolabını ve vestiyerini 11 yıl ve üzeri bir zamanda değiştirirken, ÜSED katılımcıların banyo dolabını, oturma grubunu, TV dolabını, yemek odası mobilyasını, çocuk odası mobilyasını ve genç odası mobilyasını 1-5 yıl arasında bir sürede değiştirmektedir. Bu sonuçlar SED'ler arasındaki donatılarını kullanım süreleri arasındaki farklılıkları göstermektedir.

Diğer bir sonuçta, farklı SED'e sahip katılımcıların mutfak dolabı, vestiyer, oturma grubu, TV dolabı, yemek odası ve genç odası mobilyalarını değiştirmeye yönelik istek durumları arasında  $p < 0,05$  düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Katılımcıların tümünün SED farkı gözetmeksizin, mutfak dolabı, vestiyer ve oturma grubu dışında diğer hiçbir iç donatıda değişiklik istemediği, orta ve üst SED katılımcıların oturma grubunu değiştirmek istemediği, orta SED katılımcıların mutfak dolabını ve vestiyerini değiştirme isteğinde kararsız kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlara genel olarak bakıldığında, katılımcıların yarısından fazlasının yemek, çocuk ve genç odası mobilyalarını değiştirmek istemedikleri görülmektedir. Bu sonuç daha önce Işık'ın [13] elde ettiği sonuçları desteklemektedir.

Başka bir sonuçta, katılımcıların iç mekân donatılarını değiştirmek isteme nedenleri tespit edilmiştir. Buna göre, katılımcılar tarafından mutfak dolabının malzeme kalitesi (%4,3), depolama yetersizliği (%6,4), donatının eskimesi (%12,9) ve kırılıp bozulması (%10); banyo dolabının malzeme kalitesi (%8,9), estetik görünüşü (%5,4), depolama yetersizliği (%4,3), dolabın eskimesi (%12,2) ve kırılıp bozulması (%13,6); gömme dolabın işçilik kalitesi (%3,9), ölçü hatası (3,9), depolama yetersizliği (%13,2), donatının eskimesi (%12,5) ve kırılıp bozulması (%8,6); vestiyerin depolama yetersizliği (%6,4), donatının eskimesi (%8,2) ve kırılıp bozulması (%8,6); salon oturma grubunun malzeme kalitesi (%8,9), estetik görünüşü (%13,2), donatının eskimesi (%20) ve kırılıp bozulması (%10); TV dolabının ölçü hatası (%12,5), estetik görünüşü (%8,6), eskimesi (%8,6) ve kırılıp bozulması (%7,5); yemek odası mobilyasının malzeme kalitesi (%5,7), estetik görünüşü (%4,3), eskimesi (%11,1) ve kırılıp bozulması (%6,4); çocuk odası mobilyasının eskimesi (%6,4) ve kırılıp bozulması (%2,9) ve genç odası mobilyasının ise malzeme kalitesi (%3,9), eskimesi (%9,3) ve kırılıp bozulması (%7,9) değişiklik isteme nedenleri olarak bildirilmiştir. Bu sonuçlara genel olarak bakıldığında, iç mekân donatılarının değiştirilmek istenme nedenleri olarak malzeme kalitesinin, depolama yetersizliğinin, eskimesinin ve kırılıp bozulmasının öne çıktığı görülmektedir. Bu sonuç daha önce Yıldırım ve diğerinin [14] elde ettiği sonuçları desteklemektedir.

Diğer bir sonuçta, iç mekân donatılarını değiştirmek istemediğini belirten katılımcıların istememe nedenleri irdelendiğinde, ekonomik nedenlerin, konutta bulunan donatıların yeni olmasının ve donatılardan memnun olunmasının etkili olduğu, diğer taraftan kiracı olunmasının ise mutfak, banyo ve gömme dolap ile vestiyer gibi sabit donatıların değiştirilmek istenmemesinde etkili olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlardan hareketle; mobilya firmaları ve üreticileri, farklı SED'e sahip konut kullanıcılarının iç mekân donatılarını değiştirme sürelerini, değiştirmek isteme durumlarını, değiştirmek isteme ve istememe nedenlerini dikkate alarak, pazarlama stratejileri geliştirebilir, iç mekân donatı ve konut algısının ilişkisi

farklı bir bakış açısıyla değerlendirilerek, farklı sosyo-ekonomik düzeydeki kullanıcıların ihtiyaç ya da beklentilerine uygun tasarım kararları belirlenebilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Araştırma anketini dolduran değerli katılımcılara desteklerinden dolayı çok teşekkür ederiz.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Gür, Ş. Ö. (2000). Doğu Karadeniz Örneğinde Konut Kültürü, Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları 11, İstanbul.
- [2]. Koçhan A., Doğal çevreyle kurulan anlamsal bağ sürdürülebilir toplu konut tasarımı. Yapı Dergisi, 256 (49-55), (2003).
- [3]. Şahin, C. K. (2008). Isparta Kent Merkezi Konut Bahçelerindeki Bitkisel Materyalin İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [4]. Yılmaz, Ö. (2005). 1980 Sonrasında İstanbul'da kent merkezi dışında oluşan konut alanlarının gelişim sürecinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5]. Akdemir, Z. (2002). Konut ve Ev Kavramlarının Karşılaştırmalı Analizi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 17.
- [6]. Güneş, H., Bıçakçı, S., Orta, E. ve Akdaş, D. Akıllı evlerde kullanılan yapay zekâ teknikleri için simülasyon geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7 (3), 554-563, (2019).
- [7]. Amerigo, M. ve Aragones, J.I. A Theoretical and methodological approach the study of residential satisfaction. Journal of Environmental Psychology, 17(47-57), (1997).
- [8]. Işık, Z. ve Yıldırım, K. (2002). Dekorasyonda İnce Yapı: Temel Ders Kitabı, Zirve Ofset Basım Yayın Matbaacılık, Ankara, 64.
- [9]. Ceylan, A. (2009). Mobilya Sektöründe Tedarik Zinciri Yönetimi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [10]. Kalınkara, V. (2008). Tasarım ve Dekorasyon, Gazi Kitabevi, Ankara, 2008.
- [11]. Kurtoglu, A. ve Koç. H. Mobilya Endüstrisinde Standardizasyon ve Kalite, Mobilya-Dekorasyon Dergisi, Mayıs-Haziran, 12(8-19), (1996).
- [12]. Bilgin, N. (1986). Çeşitli Sosyo-kültürel Gruplarda Eşya Sistemleri ve İnsan Eşya İlişkileri, Teknografik Matbaası, İzmir, 47, 122.
- [13]. Işık, Z. (1992). Geleneksel ve Günümüz Konutlarının İç Mekân Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 1-10.
- [14]. Yıldırım, K., Başkaya, A. ve Hidayetoğlu, M.L. Farklı Sosyo Ekonomik Düzeye Sahip Blok-Konut Kullanıcılarının Sabit İç Donatım Elemanlarından Memnuniyeti, Politeknik Dergisi, 8 (2): 189-197, (2005).
- [15]. Burdurlu E., İlçe A. Ç. ve Ciritoglu H. H. Mobilya ürün özellikleri ile ilgili tüketicilerin tercih öncelikleri. H.Ü. Sosyolojik Araştırmalar e-Dergisi, (2004). URL: <http://www.sdergi.hacettepe.edu.tr/makaleler/burdurlumakale.pdf>. [Erişildi: 23.04.2019].

- [16].Arslan, A.R. Sönmez, A. Burdurlu, E. (2010). Tüketicilerin Kullandıkları Döşemeli Mobilyalar İle İlgili Şikâyetlerinin Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(4)(295-304).
- [17].Şimşek, M. (2007). Konut İç Mekân Donatı Elemanları ile Teknolojik Ürünler Arası İlişkilerin Kullanıcı Memnuniyetine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [18].Akyüz, İ. (2006). Mobilya Satın Almada Tüketici Davranışlarını Etkileyen Psikolojik, Sosyo-Psikolojik ve Sosyo Kültürel Faktörlerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [19].Türkiye İstatistik Kurumu (2018). İstatistiklerle Aile. Haber Bülteni, 30726.
- [20].Türkiye İstatistik Kurumu (2017). Gelir ve Yaşam Koşulları Araştırması. Haber Bülteni 27597.
- [21].Müstakil Sanayici ve İşadamları Derneği (2013). Dayanıklı Tüketim ve Mobilya Sektör Raporu. Mavi Ofset, Beyoğlu, İstanbul, 84, 2013.
- [22].Yıldırım, K. (1999). Konut Mutfaklarının Mekan ve Donatı Organizasyonunda Ergonomik Yaklaşım, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 242-248.
- [23].Yıldırım, K., Aras, R. ve Tosun, Ö., Orta sosyo-ekonomik düzeye sahip kullanıcıların konut banyolarının iç mekan çözümlemesi. *Politeknik Dergisi*, 8(4), 353, (2005).
- [24].Yıldırım, K. ve Uzun, O. The effects of space quality of dormitory rooms on functional and perceptual performance of users: Zübeyde Hanım Sorority, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(4), 519-530, (2010).
- [25].Taş, R. (2012). Ankara'nın Kentsel Yoksulluk Haritası. Turgut Özal Üniversitesi Yayınları, Ankara, (6), 36-50.
- [26].İmamoğlu, O. (1996). İnsan Evi ve Çevresi, Ankara'da Bir Toplu Konut Araştırması. Toplu Konut İdaresi Başkanlığı, Ankara, 15-16.
- [27].Cronbach, L.J. Coefficient alpha and the internal structure of tests, *Psychometrika*, 16(3), 297-334, (1951).
- [28].Kaplan, R. M. ve Saccuzzo, D. P. (2010). *Psychological Testing: Principles, Applications, & Issues*. Belmont, CA: Wadsworth, Cengage learning.
- [29].Panayides, P. Coefficient alpha: interpret with caution. *Europe's Journal of Psychology*. 9(4), 687-696, (2013).



## Microstructural changes of Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C composite coating produced by TIG method

 Soner BUYTOZ 

Firat University Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 06500, ELAZIG

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 24/10/2019  
 Revision : 05/12/2019  
 Accepted: 21/12/2019

#### Highlights

- TIG method.
- Hexagonal-shaped  $M_7C_3$  carbides.

#### Keywords

Fe Based Composite  
 Microstructure  
 $M_7C_3$  Carbide  
 M(Nb,Ti)C Carbide

In this study, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C/FeNb and Fe-Cr-C/TiC powders were coated on the surface of AISI4140 steel with TIG method. Phase structures and morphological properties of the coating layers were investigated by optical microscope, scanning electron microscopy and X-Ray diffractometer. The test results show that the coating layer is solidified hexagonal-shaped  $M_7C_3$ , TiC and NbC carbides in  $\gamma$ -(Fe,Cr) eutectic matrix.

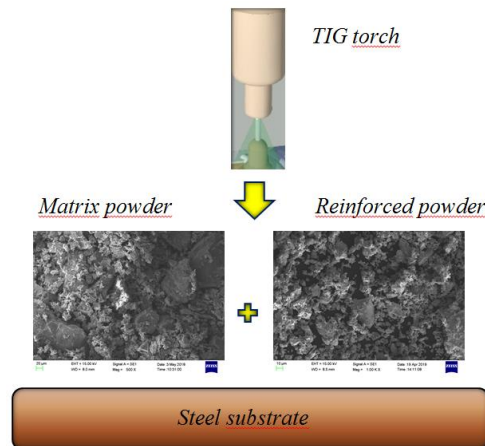


Figure A. Schema of the TIG coating

**Purpose:** In this study, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C/FeNb and Fe-Cr-C/TiC powders were coated on the surface of medium-carbon steel substrate with TIG process and characterized. After that the microstructural properties of the coated layers were investigated by optical microscope, scanning electron microscopy and X-Ray diffractometer, respectively.

**Theory and Methods:** In present study, TIG weld torch was used for coating. At first stage, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C/FeNb and Fe-Cr-C/TiC powders were mixed with powder mixing apparatus and pre-placed on AISI4140 steel substrate. At second stage, substrate surfaces were scanned with TIG torch in the suitable scanning speed and heat input. After coating processes, the coated layers were investigated by optic microscopy, scanning electron microscopy and X-Ray diffractometer, respectively.

**Results:** The surface appearance of all coating layers is uniform due to the suitable scanning speed and heat input and do not shows a superficial crack formation. According to the XRD results, primary phase is  $\gamma$ -(Fe,Cr) and secondary phase  $M_7C_3$  carbide in FeCrC coating. At the same time, NbC phases were detected in FeNb coating and TiC phases were found in TiC coating.

**Conclusion:** In this study, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C/FeNb and Fe-Cr-C/TiC powders were coated by TIG method on the surface of AISI4140 steel substrate and microstructural change of the coating was investigated. It was seen that the coating is metallurgically bonded to the substrate when it is produced with sufficient energy input. While Fe-Cr-C/FeNb and Fe-Cr-C/TiC coatings consists of quadrangular-shaped NbC carbides and triangle-shaped TiC carbides, hexagonal-shaped  $M_7C_3$  carbides solidified in  $\gamma$ -(Fe,Cr) eutectic matrix for the FeCrC coatings.



## TIG yöntemiyle üretilen Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C kompozit kaplamalarında mikroyapısal değişimler

Soner BUYTOZ 

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23119, ELAZIĞ

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 24/10/2019  
Düzeltilme: 05/12/2019  
Kabul: 21/12/2019

### Anahtar Kelimeler

Fe esaslı Kompozit  
Mikroyapı  
 $M_7C_3$  Karbürü  
M(Nb,Ti)C Karbürü

### Keywords

Fe Based Composite  
Microstructure  
 $M_7C_3$  Carbide  
M(Nb,Ti)C Carbide

### Öz

Fe-Cr-C, Fe-Cr-C/FeNb ve Fe-Cr-C/TiC kaplamalarına  $M_7C_3$  ve M(Nb,Ti)C karbürlerinin etkisini incelemek için gaz tungsten ark tekniği kullanılarak orta karbonlu çelik altlık yüzeyinde hazırlandı ve elde edilen kompozit kaplamaların mikroyapı ve özellikleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelendi. Fe-Cr-C kaplamalarında mikroyapıda hegzagonal ve sivri uçlu  $M_7C_3$  karbürleri oluşurken, FeNb ve TiC ilaveli kaplama tabakalarında  $\gamma$ -(Fe,Cr) ötektik matriste birincil  $M_7C_3$  karbürleriyle birlikte üçgen görünümlü NbC ve dörtgen görünümlü TiC taneleriyle katılaşma meydana geldiği belirlendi.

### Microstructural changes of Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C composite coating produced by TIG method

### Abstract

Fe-Cr-C, Fe-Cr-C / FeNb and Fe-Cr-C / TiC coatings to investigate the effect of  $M_7C_3$  and M (Nb, Ti) C carbides, Fe-based composite coating was prepared on the surface of medium carbon steel by gas tungsten arc technique. The microstructure and properties of the obtained composite coatings were examined using optical microscope and scanning electron microscope. While hexagonal-shaped and pointed-tipped  $M_7C_3$  carbides were formed in the microstructure of Fe-Cr-C coatings. in FeNb and TiC added coating layers,  $\gamma$ -(Fe, Cr) eutectic matrix solidified occurred with both primary  $M_7C_3$  carbides and triangular NbC, and quadrangular TiC grains.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Aşınma, korozyon ve yorulma birçok malzemede büyük bir sorundur. Metalik malzemelerin yüzey özellikleri, mevcut sorunu en aza indirmek için metal-matris kompozit kaplamalarla güçlendirilmiştir. Metal matrisli kompozit (MMK) kaplamalar, hem karbür sertliğinin hem de metallerin tokluğunun avantajlarından yararlanmak için geliştirilmiştir. Son yıllarda, MMK kaplamaları üretmek için lazer kaplama (LA), termal sprey kaplamalar, tungsten asal gaz (TIG) kaplama ve plazma transfer ark (PTA) kaplama gibi yüzey mühendisliği yöntemleri uygulanmıştır. Lazer, plazma ve elektron ışınıyla yapılan sert, aşınmaya dayanıklı metal matrisli kompozit (MMK) kaplamalarının üretim maliyetlerinin TIG yöntemine göre yüksek olması, endüstride uygulama alanlarını sınırlamaktadır. TIG kaplama/alaşım, alt tabaka yüzeyinde önceden yerleştirilmiş toz veya toz karışımlarını ergiterek geliştirilen yüzey tabakasıyla, metalik alt tabakalar yüzeyinde çok yüksek ergime sıcaklığına sahip seramiklerin kaplanması için alternatif bir yoldur. Kaplanacak metalin yüzeyine önceden yerleştirilmiş metalik tozların eritilmesi, TIG kaynak torcundaki tungsten elektrod ile malzeme arasında oluşan ark sayesinde ve ergiyip hızla katılaşan kaplama tabakası ile alt tabaka arasında metalürjik bir bağlanmaya imkân sağlar. Hızlı katılaşmayla ince taneli mikroyapılar oluşturarak mekanik özellikleri iyileştirilmiş yüksek kaliteli sert kaplama tabakası üretilebilir [1].

Fe-Cr-C alaşımları, yapılarında yüksek Cr' lu ( $M=Fe,Cr$ ) $_7C_3$  ve  $M_{23}C_6$  karbürleri gibi birincil sert karbürler bulundurmaları ve matris tokluğunun yüksek olmasından dolayı, aşınmaya karşı mukavimdirler [2].  $M_7C_3$  ve  $M_{23}C_6$  karbürleri ihtiva eden Fe-Cr-C alaşımları, alaşım elementlerinin cins ve miktarına ve de katılma prosesine bağlı olarak; ötektik altı, ötektik veya ötektik üstü yapılar oluşturabilir. Karbon miktarı arttıkça, ötektik yapı içerisinde gömülü olan birincil  $M_7C_3$  karbürlerinin miktarı da artar. % ağı.2-5 C ve % ağı.18-30 Cr miktarlarında  $M_7C_3$  karbürlerinin oluştuğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir [3-5]. Bununla birlikte, matrisin tokluğu da aşınma direncine katkıda bulunur [6]. Bu nedenle, yalnızca karbürlerin morfolojisi, miktarı, dağılımı ve karbür tipi değil, aynı zamanda matris yapısının tipi de önemlidir [7].

MMK kaplamalarında TiC tanesinin matrise kazandırdığı dayanım ve sertlik değerleri bakımından oldukça dikkat çekmiştir [8]. Yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci, yüksek ergime derecesi ve termal kararlılık gösteren TiC, birçok mühendislik uygulamalarında kaplama malzemesi olarak tercih nedeni olmuştur [9]. TIG kaplamasında TiC tabanlı kaplama malzemeleri alt tabaka malzemelerine kıyasla sertlik ve aşınma dirençlerinde oldukça iyileşme göstermiştir [10]. Wang ve arkadaşları [11] in-situ TiC-TiB<sub>2</sub> taneli Fe esaslı kompozit kaplamalarını TIG yöntemiyle elde ederek, çelik alt tabakasına göre çok yüksek bir sertlik ve üstün bir aşınma direnci sergilediğini bildirmişlerdir. Monfared ve arkadaşları Ti/TiC kompozit kaplamalarını tungsten inert gaz yöntemiyle üretirken 1100 HV gibi yüksek sertlikle aşınmaya dirençli malzeme elde etmişlerdir [12]. Tungsten inert gaz yöntemiyle 2000 HV gibi daha yüksek sertlik elde etmenin mümkün olduğu literatürde mevcuttur [13].

Bu çalışmada, daha önce AISI4140 çelik yüzeyine yerleştirilmiş yüksek kromlu FeCrC, TiC ve FeNb tozlarının TIG kaplama işlemi ile eritilmesiyle FeCrC/M(Ti,Nb)C MMK kaplama tabakası üretildi. MMK kaplama tabakasının mikroyapı ve element analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elementel analiz (EDS) ile değerlendirildi. Kaplama katmanlarının faz bileşenleri, X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemiyle belirlenerek mikro yapıyla ilişkilendirildi.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada, 80 x 20 x 10 mm<sup>3</sup> ölçülerindeki AISI4140 çelik yüzeyi TIG yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplama için kullanılan tozlar, Fe-Cr-C (yaklaşık 45 µm partikül büyüklüğü), FeNb (yaklaşık 50 µm partikül büyüklüğü) ve TiC (yaklaşık 30 µm partikül büyüklüğü) kullanıldı. Çalışmada kullanılan tozların SEM morfolojileri ve EDS verileri Şekil 1' de verilmiştir. Önce çelik plakaların yüzeyi 220 grit SiC zımpara kağıdı ile parlatıldı ve sonrasında kir ve tortu oluşmasını önlemek için etil alkol ile temizlendi. Kaplama tozlarını yerleştirmek için, Şekil 2' de görüleceği gibi, alt tabakalar üzerinde 8 mm genişliğe ve 1.5 mm derinliğinde kanallar açıldı.

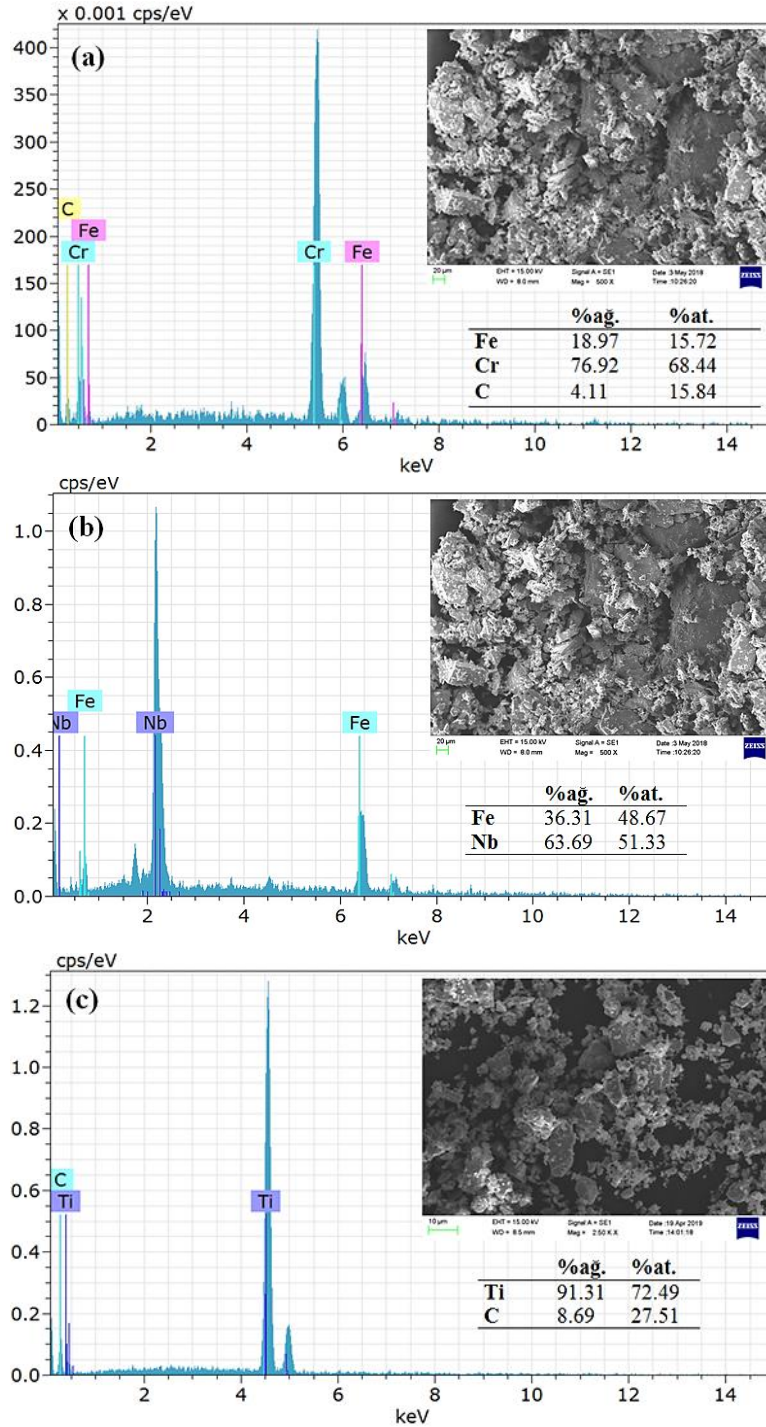
FeNb ve TiC tozları, Tablo 1'de gösterildiği gibi belirlenen oranlarda, Fe-Cr-C tozlarına eklendi. Karışım, 10:1 seramik bilyelerle 2 saat ve 60 rpm'de toz karıştırma cihazıyla karıştırılarak hazırlandı. Tozlar, polivinil alkol ile yarı katı bir çözelti oluşturularak çelik alt tabaka üzerinde homojen bir şekilde dağıtıldı ve bağlayıcı maddenin buharlaşmasını sağlamak ve böylece bir kuru toz karışımı elde etmek için 24 saat boyunca oda sıcaklığında kurutuldu.

**Tablo 1.** Örnek tanımlamalı TIG kaplama için deney koşullarının detayları

Numune no	Numune etiketi	% ağı. FeNb ve TiC tozu	Üretim hızı (mm/s)	* Isı girdisi (J/mm)
S <sub>1</sub>	FeCrC	-	0.435	1214
S <sub>2</sub>	FeCrC -%25ağı. FeNb	25	0.430	1227
S <sub>3</sub>	FeCrC -%25ağı. TiC	25	0.434	1216

\*Isı girdisi  $Q = \eta.U.I/s$ ,  $U$ : volt,  $I$ : akım,  $s$ : üretim hızı,  $\eta$ : katsayı (TIG prosesi için  $\eta=0.48$ )

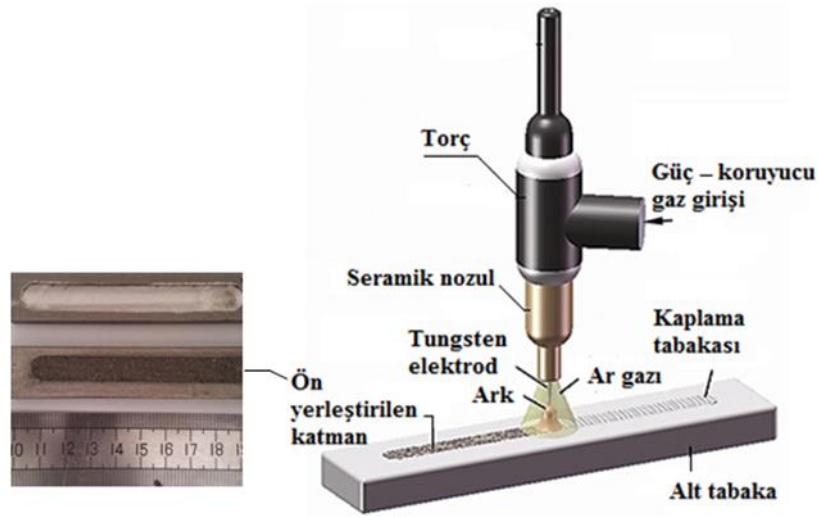
Yüzey kaplaması için ısı kaynağı olarak, tungsten asal gaz (TIG) kaynak makinesi kullanıldı. Ar koruyucu gaz, tüm deneyler için 12 l/dak akış hızında ve negatif polariteyle değerlendirildi. Kaplama işleminin şematığı Şekil 2'de verilmiştir. Tablo 1, Fe-Cr-C/NbC ve Fe-Cr-C/TiC kaplama için üretim koşullarını göstermektedir. Isı girişi ve tarama hızları gibi üretim parametreleri, alt tabaka ile yeterli bir bağa sahip olan uygun bir kaplama tabakası üretmek için, optimum koşulu elde etmek üzere değiştirildi.



**Şekil 1.** Kaplamada kullanılan tozların morfolojileri ve EDS spektrumları; (a) Fe-Cr-C tozu, (b) FeNb tozu ve (c) TiC tozu

TIG yüzey kaplaması yapıldıktan sonra, kaplama morfolojisini analiz için, ark taramasının enine kesit doğrultusunda numuneler kesildi. Numunelerin enine kesiti farklı dereceli SiC zımpara kağıdı, ardından elmas pasta (ortalama tane boyutu: 1 µm) ve parlatma keçisiyle metalürjik olarak parlatıldı. Parlatılan bu

numuneler 20 ml HCl+5 gr FeCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O+96 ml metanol çözeltisi ile yaklaşık 5 saniye dağlandıktan sonra yüzey morfolojisi incelendi. Mikroyapı ve sert fazların yapı içerisindeki dağılımını incelemek için Clemex Software programlı Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskop kullanıldı. Kaplamanın mikro yapısını analiz etmek için, kaplamanın kesitinden SEM (Zeiss EVO MA10) ve enerji dağılımlı spektrum (EDS) analizleri yapıldı. Kaplama tabakasında oluşan çeşitli bileşiklerin değerlendirilmesi için, farklı parametrelerde üretilen tüm kaplama numuneleri için X ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanıldı. XRD, 20–90 ° tarama aralığı, 0.02 ° adım boyutu ve dakikada 10 ° 'lik bir tarama hızı göz önüne alınarak bakır hedef ( $\lambda = 1.79026 \text{ \AA}$ ) kullanılarak Rigaku RadB-DMax II difraktometre yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



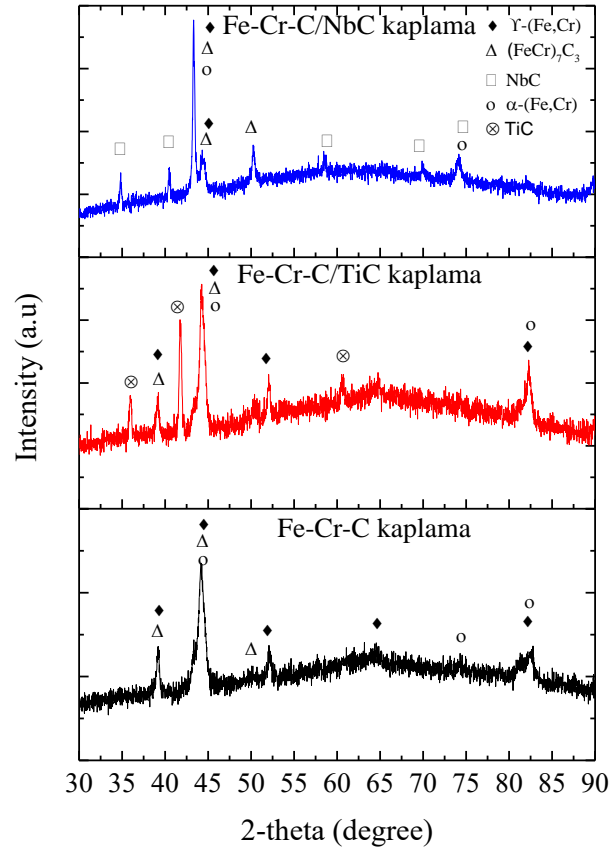
Şekil 2. TIG kaplama işleminin şematik diyagramı

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

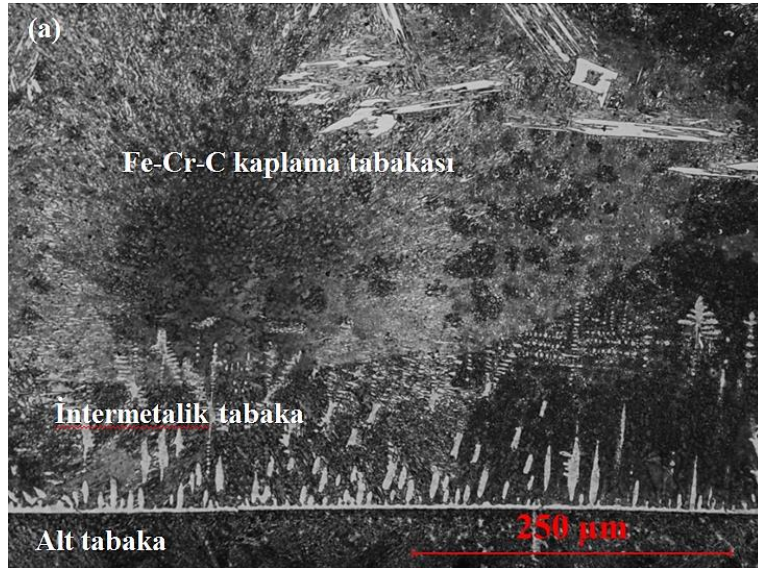
TIG yöntemiyle üretilen Fe esaslı M(Nb,Ti)C takviyeli MMK kaplamalar için, kaplama öncesi yüzeye yapıştırılan tozların SEM görüntüsü Şekil 1' de, kaplama sonrası elde edilen numunelerin yüzey morfolojisi ise Şekil 2' de verilmiştir. Kaplama sonrası kompozit kaplamanın yüzey görünümü net, kaynak-kaplama boncuklarının düzgün olduğu görülebilir. Bundan başka, tüm kaplama katmanlarının makro görüntülerinde yüzeysel bir çatlak oluşumu göstermediği açıktır (Şekil 2). TIG kaplama çizgilerinin genişliği ortalama 10 mm' dir ve bu da TIG torcunun yeterli enerji girdisini sağladığını, yüzeye yapıştırılan tozların tamamen ergidiğini ve kaplama tabakalarının alt tabakaya nüfuz ettiğini göstermektedir.

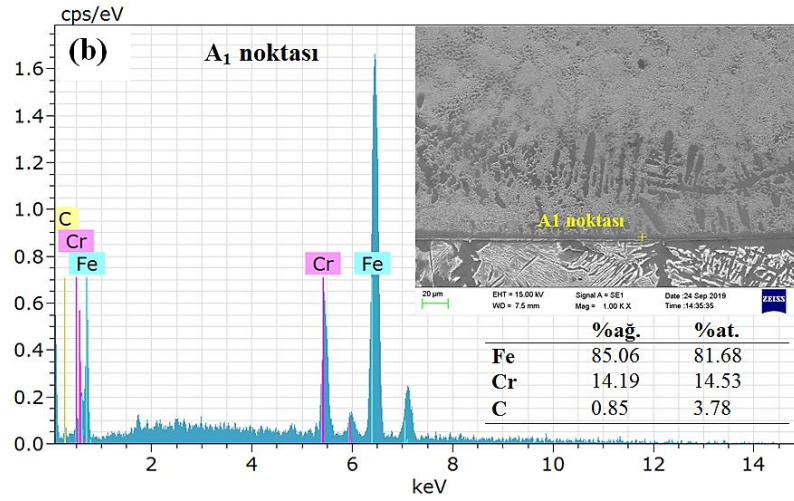
AISI4140 çelik yüzeyinde TIG kaplama işlemi sırasında oluşan bileşik fazları belirlemek için, kaplanmış yüzey üzerinde XRD yapılmıştır. FeCrC tozuna %ağ.25 FeNb ve %ağ.25 TiC tozlarının ilavesiyle üretilen kompozit kaplamalarının XRD spektrumları Şekil 3' de verilmiştir. Şekil 3' deki XRD patternleri, kompozit kaplamaların TIG kaplamayla başarılı bir şekilde elde edilebileceğini gösterdi. Fe-Cr-C/FeNb ve Fe-Cr-C/TiC tozlarıyla üretilen kompozit kaplama katmanlarında elde edilen faz ve bileşiklerin miktar ve oranlarında da değişiklik görüldü. Fe-Cr-C kaplamasında ana faz  $\gamma$ -(Fe,Cr), ikincil fazlar  $M_7C_3$  ve  $\gamma$ -(Fe,Cr) fazları görülürken, FeNb ilaveli kaplamalarda NbC fazları, TiC ilaveli kaplamalarda da TiC fazları tespit edildi.





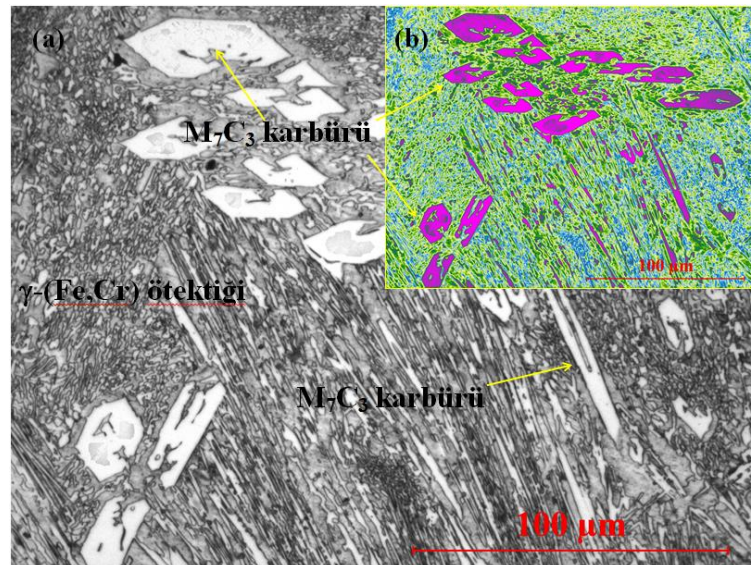
Şekil 3. Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C kompozit kaplamalarının XRD paterni



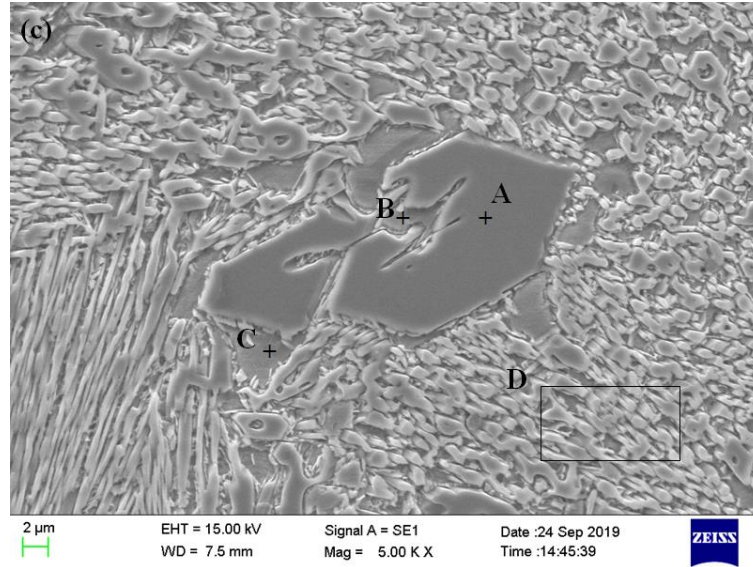


**Şekil 4.** İntermetalik bölgenin (a) optik mikroyapısı (X500) ve (b) intermetalik hatta A<sub>1</sub> bölgesinin bölgesinin EDS grafiği

Fe-Cr-C kaplamasının yan kesit mikroyapısı Şekil 4 ve Şekil 5’ de gösterilmiştir. Kaplama tabakasıyla alt tabaka arasındaki intermetalik beyaz tabaka, Şekil 4(a)’ da görüleceği gibi, kaplama ile alt tabakayı birbirinden ayıran ortalama 8 µm kalınlığında bir hat şeklinde tespit edilmiştir. Şekil 4(b)’ de EDX difragtogramı verilen intermetalik hat, %ağ.85.06 Fe, %ağ.14.09 Cr ve %ağ.0.85 C elementleriyle katılaşma göstermiştir. Erimiş havuz ve alt tabaka arasındaki bölgede, katı-sıvı arayüz, düzlemsel olarak büyür ve ilerleyerek tek fazlı bir bağlanma bölgesi oluşturur [14]. Alt tabaka ile yüzeye sıvı tozların, dışarıdan verilen bir enerjiyle aynı anda ergitilmesi ve katılaşma sonrası oluşan intermetalik tabaka, malzemeler arası metalürjik bağları etkiler. Bununla birlikte, yüzeye verilen enerji girdisiyle, erimiş yüzeyde metal tozlarıyla karışmasından dolayı oluşabilecek gaz boşlukları ve gözeneklilik, kaplamanın mekanik özelliklerine olumsuz etki yapar [15]. Üretilen Fe-Cr-C ve Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C kompozit kaplamaların intermetalik bölgelerinde bu tür kusurlara rastlanılmadı.







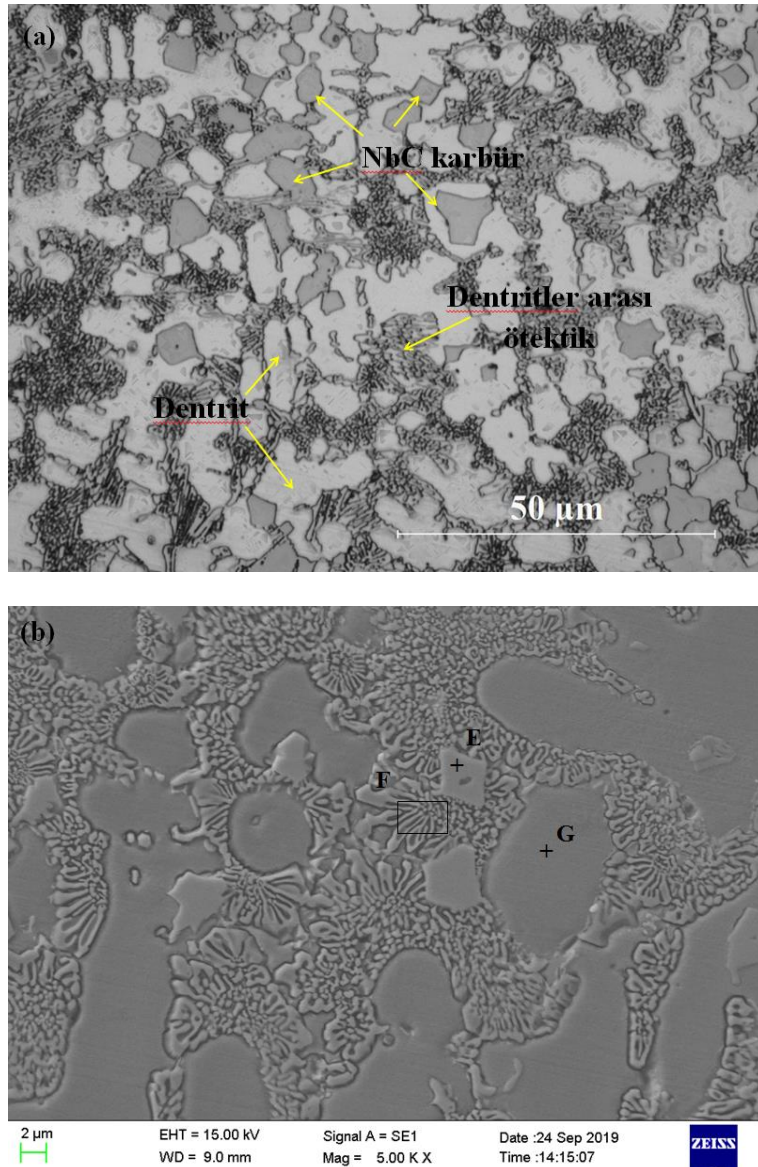
**Şekil 5.** Fe-Cr-C kaplaması: (a)kaplama tabakasının orta bölgesinin yüksek büyütmede optik mikroyapısı (X500), (b) görüntü analiz programıyla renklendirme yöntemi (X500) ve (c) birincil  $M_7C_3$  karbürün SEM görüntüsü (Bu şekildeki açıklamada renk referanslarının yorumlanması için okuyucuya bu makalenin Web versiyonu denir.)

Fe-Cr-C kompozit kaplama tabakasında oluşan  $M_7C_3$  karbürünün yüksek büyütmede görüntüsü Şekil 5’ de verilmiştir. Şekil 5(a)’ da görüldüğü üzere, kaplama tabakası üst yüzey bölgesinde yoğun olarak bulunan, farklı büyüklük ve tipte, ötektik reaksiyon sonucu oluşan  $L \rightarrow Cr-Fe+(Cr,Fe)_7C_3$ , altıgen veya çubuk şeklinde birincil  $M_7C_3$  karbürleri belirlendi. Birincil  $M_7C_3$  karbürünün bu iki oluşum morfolojisi, içerdikleri C oranlarına göre katılma modeli gerçekleştirdiği literatürde belirtilmiştir [16]. Fe-Cr-C alaşımının mikroyapısında, büyük boyutlu birincil  $M_7C_3$  karbürünün, şerit biçimli ötektik faz ile çevrelediği görülmektedir. Karbürlerin yapı içerisindeki miktarı, ergiyik tabakanın katılma sırasında, yapı içerisindeki Cr/Fe ve Cr/C oranlarına [17], katı-sıvı arayüzün aşırı soğuması ve sonuçta katılma gizli ısısının serbest kalmasıyla doğrudan ilişkili olduğu ifade edilmiştir [18]. Şekil 5(b)’ de Clemex görüntü analiz programıyla elde edilen renklendirilmiş görüntü analizi görülmektedir. Birincil  $M_7C_3$  karbürleri Fe-Cr-C sistemlerinde düzgün olmayan altıgen ve sivri uçlu bir morfolojiyle katılma geçirdiği daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [19,20]. Karbür içerdiği C element miktarına bağlı olarak, çubuk sivri uçlu veya altıgen şekilli olabilmektedir. Şekil 5(a)’ de, açık krem renge düzgün altıgen ve sivri uç görümlü  $M_7C_3$  karbürleri, Şekil 5(b)’ de pembe renkli görünümle ve etrafını yeşil renge ötektik matrisin çevrelediği bir mikroyapı belirlenmiştir.  $M_7C_3$  karbürlerinin katılma sırasında büyüme yönü, ısı akışına paralel gerçekleşir. C içeriği az olduğunda karbürlerin büyüme yönü rastgeledir [21]. Kaplamanın C içeriği arttıkça,  $M_7C_3$  oluşumu için çekirdeklenme siteleri artar ve çubuk benzeri kalın ve  $M_7C_3$  karbür bölgeleri de yoğun olur. Şekil 5 (a) ve Şekil 5(b)’ den de görüleceği gibi,  $M_7C_3$  karbürlerinin büyüme yönü saçılma şeklinde rastgele bir dağılım göstermiştir.

**Tablo 2.** Fe-Cr-C kaplamasında birincil  $M_7C_3$  karbür ve matrisin kimyasal bileşimleri (%ağ.)

<b>Bölge</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>
A	2.54	63.69	33.77
B	0.49	26.59	72.92
C	0.30	15.82	83.88
D	1.96	33.62	64.42

Şekil 5(c), Birincil  $M_7C_3$  karbürünün ve ötektik fazın SEM ve EDS analiz noktalarını göstermektedir. Tablo 2 ise bunların kimyasal bileşimlerini sunar. Şekil 5 ve Tablo 2' den, C elementinin etkisinin yanı sıra, güçlü karbür yapıcı olan Cr elementinin sıvı fazdan çökelerek, kromca zengin ve %ağ.2.54 C, %ağ.63.69 Cr ve %ağ. 33.77 Fe element konsantrasyonuna sahip birincil  $M_7C_3$  karbürlerinin katılaştığını göstermektedir. Şekil 5'de açıkça görülmektedir ki, altıgen ve şerit çubuk şeklinde katılaştıran birincil  $M_7C_3$  karbürlerinin ortalarında oyuk şeklinde görünen alan %ağ.0.49 C, %ağ.26.59 Cr ve %ağ. 72.92 Fe bazı kristal kusurlar vardır. Bunun nedeni, sıvı fazdan yüksek sıcaklıkta birincil karbürlerin çökelerek Cr ve C yayılır ve karbür büyür, kristal kusur olarak gösterilen C elementince fakir Fe elementince zengin  $\gamma$ -(Fe,Cr) fazlı bölgeler,  $M_7C_3$  karbürünün içinde hapsolmuş durumda veya karbürü koparmış şekilde belirir [22]. Şekil 5 ve Tablo 2'den, ötektik karbür fazındaki Fe elementi miktarı da yüksek, aksine Cr ve C element miktarları düşüktür (C ve D bölgelerine bakınız). Fe-Cr-C alaşımında ötektik reaksiyon oluşurken dengede olmayan dönüşümle katılma gerçekleşirken, ötektik yapıdaki östenit büyür ve birincil östenit fazı oluşur [23]. Sonuçta, C elementi, östenitten  $M_7C_3$  karbürüne göçü için aşması gereken mesafe fazla olması ve sıcaklığın hızla düşmesiyle de, C ve Cr elementleri henüz katılma göstermeyen bölgelerde daha küçük ötektik karbür oluşturmak için reaksiyona girerler. Soğuma devam ettikçe ve katılma işlemi gerçekleştikçe, birincil  $M_7C_3$  karbürlerini çepeçevre  $\gamma$ -(Fe,Cr) matris yapısı meydana gelir [24].



**Şekil 6.** Fe-Cr-C/NbC kaplaması: (a) Optik mikroyapısı (X1000); (b) NbC karbür ve lamelli ötektik yapının SEM görüntüsü (Bu şekildeki açıklamada renk referanslarının yorumlanması için okuyucuya bu makalenin Web versiyonu denir.)

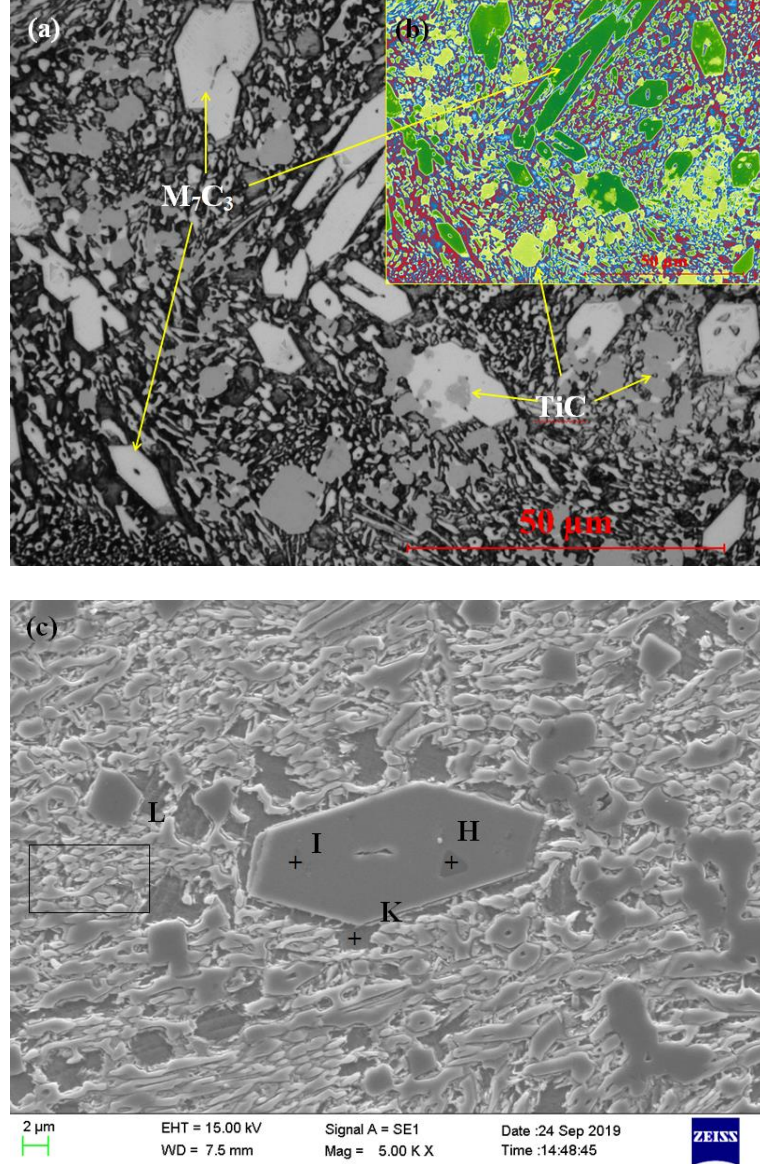
Şekil 6, Fe-Cr-C kaplama tozuna ilave edilen FeNb tozunun ergitilerek katılaşması sonucu meydana gelen mikroyapı değişim karakteristiğini ortaya koymaktadır. Mikroyapı görüntüleri kaplamaların orta ve üst yüzeye yakın bölgelerden alınmıştır. Kaplama matris tozuna FeNb tozunun ilave edilmesiyle üretilen kompozit katmanların mikroyapıları, Şekil 5 ve Şekil 6' dan da görüldüğü gibi, Fe-Cr-C kaplamalarından oldukça farklı bir mikroyapı göstermiştir. Şekil 6(a)' da, Fe-Cr-C/NbC kaplama mikroyapısında kümeleşen küçük tane boyutlu granular ile sferoidal şekillerde karbürlerin varlığı göze çarpmaktadır. Karbür ve matrislerin kimyasal bileşimini bulmak için Enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yapılmıştır ve elementlerin ağırlık değerleri de Tablo 3' de verilmiştir. Şekil 6(b)' da SEM mikroyapısı görülen düzgün dörtgen yapıdan alınan EDS sonucuna göre (E noktası) % ağı.2.32C, %ağı.4.74Cr, %ağı.88.37Nb ve %ağı.3.19Fe elementlerinden oluşan NbC katılaşması gerçekleşmiştir. EDS sonuçları, Şekil 3' de verilen XRD difraktogram sonuçlarıyla birlikte ele alındığında, oluşan yapı NbC karbürünü işaret eder. NbC düzgün dörtgen yapıli karbürün etrafını çepeçevre saran ötektik faz (F kare) %ağı.2.29C, %ağı.40.74Cr, %ağı.1.46Nb ve %ağı.55.51Fe elementlerinden oluşmuştur. Dentritik yapıysa (G noktası) %ağı.0.45C, %ağı.16.08Cr, %ağı.0.09Nb ve %ağı.83.37Fe elementlerine sahiptir.

**Tablo 3.** Fe-Cr-C/NbC kaplamasında NbC ve ötektik yapının kimyasal bileşimleri (%ağı.)

Bölge	C	Cr	Nb	Fe
E	2.32	4.74	88.37	3.19
F	2.29	40.74	1.46	55.51
G	0.45	16.08	0.09	83.37

Fe-Cr-C/%20ağı.TiC kompozitinden alınan yüksek büyütmede  $M_7C_3$  ve TiC karbürlerinin optik mikroyapısı Şekil 7(a)' da ve Clemex görüntü analiz programıyla elde edilen renklendirilmiş görüntü analiziyse Şekil 7(b)' de verilmiştir. Şekil 7(a)' da, açık krem renginde düzgün altıgen görünümüli  $M_7C_3$  karbürleri, Şekil 7(b)' de yeşil renkli görünümle ve etrafını ötektik matrisin çevrelediği bir mikroyapı belirlenmiştir. TiC hem ötektik matriste oluşum gösterirken Şekil 7(a)' dan da görüldüğü gibi açık gri bir tonda ve Şekil 7(b)' de sarı renkle katılaşma göstermiştir. TiC,  $M_7C_3$  karbürleri üzerinde leke şeklinde oluşurken, ötektik matriste dörtgen biçiminde katılaşmalar gerçekleştirdiği belirgindir. Şekil 7(c)' de  $M_7C_3$  ve TiC içeren mikroyapının SEM görünümü ve alınan EDS analiz noktalarını göstermektedir. EDS analiz sonuçları Tablo 4' de verilmiştir. Fe-Cr-C/TiC kompozit kaplamalarında  $M_7C_3$  karbürleri (I noktası) % ağı.2.70C, %ağı.63.82Cr, %ağı.1.68 Ti ve %ağı.31.80Fe elementleriyle katılaşma gösterirken, TiC tanecikleri (H noktası) % ağı.5.80C, %ağı.7.38Cr, %ağı.85.95Ti ve %ağı.0.84Fe elementleriyle katılaşmıştır. Şekil 7(a) optik mikroyapıdaki ötektik matriste koyu gri (Şekil 7(b)' deki kırmızı tondaki yapılar) yapıdan alınan EDS analizine göre (K noktası), % ağı.0.13C, %ağı.18.70Cr ve %ağı.81.17Fe elementlerinden oluşan Fe elementince zengin  $\alpha$ -(Fe,Cr) yapılar  $M_7C_3$  ve TiC tanelerini çepeçevre sarmıştır. Ötektik lamellerin EDS sonuçları ise (L kare); % ağı.1.77C, %ağı.35.22Cr, %ağı.2.85Ti ve %ağı.60.16Fe' dir. Fe-Cr-C sistemlerinde  $M_7C_3$  karbürünün embriyolaşma oluşum mekanizmasının anlaşılması ve ergime noktasının tayini üzerine yapılan çalışmalarda [25],  $T_m \approx 1625 \pm 5$  K olduğu ve yapı içerisinde Ti elementi ilavesiye karbürlerin rafine edildiği ifade edilmiştir. MC(Ti,Nb)' de  $M_7C_3$  karbürü ve ötektik fazlarla kıyaslandığında, Gibbs serbest enerjisi düşük olduğu için erimiş havuzun katılaşması sırasında yüksek ergime değerine sahip Ti ve Nb atomları, C elementine olan afinitisinin yüksek olmasından dolayı, tercihen MC oluşturmak üzere geometrik bloklar halinde çekirdeklerler [26]. Katılaşma sürecinde MC fazı sıvı fazdan 1570 °C' de çökeler. Sıcaklığın azalmaya devam etmesiyle 1297 °C' de Fe ve Cr elementlerince zengin  $M_7C_3$  karbürleri çökelmeye devam eder [27]. Son aşamada ise az miktarda alaşım atomu içeren sıvı faz,  $\gamma$ -(Fe,Cr) ile ötektik yapı oluşturarak katılaşma sonlanır. Şekil 6 ve Şekil 7' de görüldüğü gibi, düzgün üçgen ve dörtgen yapıli MC karbürleri, hem  $M_7C_3$  karbürleri üzerinde hem de ötektik  $\gamma$ -(Fe,Cr) matrisi ve  $\alpha$ -Fe dentritik yapı içerisinde düzgün ve homojen dağıldığı ve literatürle uyumlu olduğu görülebilir [28,29].





**Şekil 7.** Fe-Cr-C/TiC kaplaması: (a) Optik mikroyapısı ve görüntü analiz programıyla renklendirme yöntemi (X1000) (Bu şekildeki açıklamada renk referanslarının yorumlanması için okuyucuya bu makalenin Web versiyonu denir.); (b)  $M_7C_3$  ve TiC karbürün SEM görüntüsü

**Tablo 4.** Fe-Cr-C/TiC kaplamasında birincil  $M_7C_3$  karbürü, TiC ve ötektik yapının kimyasal bileşimleri (%ağ.)

Bölge	C	Cr	Ti	Fe
I	2.70	63.82	1.68	31.80
H	5.80	7.38	85.98	0.84
K	0.13	18.70	-	81.17
L	1.77	35.22	2.85	60.16

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, TIG metoduyla SAE4140 çelik yüzeyinde üretilen Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C kompozit kaplamaların mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Yeterli ısı girişi ve tam erime nedeniyle, kaplama




tabakaları ile çelik altlık arasındaki bağlantı metalürjiktir. Kaplama katmanlarının mikro yapısı, kaplama tabakası/alt tabaka arayüzeyin üst kısımlarında sütun, kristal ve ince dendrit iken, Fe-Cr-C kaplama bölgesi üst yüzey bölgelerinde Cr ve C elementlerince zengin altıgen şekilli  $M_7C_3$  karbürleri ve ötektik yapılar oluşmuştur. FeNb ilaveli kompozit tabakada, erimiş havuzda çözünen ve hem ötektik matris hem de dendritik yapı içinde katılan Nb ve C elementlerinin kimyasal reaksiyonuyla dörtgen NbC karbürleri oluşmuştur. TiC ilaveli kompozit katmanında, hem  $\gamma$ -Fe,Cr ötektik yapıda hem de  $M_7C_3$  karbür üstünde TiC takviyeleri yeniden katılma geçirmişlerdir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sahoo C.K., Soni L., Masanta M. (2016). Evaluation of microstructure and mechanical properties of TiC/TiC-steel composite coating produced by gas tungsten arc (GTA) coating process, *Surface and Coatings Technology*, 307, 17–27.
- [2] Wu X.J., Xing J.D., Fu H.G., Zhi X.H. (2007). Effect of titanium on the morphology of primary  $M_7C_3$  carbides in hypereutectic high chromium white iron, *Materials Science and Engineering: A*, 457, 180-185.
- [3] Berns H. (2003). Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy, *Wear*, 254, 47-54.
- [4] Xing J.D., Gao Y.M., Wang E.Z., Bao C.G. (2002). Effect of phase stability on the wear resistance of white cast iron at 800 °C, *Wear*, 252, 755-760.
- [5] R. Veinthal, F. Sergejev, A. Zikin, R. Tarbe, J. Hornung. Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays, *Wear*, 301 (102-108), (2013).
- [6] Fan C., Chen M.C., Chang C.M., Wu W. (2006). Microstructure change caused by  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys, *Surface and Coatings Technology*, 201, 908-912.
- [7] Lu L., Soda H., McLean A. (2003). Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C eutectic composites, *Materials Science and Engineering A*, 347, 214-222.
- [8] Xu J., Liu W. (2005). Wear characteristic of in situ synthetic  $TiB_2$  particulate-reinforced Al matrix composite formed by laser cladding, *Wear*, 12, 561-567.
- [9] Xu X., Mi G., Jiang P., Shao X., Wang C. (2018). Morphologies, microstructures and properties of TiC particle reinforced Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire, *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 16-27.
- [10] Rasool G., Stack M.M. (2014). Wear maps for TiC composite based coatings deposited on 303 stainless steel, *Tribology International*, 74, 93-102.
- [11] Wang Z., Zhou X., Zhao G. (2008). Microstructure and formation mechanism of in-situ TiC- $TiB_2$ /Fe composite coating, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18, 831-835.
- [12] Monfared A., Kokabi A.H., Asgari S. (2013). Microstructural studies and wear assessments of Ti/TiC surface composite coatings on commercial pure Ti produced by titanium cored wires and TIG process, *Materials Chemistry Physics*, 137, 959-966.
- [13] Mridha S. (2005). Titanium nitride layer formation by TIG surface melting in a reactive environment, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 471-477.
- [14] Zhang M., Jing M. L., Wang C. S., Ren L., Fang M. (2019). Microstructure and tribology properties of in-situ MC(M:Ti,Nb) coatings prepared via PTA technology, *Vacuum*, 160, 264-271.

- [15] Wang X.-N., Chen X.-M., Sun Q., Dib H.-S., Sun L.-N. (2017). Formation mechanism of  $\delta$ -ferrite and metallurgy reaction in molten pool during press-hardened steel laser welding. *Materials Letters*, 206, 143-145.
- [16] Chang C.-M., Chen L.-H., Lin C.-M., Chen J.-H., Fan C.-M., Wu W. (2010). Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe–Cr–C cladding with various carbon contents, *Surface and Coatings Technology*, 205, 245-250.
- [17] Leško A., Navara E. (1996). Microstructural characterization of high-carbon ferrochromium, *Materials Characterization*, 36, 349-356.
- [18] Chang C.-M., Chen Y.-C., Wu W. (2010). Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy, *Tribology International*, 43, 929-934.
- [19] Chatterjee S., Pal T.K. (2003). Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron, *Wear*, 255, 417-425.
- [20] Liu S., Zhou Y., Xing X., Wang J., Yang Y., Yang Q. (2016). Agglomeration model of  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy, *Materials Letters*, 183, 272-276.
- [21] Chang C.-M., Chen L.-H., Lin C.-M., Chen J.-H., Wu W. (2010). Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe–Cr–C cladding with various carbon contents, *Surface and Coatings Technology*, 205, 245-250.
- [22] Ma S., Xing J., He Y., Li Y., Huang Z., Liu G., Geng Q. (2015). Microstructure and crystallography of  $\text{M}_7\text{C}_3$  carbide in chromium cast iron, *Materials Chemistry and Physics*, 161, 65-73.
- [23] Yang J., Tian J., Hao F., Dan T., Ren X., Yang Y., Yang Q. (2014). Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe–Cr–C alloy hardfacing metals with different  $\text{La}_2\text{O}_3$  additives, *Applied Surface Science*, 289, 437-444.
- [24] Wang Y., Gou J., Chu R., Zhen D., Liu S. (2016). The effect of nano-additives containing rare earth oxides on sliding wear behavior of high chromium cast iron hardfacing alloys, *Tribology International*, 103, 102-112.
- [25] Hornung J., Zikin A., Pichelbauer K., Kalin M., Kirchgaßner M. (2013). Influence of cooling speed on the microstructure and wear behaviour of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacings, *Materials Science and Engineering: A*, 576, 243-251.
- [26] Li Q., Lei Y., Fu H. (2015). Growth Characteristics and Reinforcing Behavior of In-situ NbCp in Laser Cladded Fe-based Composite Coating, *Journal of Materials Science and Technology*, 31, 766-772.
- [27] Zhou Y.F., Yang Y.L., Yang J., Zhang P.F. (2013). Wear resistance of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacing coatings with in situ formed TiC, *Surface Engineering*, 29, 5-12.
- [28] Zhi X., Xing J., Fu H., Gao Y. (2008). Effect of titanium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron, *Materials Characterization*, 59, 1221-1226.
- [29] Lin C.M., Lai H.H., Kuo J.C., Wu W. (2011). Effect of carbon content on solidification behaviors and morphological characteristics of the constituent phases in Cr-Fe-C alloys, *Materials Characterization*, 62, 1124-1133.

## Numerical Analysis by RNG k-ε Turbulent Model of a Concentric Tube Heat Exchanger with Coiled Wire Turbulator

 Hacı Mehmet ŞAHİN<sup>1,\*</sup>  Ali Rıza DAL<sup>2</sup>  Medine ÖZKAYA<sup>3</sup> 
<sup>1</sup>Karabük University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, KARABÜK

<sup>2</sup>Ministry of Transport and Infrastructure, Çankaya/ANKARA

<sup>3</sup>Gazi University Technical Sciences Vocational School, Ostim/ ANKARA

### Article Info:

Research article

Received: 27/09/2019

Revision 11/12/2019

Accepted: 21/12/2019

### Highlights

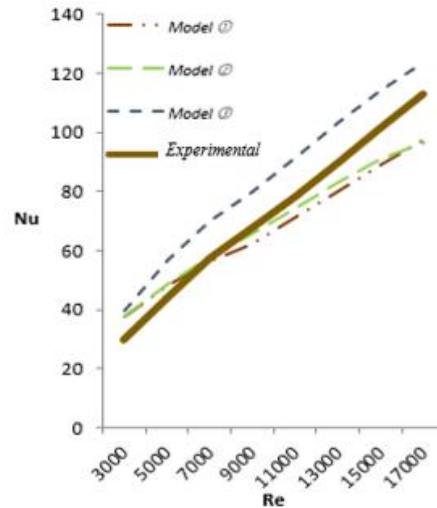
- RNG k-ε model.
- CFD analysis.
- Coiled wire turbulator.

### Keywords

 Turbulator  
 CFD Analysis  
 RNG k-ε  
 Heat Exchangers

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a concentric tube heat exchanger with coiled wire turbulators were analysed numerically by a CFD code namely ANSYS FLUENT using RNG k-ε Turbulent Model in order to be reduced heat exchanger sizes and increased heat transfer enhancement.



**Figure A.** The changing of numerical Nu number according to Re number

**Purpose:** In this study, it is aimed to compare numerical models with an experimental system previously study in literature by using passive method one of heat transfer enhancement of a concentric tube heat exchanger with coiled wire turbulators.

**Theory and Methods:** The analyses were done in a range of Reynolds ( $Re$ ) number from 3000 to 18000. The numerical simulations were done by using a CFD code namely ANSYS FLUENT, using finite volume method. In numerical analysis, three main turbulence models of RNG k-ε were employed in the simulations such as *Model 1* (RNG-Standard wall function), *Model 2* (RNG-Non-Equilibrium wall function) and *Model 3* (RNG-Enhanced wall treatment).

**Results:** The numerical analyses carried out to compare with the experimental results in order to determine the best fitting model using each three main turbulence models of RNG k-ε model, Model 1 has given the best fitting result.

**Conclusion:** When turbulence models are compared with experimental results; *Model 1* has given more fitting result than *Model 2*. Model 3 is far from experimental results compared to other solutions. No k-ε model is not fitting with the data obtained from the experiment results in the  $Re$  Number range of  $3000 \leq Re \leq 7000$ . When close to  $Re$  number value of 7000, the  $Nu$  number values obtained by Model 3 have been far from experimental results.





## İç İçe Borulu Yay Tipi Türbülantör Bir Isı Değiştiricisinin RNG k-ε Türbülans Modeli ile Sayısal Analizi

Hacı Mehmet ŞAHİN<sup>1,\*</sup> Ali Rıza DAL<sup>2</sup> Medine ÖZKAYA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, KARABÜK

<sup>2</sup> Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Çankaya/ANKARA

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ostim/ ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, eşmerkezli iç içe borulu bir ısı değiştiricisinin boyutlarının azaltılması ile ısı transferinin iyileştirilmesi ve sürtünme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yay tipi türbülantör kullanarak, RNG k-ε modeli ile sayısal analizler yapılmıştır. Çalışmalar Reynolds ( $Re$ ) sayısının 3000 ila 18000 aralığında yapılmıştır. Sonlu Hacimler Metoduna dayalı ANSYS-fluent adlı bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sayısal analizlerde, Model ① (RNG-Standard wall function), Model ② (RNG-Non-Equilibrium wall function) ve Model ③ (RNG-Enhanced wall treatment) üç temel türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu nedenle, deneysel ve sayısal analizlerle RNG k-ε modelinin üç temel türbülans modeli arasında karşılaştırma yapılarak, en iyi sonucu Model ① türbülans modeli vermiştir.

### Numerical Analysis by RNG k-ε Turbulent Model of a Concentric Tube Heat Exchanger with Coiled Wire Turbulator

#### Abstract

In this study, a concentric tube heat exchanger with coiled wire turbulators were analysed numerically by RNG k-ε Turbulent Model in order to be reduced heat exchanger sizes, increased heat transfer enhancement and to be obtained friction characteristics. The analyses were done in a range of Reynolds ( $Re$ ) number from 3000 to 18000. The numerical simulations were done by using a CFD code namely ANSYS fluent, using finite volume method. Three main turbulence models of RNG k-ε were employed in the simulations such as Model ① (RNG-Standard wall function), Model ② (RNG-Non-Equilibrium wall function) and Model ③ (RNG-Enhanced wall treatment). Therefore, the numerical analyses carried out to compare with the experimental results in order to determine the best fitting model using each three main turbulence model of RNG k-ε model, Model ① has given the best result.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 27/09/2019  
Düzeltilme: 11/12/2019  
Kabul: 21/12/2019

#### Anahtar Kelimeler

Türbülantör  
HAD Analiz  
RNG k-ε  
Isı Değiştiricileri

#### Keywords

Turbulator  
CFD Analysis  
RNG k-ε  
Heat Exchangers

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride; yüksek sıcaklıktaki ısı üretimi ve depolanması güneş enerjisinin yaygın olarak kullanımına imkan sunmaktadır. İç içe borulu ısı değiştiricileri, termal depolama sistemleri ve parabolik oluk sistemi gibi güneş enerjisi santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı değiştiricisi boyut ve maliyetin azaltılmasında kullanılan yay tipi türbülantörler ısı transferinin iyileştirilmesinde en önemli parametredir. Isı transferini artırmak için ısı değiştiricilerde yüzeyler büyütülmektedir. Büyüyen yüzeyle beraber, ısı değiştiricisinin alanı da büyümektedir. Bunun önüne geçmek için ısı değiştiricisinin içerisine yerleştirilecek bir türbülantör ile ısı transfer katsayısı büyütülürken ısı değiştiricisinin kapladığı alan sabit kalacaktır. Türbülantörler, ısı transfer verimliliğini arttırırken basınç düşmesine neden oldukları için sistem bazen ilave pompa gücüne ihtiyaç duyabilir. [1]. Ancak ısı transferi artışına karşı ilave pompa gücünün birçok sistemde ihmal edilebilir seviyede olduğu da görülmektedir [2]. Isı transferindeki artış yüzey alanının

büyütülmesinden daha ziyade ısı taşınım katsayısının artırılmasıyla ilgilidir. Isı taşınım katsayısını arttırmak için ısı değiştiricilerinde türbülansı artıran türbülatorler kullanılır. Türbülatorle akışta, akışın sınır tabakasının parçalanması, akış ortamına ek türbülans verilmesi, akış ortamında ikincil akışların oluşması ve akışkanın döndürülerek akış yolunun uzamasının sağlanması gibi etkiler verilmektedir [3]. Günümüzde deneysel uygulama düzeneklerinin pahalı ve zaman alıcı olmasından dolayı en az maliyetle, hızlı bir şekilde ve doğru olarak çözümlenebilen bilgisayar programları (HAD) geliştirilmiştir. Bu programlardan biri de büyük kolaylık sağlayan ANSYS FLUENT programıdır [4]. Bu program ile ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi problemler modellenerek çözümlenmektedir.

Bu çalışmada, ısı transferini iyileştirme metodu olan pasif yöntem kullanılarak iç içe borulu yay tip bir ısı değiştiricisi kullanılarak, sayısal modellerle daha önce literatürde çalışılmış olan bir deneysel sistemin karşılaştırılması amaçlanmıştır [3]. Bu nedenle, en iyi uyumu sağlayacak türbülans modeli belirlemek amacıyla ANSYS FLUENT programı kullanılmıştır. ANSYS FLUENT paket programında bulunan RNG k-ε türbülans metodlarından farklı üç türbülans modeli kendi aralarında ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılarak, en iyi türbülans modelin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE SEARCH)

Literatürde, iç içe borulu ısı değiştiricilerin ısı transferi iyileştirmeleri, pasif yöntemeye dayalı girdap akış cihazları kullanılarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [5-8]. Açısal V-nozul, konik-nozul, konik halka, bükülmüş-bant, vida-bant geometrik şekilli türbülatorlerin bulunduğu dairesel bir tüpte deneysel olarak ısı transferi ve sürtünme özellikleri gibi araştırmalar da yapılmıştır [9-12]. Kongkaitpaiboon ve arkadaşlarının çalışmaları deneysel olup, farklı açılara sahip dairesel-halkalar, 27°C’de ortam sıcaklığında ve tek tip duvar ısı akışı koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Re sayısı 4000-20000 aralığında almışlardır [13]. Aköz ve arkadaşları tarafından kritik üstü açık kanal akımının üç boyutlu sayısal analizi, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS- FLUENT ile yapılmıştır. Sayısal hesaplamalarda türbülanslı akımın karakteristiklerinin belirlenmesinde Large Eddy ve Realizable k-ε tabanlı Detached Eddy Simülasyonu kullanılmıştır [14]. Ekici ve Özcan tarafından yapılan çalışmada HAD içerisinde yer alan bir sayısal yöntem olan Lattice Boltzmann Yöntemi (LBM) hem teorik hem de uygulamalı şekilde ele alınmıştır. Lattice Boltzmann yönteminin diğer HAD yöntemlerinden temel farklılığı, bir akış probleminde gerçekleşen fiziksel olayları hangi düzeyde incelediği ile ilgilidir [15]. Zhang ve Tian, dalga yüzeyli levha ısı değiştiricilerinde dalga eğim açısının ısı geçişi ve basınç düşümü üzerindeki etkilerini yaptıkları sayısal çalışmalarında RNG k-ε modeli kullanmışlardır. Sayısal sonuçların önceki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu bulunmuşlardır [16]. Gimbun ve ark. CFD FLUENT yazılımını kullanarak basınç düşümü, giriş hızı ve sıcaklığın etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı türbülans modellerini yaparak deneysel veriler ile karşılaştırmış ve zaman ve kolaylık açısından en uygun türbülans modelinin RNG k-ε modeli olduğunu belirtmişlerdir [17]. Eimsa-ard ve Promvong tarafından yapılan çalışmada; iki boyutlu periyodik oluklu kanal içerisinde türbülanslı zorlanmış taşınım halinde k-ε, RNG k-ε, k-ω ve Kayma Gerilmesi Taşınımı (SST) olarak adlandırılan dört türbülans modelini sayısal analiz kullanarak yapmışlardır. RNG ve k-ε türbülans modellerinin, mevcut deneysel sonuçlara ve diğer türbülans modellerinden daha iyi sonuç verdiğini belirlenmişlerdir. Isı geçişinde oluklu kanalların düz paralel kanallara göre %158 oranında iyi olduğunu bulmuşlardır [18].

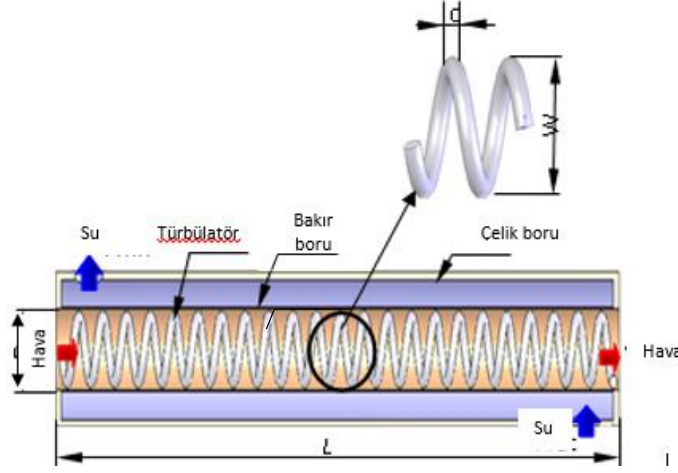
Isı değiştiricilerinin deneysel olarak incelenmesi, ilgili araçların yüksek maliyeti nedeniyle etkili ancak çok pahalı bir metottur. Bu nedenle, literatürde birçok çalışma sadece sayısal olarak yapılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalar karşılaştırıldığında, sayısal olarak yapılan çalışmaların en uygun modeli seçilerek deneysel çalışma şartlarında kullanıldıkları görülmektedir.

## 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 3.1. Test Sisteminin Yapısı (Structure of Test System)

Önceki çalışmalarda [2,3,5] detayları verilen deneysel çalışmada iç içe borulu paralel yönlü zıt akışlı bir ısı değiştiricisi kullanılmıştır. Hava sürekli rejim ve türbülanslı akış şartlarını sağlamak için sistemde türbülator olarak çeşitli adımlara sahip yay kullanılmıştır. Deneyler Re sayısının 3000 ile 18000 aralığında türbülanslı olarak yapılmıştır [3]. Test bölümünde Şekil 1’de gösterilen deney düzeneğinde; türbülator

olarak kullanılan yayın adımı 30 mm ve boyu 1000 mm'dir. İç boruda meydana gelen basınç kayıpları U tipi sulu manometreyle ölçülmüştür. Isı değiştiricide hava ve suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları, bakır borunun yüzey sıcaklığı, ısıl çiftler ve veri kaydedici aracılığı ile Sistem sürekli rejim şartlarında bilgisayara kaydedilmiştir. Isı değiştiricide suyun bir debimetre seçilerek debisi ölçülmüştür [3].



Şekil 1. Türbülatorlü eşmerkezli borulu ısı değiştiricisinin şematik gösterilmesi [2]

### 3.1. Matematik Model ve Temel denklemler (Mathematical Model and Main Functions)

ANSYS FLUENT birçok türbülans modeli kullanarak çözüm yapmaktadır. Uygulamalarda en uygun model seçimini yapmak için, çeşitli sınırların belirtilmesi gerekmektedir. Türbülans modellerde uygulamanın hangi model için en iyi olduğunu kategorik olarak belirtmek imkansızdır. Türbülans modelin seçimi, problemin tespiti ile deneysel uygulamalar, gerekli doğruluk seviyesi, mevcut hesaplama kaynakları ve simülasyon için uygun zaman miktarı gibi hususlara bağlı olmaktadır. Modellemek istediğimiz akış için uygun türbülans modelini seçmemize ANSYS FLUENT yardımcı olmaktadır [4]. Bu çalışmada kullanılan denklemlerin çözümünde ideal akış şartlarında herhangi bir enerji kaybına uğramadığı kabulü yapılarak çözüm elde edilmiştir. Akışkan akımlarının sürtünme etkileri son derece küçük olabilmektedir.

Enerjinin Korunumu Denklemi: Silindirik koordinatlarda üç boyutlu enerji eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu q \right] \quad 1$$

Sürekliplik denklemi: Diferansiyel kontrol hacmi için sürekliplik denklemi silindirik koordinatlarda sıkıştırılmaz akışkanlar için aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (u_z)}{\partial z} \quad 2$$

Navier-Stokes Denklemleri: Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemlerinin r bileşeni:

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \quad 3$$

Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemlerinin  $\theta$  bileşeni:

$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \quad 4$$

Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemlerinin z bileşeni:

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \quad 5$$

Bu denklemlerde;  $\rho$  yoğunluk,  $u$  hız,  $\mu$  dinamik viskozite,  $P$  basınç,  $k$  termal iletkenlik,  $T$  akışkan sıcaklığı ve  $c_p$  özgül ısıdır.

ANSYS FLUENT türbülans modeliyle ilgili yapılan çalışmada normalizasyon grup teorisi olarak adlandırılan RNG k- $\varepsilon$  modeli; Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiştir [19, 20]. Bu model statiksel teknik kullanılarak elde edilmektedir. RNG k- $\varepsilon$  modelinde zorlanmış akışlar için doğruluğu geliştiren  $\varepsilon$  denkleminin içerisine ilave terim eklenmiştir. Ayrıca, RNG k- $\varepsilon$  modeline girdaplı akışlar için türbülans girdap etkisi eklenmiştir. RNG k- $\varepsilon$  modeli düşük  $Re$  sayısı etkilerini hesaba katan efektif viskozite ( $\mu_e$ ) için analitik olarak türetilmiş diferansiyel formül sağlamaktadır [4].

RNG k- $\varepsilon$  modelinin iletim denklemleri  $k$  ve  $\varepsilon$  için sırasıyla;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad 6$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad 7$$

Burada;  $G_k$  ortalama hız gradyanları nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjidir.  $G_b$  ise kaldırma kuvvetinden dolayı oluşan türbülans kinetik enerjidir.  $Y_M$  sıkıştırılabilir türbülantta dalgalı genişleme dağılımıdır.  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$  sırasıyla  $k$  ve  $\varepsilon$  için ters prandtl sayılarıdır [4].

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\mu_e / \mu}{(\mu_e / \mu)^3 - 1 + C_v} d(\mu_e / \mu) \quad 8$$

Denklem 8'de görülen adi diferansiyel denklem düşük  $Re$  sayısı ile duvar etrafındaki akışların daha iyi hale getirmektedir. Bu denklemde  $C_v \cong 100$  olarak ifade edilmektedir. Yüksek  $Re$  sayılarında;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 9$$

Yazılabilir.

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad 10$$

Burada;  $C_\mu = 0.0845$ ,  $\mu_e$  efektif viskozite,  $\mu$  akışkan viskozitesi ile  $\mu_t$  türbülans viskozitesi toplamıdır. RNG modeli türbülantlı viskoziteyi uygun bir şekilde düzelterek dönme ve girdap etkisini hesaba katmaya imkân sağlamaktadır. Bu düzeltme biçimi;

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left( \alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon} \right) \quad 11$$

fonksiyonu kullanılmıştır. Burada;  $\mu_{t0}$  girdap düzeltmesi olmayan türbülans viskozitesi değeridir.  $\Omega$  karakteristik girdap sayısı olup,  $\alpha_s$  girdap sabitidir. Üç boyutlu, girdaplı ve aksel akışlar için bu etkiyi her zaman kullanmaktadır. Hafif derece girdaplı akışlar için  $\alpha_s = 0.05$  alınmaktadır. Ancak güçlü girdaplarda yüksek  $\alpha_s$  değerleri kullanılır [4]. Ters efektif prandtl sayısı  $\alpha_k$  ve  $\alpha_\varepsilon$ , RNG teorisinden analitik olarak türetilmesi ile kullanılmaktadır.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 + 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu}{\mu_e} \quad 12$$

Burada  $\alpha_0 = 1$ 'dir. Yüksek  $Re$  sayılarında  $\mu/\mu_e \ll 1$ ,  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \cong 1.393$  olmaktadır. RNG k- $\varepsilon$  modelinde,  $\varepsilon$  denklemindeki ilave terim;

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad 13$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada;  $\eta$ , türbülans kinetik enerjisinin üretimi olup;

$$\eta = \sqrt{\frac{G_k}{\rho C_\mu \varepsilon}} \quad 14$$

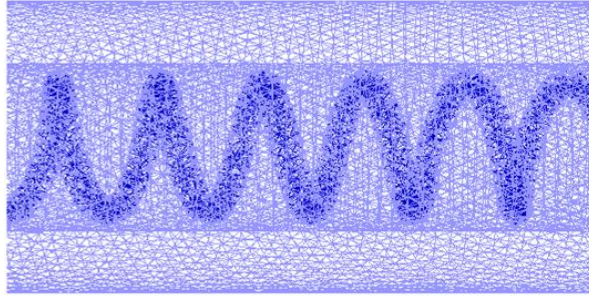
şeklinde ifade edilir. Bu ilave terim; yüksek kayma oranları akım çizgisi eğrilikleri etkileri açısından önemlidir. Kayma oranının kuvvetli olduğu (yüksek  $\eta$ ) durumlarında  $\varepsilon$  değeri artmakta, bu da  $\mu_t$  ve  $k$  değerini azaltmakta yani akıştan daha az enerji çekilmesine yol açmaktadır. Böylece sirkülasyon bölgelerinin büyüklüğü deneysel verilerle benzer çıkmaktadır. Bu modelde kullanılan sabitler [4]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012$$

Türbülanslı akışlar, duvarların varlığından önemli ölçüde etkilenmektedir. Duvarla türbülans bölgesi arasında viskozite etkilerini ilişkilendirmek amacıyla duvar fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu fonksiyonların kullanılmasıyla türbülans modellerinin düzeltilme gerekliliği ortadan kalkmaktadır. Bu çalışmada *RNG-Standard wall function*, *RNG-Non-Equilibrium wall function* ve *RNG-Enhanced wall treatment* duvar fonksiyonu türbülans modelleri kullanılmıştır [4].

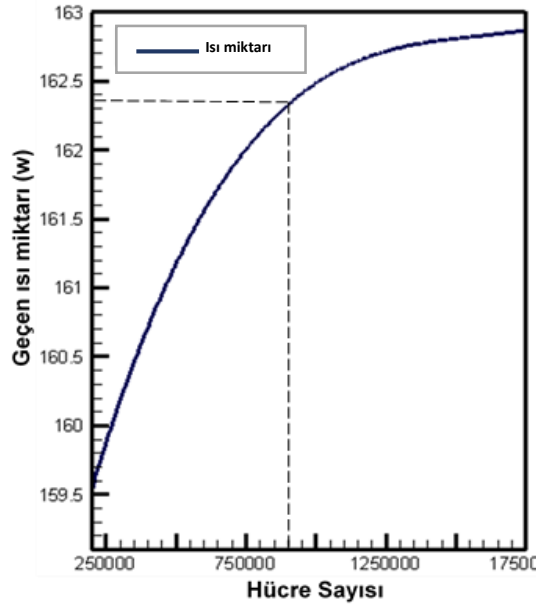
### 3.3. Hesaplama metodu (Calculation Method)

ANSYS FLUENT sıkıştırılmaz orta sıkıştırılabilir ve yüksek sıkıştırılabilir akışlar için bir HAD çözücüsüdür. ANSYS FLUENT'teki fiziksel modellerin zenginliği, ağ uyarlaması ile laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin hassas bir şekilde çözülmesine imkân sağlar [4]. Sayısal çalışmada kullanılan ısı değiştiricisi model ve ağ yapısı GAMBİT programı ile oluşturulmuş ve Şekli 2'de gösterilmiştir. Modelin fiziksel özellikleri GAMBİT programında oluşturulduktan sonra ANSYS FLUENT programında çözülmüştür. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ANSYS FLUENT ticari yazılımı ile çözülmüştür [4]. Çalışmada,  $Re > 3000$  durumunda ve türbülantörler kullanıldığında tam türbülanslı akış olduğu varsayılmıştır [21]. RNG k- $\varepsilon$  türbülans modelleri, ısı transferini ve akışkan karakteristiklerini, yani basınç düşüşünü tahmin etmek ve türbülans viskozitesi için yeni bir formülasyon ve dağılım oranı için ( $\varepsilon$ ) yeni bir denklemi içerir [22]. Şekil 2'de gösterilen model çizimi SOLIDWORKS kullanılarak oluşturulmuş ve daha sonra ağ işlemi için GAMBİT yazılımına aktarılarak yapılandırılmış ve TET/Hybrid ağları ile örülmüştür.



Şekil 2. Sayısal çözücü için oluşturulan model ve ağ yapısı [2]

Çözüm ağı yapısı oluşturulurken eleman kalitesi için göz önünde bulundurulmuş kalite ölçütleri;  $y^+$  değeri, eğiklik (skewness) ve dikey kalite (orthogonal quality) olarak verilmektedir. Bu çalışmada skewness değeri 0.65'den küçük, orthogonal quality değeri 0.2'den büyük bulunmuş ve Şekil 2'deki geometrinin ağ yapısı bu kriterlere göre belirlenmiştir. Çözüm alanında kullanılan ağ yapısının hücre sayısı hesaplama zamanı ve yakınsama zorlukları nedeniyle optimum olmalıdır. Oluşturulan model yapıya ait ağ yapılarının belirli oranda artırılması ile ara yüzeyden geçen ısı transferi ile hücre sayısı tespiti Şekil 3'de [2] görüldüğü gibi yapılmıştır. Ağ yapılarında sayısal sonuçların çok fazla değişmediği durumdaki (% 0,2 hata ile) hücre sayısı belirlenmiştir. Hesaplama alanları, 850000 ÷ 900000 hücre sayılarında, CPU zamanındaki ve bilgisayar kaynaklarındaki sınırlamalar nedeniyle tüm simülasyonlar için kullanılmıştır. Her bir denklem için artıklar  $10^{-3}$ 'ün altına düşene kadar enerji denkleminde ise artıklar  $10^{-6}$ 'nın altına düşene kadar yinelenmiştir [23].



Şekil 3. Ara yüzeyden geçen ısı transferi ile hücre sayısı tespiti

### 3.4. Sınır Şartları ve Gerekli Kabuller (Boundary Conditions and Required Acceptances)

Eşmerkezli iç içe borulu ısı değiştiricide duvar yüzeyleri, akışkan bölgeleri, giriş ve çıkış yüzeyleri GAMBIT programında tanımlanmıştır. Sayısal analizde akışkan olarak kullanılan hava ve suyun girişleri hız ve sıcaklık (Velocity Inlet) olarak girilmiştir. Çıkış koşulları ise normal çıkış (Pressure Outlet) olarak verilmiştir. Bakır borunun iç yüzey bölgesi (wall) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, suyun temas ettiği bütün yüzeyler ve türbülötör yüzeyleri, normal yüzey olarak tanımlanmıştır. Sayısal çözüm yapılırken aşağıdaki diğer sınır şartları kabulleri yapılmıştır. Bunlar;

- Giriş sınırı koşulları; test bölümünün girişindeki hava ve suyun sıcaklığı ve hızı deneylerden alınmıştır.
- Türbülötörlerin ve dış tüpün malzemesi paslanmaz çelik, iç tüp bakır seçilmiştir.
- Akış kararlı durumda ve türbülanslıdır.

- İş akışkanları sıkıştırılmaz.
- Çıkış sınır koşulları; test bölümünden hava ve su çıkışı kabulü yapılmıştır.
- Hava ve suyun termo-fiziksel özellikleri sabit olarak kabul edilmiştir.
- Malzemelerin termo-fiziksel özellikleri sabit olarak alınmıştır.
- Dış boru duvarının adyabatik olduğu kabul edilmiştir.

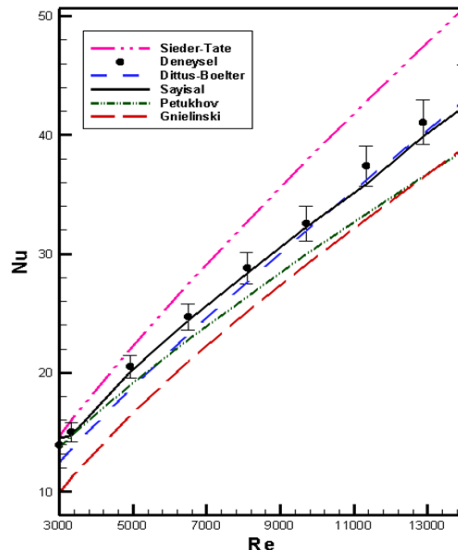
Deneylerde ve hesaplamalarda kullanılan diğer fiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Hesaplama kullanılan ısı değiştiricinin fiziksel özellikleri [2,3,25].

Parametre	Boyut	Parametre	Boyut
Isı değiştirici boyu (L)	1000 mm	Türbülator iç çapı ( $d_{ii}$ )	15 mm
İç boru iç çapı ( $D_i$ )	40 mm	Türbülator dış çapı ( $d_{id}$ )	37 mm
İç boru et kalınlığı ( $t_i$ )	1 mm	Türbülator et kalınlığı ( $t_t$ )	1 mm
Dış boru iç çapı ( $D_d$ )	69 mm	Hava giriş sıcaklığı ( $T_{hg}$ )	373 K
Dış boru et kalınlığı ( $t_d$ )	3.5 mm	Su giriş sıcaklığı ( $T_{sg}$ )	296 K
Su giriş ve çıkış çapları ( $d_s$ )	15 mm	Türbülator adımı mesafesi ( $p$ )	30 mm

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Deneyel çalışmada; kullanılan cihaz ve ekipmanlardan dolayı hatalı hesaplama yapılabilmektedir. Cihaz ve ölçüm aletlerinin hassasiyetlerinden dolayı hata analizi yapılmalıdır. Deneylerden elde edilen verilerde hata görülebilmektedir. Bu hatalar; yanlış sistem tasarımı ve ölçme aleti seçimi, sistematik şekilde devam eden hatalar, rasgele hatalardır [24]. Hata oranlarının deneyel sonuçlarına etkisi tüm şekiller üzerinde gösterilmektedir [23]. Bu sonuçlar neticesinde deneyel çalışmalarla elde edilen veriler ANSYS FLUENT program ile güvenilir olarak çözümlenebilir olduğu anlaşılmıştır. Deney sonuçlarının doğrulanması amacıyla; iç taraftaki havanın kaybettiği ısı enerjisi aynı zamanda taşınım ile yapılan ısı transferine eşit olduğu ve kayıplar ihmal edilerek yapılabileceği düşünülmüştür. Bu analizler Baysal tarafından adım adım verilmiştir. Deneyel sonuçların doğrulanması amacıyla boru içindeki tam gelişmiş akış için literatürdeki ampirik bağıntılar Dittus-Boelter, Sieder-Tate, Petukhov ve Gnielinski'nin ifadeleri kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Deneyel ve sayısal sonuçların literatürde yer alan diğer eşitliklerle uyduğu görüldükten sonra çalışmalara devam edilmiştir. Literatürde yer alan  $Nu$  sayısı ve sürtünme faktörü için ampirik ifadeler [23]'de verilmiştir. Şekil 4'de  $Nu$  sayısının  $Re$  sayısına göre değişimleri, deneyel, sayısal ve ampirik ifadeler (Dittus-Boelter, Sieder-Tate, Petukhov ve Gnielinski) göre verilmiştir [2]. Şekilde görüldüğü gibi,  $Re$  sayısının artmasına bağlı olarak,  $Nu$  sayısı da artmıştır. Deneyel, sayısal ve Dittus-Boelter sonuçların kendi aralarında uyumlu olduğu görülürken, diğer bağıntılarla (Sieder-Tate, Petukhov ve Gnielinski) paralellik içerisindedir. Grafikten görüleceği üzere deneyel sonucun Sieder-Tate, Petukhov ve Gnielinski eşitlikleri ile sırasıyla %11, %-7 ve %-16 ortalama oranında fark bulunmaktadır [23].

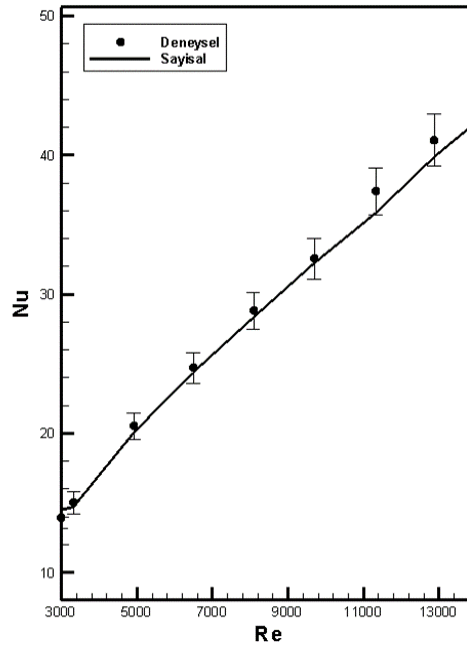


**Şekil 4.** Türbülatorsüz boruda deneyel, sayısal ve ampirik  $Nu$  sayılarının karşılaştırılması [2]



#### 4.1. Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Uyumu (Compliance of Numerical Results with Experimental Results)

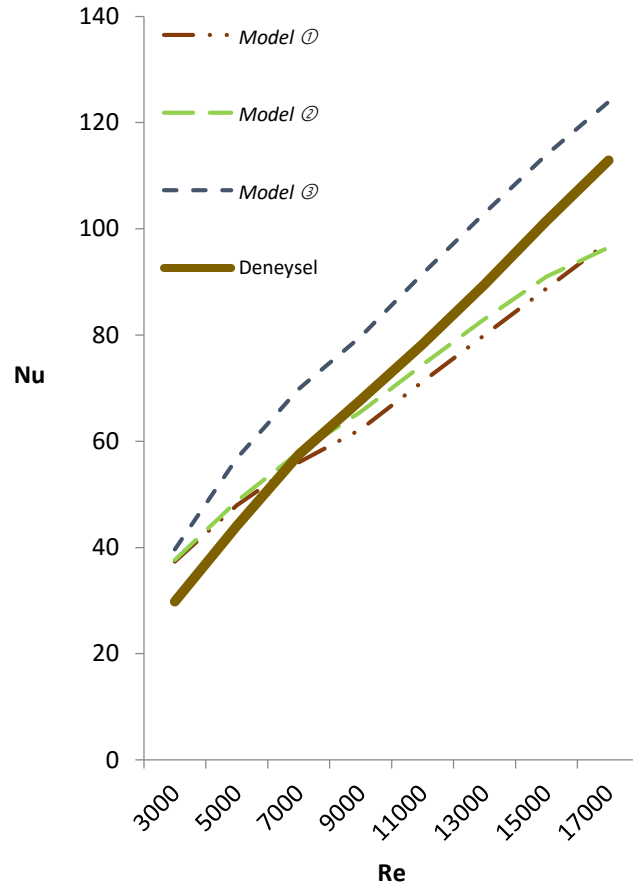
Sayısal çözümlemede elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla [3] karşılaştırılmasında, sayısal sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından önemlidir. Karşılaştırma amacıyla Şekil 5’de hem sayısal hem de deneysel  $Nu$  sayısının  $Re$  sayısına göre değişimi verilmiş olup, deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu ve birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür. Deneysel sonuçlar [2] ve sayısal sonuçları karşılaştırmak amacıyla; aynı geometri ve aynı deney şartları kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Böylece; literatürde eksik olan türbülans modellerinin etkileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak incelenmiş ve yeni korelasyonlar türetilmiştir. Bu çalışmada ANSYS FLUENT programında bulunan RNG k- $\epsilon$  türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu modeller: **Model ①**: RNG-Standard wall function, **Model ②**: RNG-Non-Equilibrium wall function ve **Model ③**: RNG-Enhanced wall treatment’ dir.



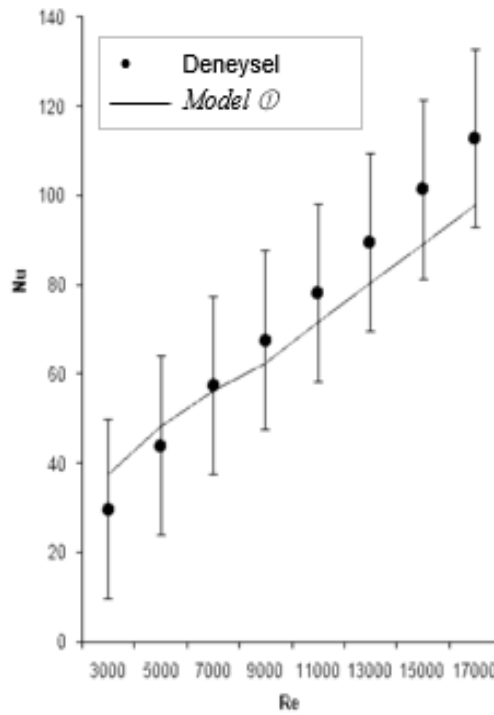
Şekil 5. Deneysel ve sayısal  $Nu$  sayılarının  $Re$  sayısına göre değişimi

#### 4.2. Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi (Evaluation of Numerical Results)

Deneylerden elde edilen sonuçlar ile sayısal sonuçlara göre hesaplanan  $Nu$  sayısının  $Re$  sayısına göre değişimi Şekil 6’de gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında; türbülans modellerin deneysel sonuçlarla uyumluluğunu sıraladığımızda; **Model ①**’in **Model ②** göre daha uyumlu sonuç vermiştir. **Model ③** diğer çözümlere oranla deneysel sonuca daha uzaktır. Şekil 6 incelendiğinde;  $Re$  Sayısının  $3000 \leq Re \leq 7000$  aralığında hiçbir k- $\epsilon$  modeli deneyden elde edilen veri [2] ile çakışmamaktadır.  $3000 \leq Re \leq 7000$  aralığında 7000 değerine yaklaştıkça **Model ③** ile elde edilen  $Nu$  sayısı değerleri deneysel sonuçlardan uzaklaşmıştır. **Model ①**, **Model ②**,  $Nu$  sayıları deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. **Model ②** çözümünün  $Nu$  sayısı  $Re$  sayısının 3000 değerinden 7000 değerine gidildikçe deneysel  $Nu$  sayısına yaklaşmış ve  $Re$  sayısının 7000 değerinde ise deneysel değerlerle tamamen aynı sonucu vermiştir.  $7000 \leq Re \leq 13000$  aralığında paralellik göstermiş,  $13000 \leq Re \leq 18000$  aralığında ise deney sonuçlardan uzaklaşmıştır. Şekil 7’de; **Model ①** çözümünün  $Nu$  sayısı  $Re$  sayısının  $3000 \leq Re \leq 5000$  aralığında deneysel sonuçlarla paralel olduğu görülmektedir.  $Re$  sayısının 5000’den 7000’e yaklaştıkça deneysel değerlere yaklaşmaktadır.  $Re$  sayısı 7000 iken deneysel değerlerle [2] aynı sonucu vermektedir.  $Re$  sayısı 7000’den 18000’ne yaklaştıkça değerler birbirinden bir miktar uzaklaşmıştır.



Şekil 6. Sayısal Nu sayısının Re sayısına göre değişimi



Şekil 7. Deneysel ve Sayısal Nu sayısının Re sayısına göre değişimi (Model ①)

$Re$  sayısının  $\sim 11500$  değeri için üç boyutlu sayısal modelden aksenal  $0,45\text{ m} - 0,55\text{ m}$  aralığında alınan iki boyutlu hız dağılımı, türbülantorsüz ve adım mesafesi  $30\text{ mm}$  olan türbülantörlü ısı değiştiricisi için Şekil 8'da verilmiştir. Şekil 8'de [2] görüldüğü üzere türbülantörün etkisi türbülantlı akışı artmakta bu da boru akseni boyunca daha fazla girdap oluşmasına sebep olmaktadır. Boru içindeki akışta en yüksek hız değerleri boru akseni bölgelerinde oluşmaktadır.

Üç boyutlu modelin eksen boyunca orta kısmından alınan sıcaklık dağılımı Şekil 9'da [2]  $Re \sim 11500$  değerinde türbülantorsüz ve  $30\text{ mm}$  adıma sahip ısı değiştiricisi için verilmiştir. Boru içindeki türbülantörün etkisinden dolayı sıcak akışkan havanın giriş bölgesinden orta bölgelere gidildikçe akışkan sıcaklığı daha hızlı düşmektedir. Bu durum türbülantör kullanımının daha fazla ısı transferi sağladığının bir göstergesidir. Böylece aynı ısı kapasitesindeki ısı değiştiricisi için türbülantör kullanılarak, boyutları daha küçük aynı ısı kapasitesine sahip ısı değiştiricisi üretiminin yapılabilir olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca bu çalışmada,  $Re$  sayısının  $3000-18000$  aralığında hem deneysel hem de sayısal olarak elde edilen sonuçlara dayalı  $Nu$  boyutsuz sayısını veren ve  $Re$  ve  $Pr$  sayılarına bağlı yeni korelasyonlar elde edilmiştir.

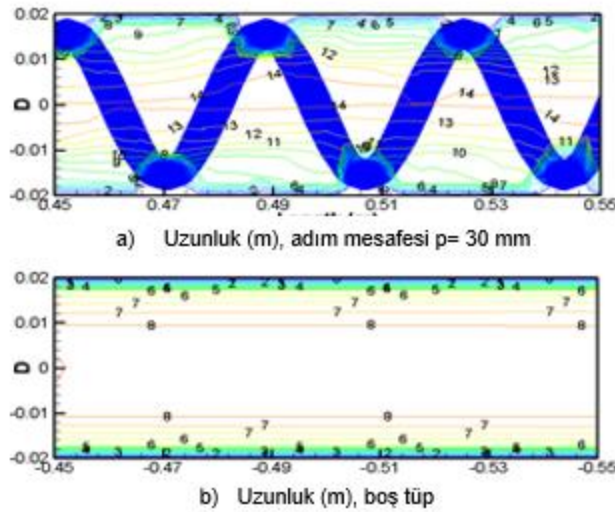
$$Nu = C Re^m Pr^n \quad 15$$

Burada hava için  $Pr = 0.7$  akışkanın soğuma durumu için  $n = 0,3$  alınarak, bu değerler sabit olduğundan korelasyonları daha da basitleştirmek için;

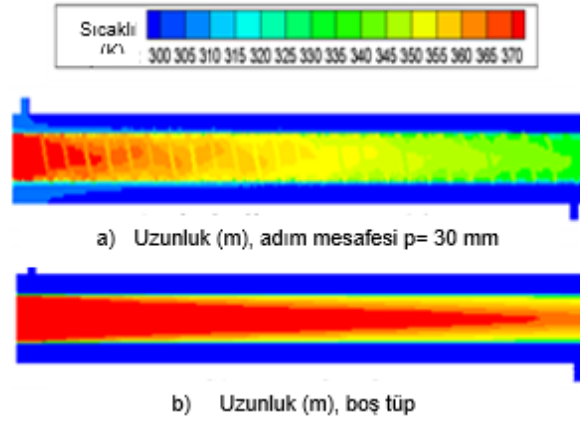
$$Nu = C Re^m \quad 16$$

eşitliğine (16) indirgenmiştir. Şekil 10'da Model ③ için sonuçlar görülmektedir. Tüm sayısal model sonuçlarına göre türetilen korelasyon eşitlikleri Tablo 2'de verilmiştir.

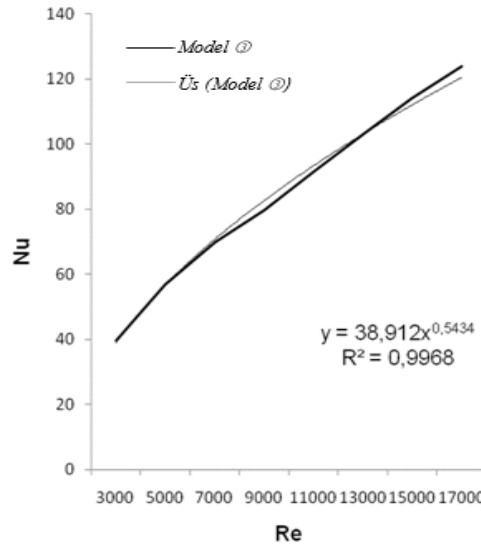
$$Nu = 27,53Re^{0,6376}, R^2 = 0,9965 \quad 17$$



Şekil 8. Seçilen bölgede  $Re \sim 11500$  için hız büyüklükleri



Şekil 9. Seçilen bölgede  $Re \sim 11500$  için sıcaklık dağılımları

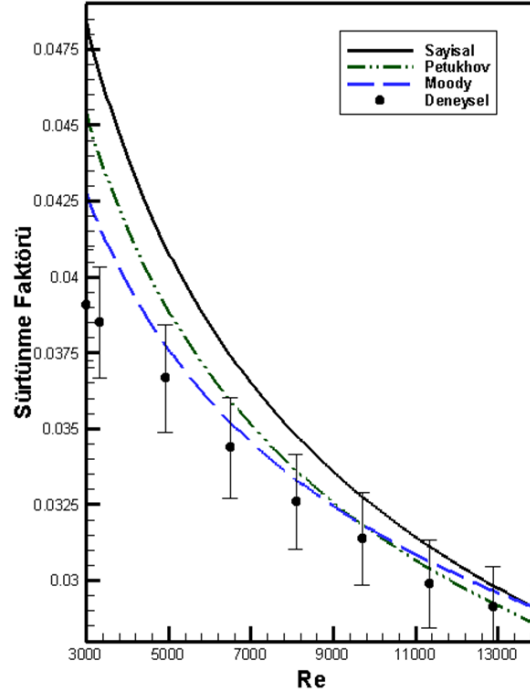


Şekil 10. Sayısal  $Nu$  sayısının  $Re$  sayısına göre değişiminin fonksiyonel gösterimi (Model ③)

Tablo 2. Sayısal model sonuçlarına göre türetilen korelasyonlar

<i>RNG k-ε model</i>	$Nu = C Re^m$	<i>Uyum iyiliği</i>
Model ①	$Nu = 35,356Re^{0,4563}$	$R^2 = 0,9785$
Model ②	$Nu = 36,125Re^{0,4594}$	$R^2 = 0,9908$
Model ③	$Nu = 38,912Re^{0,5434}$	$R^2 = 0,9968$

Tam gelişmiş şartlar altında ve sürekli rejim halinde düz boruda ampirik ifade olarak kullanılan Moody [25] ve Petukhov [26] eşitliklerinden hesaplanan sürtünme faktörleriyle, deneysel ve sayısal basınç değerlerine göre elde edilen sürtünme faktörü değerleri Şekil 11’de verilmiştir [2]. Deneysel ve sayısal sonuçların, Moody diyagramı ve Petukhov eşitliği ile hesaplanan değerlerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlardan elde edilen sonuçların Petukhov eşitliği ile hesaplanan sonuçlara göre % 5 ve sayısal sonuçlara göre de % 8 oranında arasında fark bulunmaktadır.



Şekil 11. Boş boruda deneysel, sayısal ve ampirik sürtünme faktörlerinin karşılaştırılması

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; RNG k-ε üç farklı türbülans modeli kendi aralarında ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılarak, en iyi türbülans modelin belirlenmesi amaçlanmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- $Re$  Sayısının  $3000 \leq Re \leq 7000$  aralığında hiçbir RNG k-ε modeli deneyden elde edilen veri ile çakışmamaktadır.  $3000 \leq Re \leq 7000$  aralığında başlangıç değeri olarak tüm HAD alınan aynı değeri gösterirken  $7000$  değerine yaklaştıkça Model ③ ile elde edilen  $Nu$  sayısı değerleri deneysel sonuçlardan uzaklaşmıştır. Model ③'ün deneylerle uyum sağlamadığı görülmüştür.
- Model ① ve Model ②'de  $Nu$  sayılarının deneylerden elde edilen sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.
- Model ② çözümünün  $Nu$  sayısı  $Re$  sayısının  $3000$  değerinden  $7000$  değerine gidildikçe deneysel  $Nu$  sayısına yaklaşmış ve  $Re$  sayısının  $7000$  değerinde ise deneysel değerlerle tamamen aynı sonucu vermiştir.  $7000 \leq Re \leq 13000$  aralığında paralellik göstermiş,  $13000 \leq Re \leq 18000$  aralığında ise deney sonuçlardan uzaklaşmıştır.
- Model ① çözümünde;  $Nu$  sayısı  $Re$  sayısının  $3000 \leq Re \leq 5000$  aralığında deneysel sonuçlarla paralel olduğu görülmektedir.
- Sayısal çözüm tekniğinin deneysel çalışmalarda gözlenemeyen sıcaklık ve basınç dağılımı ve hız vektörleri gibi daha detaylı bilgiler verdiği görülmüştür.
- Sonuç olarak sayısal çalışmalar deneysel çalışmaların yanında bir zorunluluk haline gelmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmalarımızda her türlü teknik desteği veren Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Yakut, K., Şahin, B. Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers. *Applied Energy*, 78 (2004) 273–288.
- [2] Sahin, H.M., Baysal, E. Dal, A.R. and Sahin, N. Investigation of heat transfer enhancement in a new type heat exchanger using solar parabolic trough systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40: 44 (2015) 15254-15266.
- [3] Baysal, E. (2009). Eşmerkezli Borulu Isı Değiştiricilerinde Helisel Türbülatorlerin Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [4] ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide; 4.12.4, 2010.
- [5] Sahin, H.M., Baysal, E., Dal, A.R. Experimental and numerical investigation of thermal characteristics of a novel concentric type tube heat exchanger with turbulators. *International Journal of Energy Research*, 37 (2013) 1088–1102.
- [6] Saraç, B. A., Bali, T. An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow through a circular pipe with a vortex generator. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2007) 158–165.
- [7] Akpınar, E.K., Biçer, Y., Yıldız, C., Pehlivan, D. Heat transfer enhancements in a concentric double pipe exchanger equipped with swirl elements. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 31: 6 (2004) 857-868.
- [8] Promvonge, P., Eiamsa-ard, S. Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator. *Energy Conversion and Management*, 47 (2006) 2867–2882.
- [9] Eiamsa-ard, S., Promvonge, P. Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics in a circular tube fitted with V-nozzle turbulators. *International Communications Heat and Mass Transfer*, 33 (2006) 591-600.
- [10] Neshumayev, D., Ots, A., Laid, J., Tiikma, T. Experimental investigation of various turbulator inserts in gas-heated channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28 (2004) 877–886.
- [11] Shokouhmand, H., Salimpour, M.R., Akhavan-Behabadi, M.A. Experimental investigation of shell and coiled tube heat exchangers using wilson plots. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (2008) 84–92.
- [12] Naphon, P. Effect of coil-wire insert on heat transfer enhancement and pressure drop of the horizontal concentric tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33 (2006) 753–763.
- [13] Kongkaitpaiboon, V., Nanan, K., Eiamsa-ard, S. Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 5 (2010) 568-574.
- [14] Aköz, M.S., Soydan, N.G., Şimşek, O. Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4: 4 (2016) 213 – 224.
- [15] Ekici, Ö., Özcan, Z. Akış Problemleri İçin Lattice Boltzmann Yöntemi ve Uygulamaları, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4: 3 (2016) 115 – 126.
- [16] Zhang, G., Tian, M. Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchangers. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.*, 18: 5 (2006) 547-551.
- [17] Gimbin J., Chuah T. G., Fakhru'l-Razi A., Choong, T. S. Y. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. *Chemical Engineering and Processing*, 44 (2005) 7-12.

- [18] Eimsa-ard, S., Promvonge, P. Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves. *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (2008) 844-852.
- [19] Yakhot, V., Orszag, S. A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, 1: 1 (1986) 3-51.
- [20] Yakhot V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., Speziale, C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, 4 (1992) 1510-1520.
- [21] Petukhov, B.S., Irvine, T. F., Hartnett, J. P. (1970) *Advances in heat transfer*. Vol. 6, Academic Press, New York.
- [22] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A new k-epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Model Development and Validation, Computers Fluids*, 24: 3 (1995) 227-238.
- [23] Yiğit, M. (2016). İç İçe Borulu Yay Tipi Türbülantörlü Bir Isı Değiştiricisinde Türbülans Modelinin Isı Transferine Etkisinin İncelenmesi, *Fen Bil. Enst., Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara*.
- [24] Kline, S.J., McClintock, F.A. Describing uncertainties in single sample experiment. *Mech. Eng.* 75 (1953) 385–387.
- [25] Moody, L. F., 1944, Friction factors for pipe flow, *Trans. ASME*, 66: 671-684.
- [26] Petukhov, B.S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, 85-95.





## Investigation of the Effect on Copper and Silicon Additives on Machinability in Turning of Al-25Zn Alloy with CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coated Tools

Şenol BAYRAKTAR<sup>1\*</sup> Çiğdem ÇAMKERTEN<sup>2</sup> Nurten SALİHOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Recep Tayyip Erdoğan University Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 53100, Merkez/RİZE

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, Al-25Zn-3Cu and Al-25Zn-3Cu-3Si alloys were obtained by adding Copper (Cu) and Silicon (Si) to Al-25Zn alloy using induction melting and permanent mold casting method. Microstructural and mechanical properties of alloys were determined. The internal structure of Al-25Zn consisted of  $\alpha$  and  $\eta$  phases, while the internal structure of Al-25Zn-3Cu consisted of  $\alpha$ ,  $\alpha + \eta$  and  $\theta$  phases. In addition to these phases, eutectic and primary silicon particles were observed in the internal structure of Al-25Zn-3Cu-3Si. It was determined with the addition of Cu and Si that the hardness, yield and tensile strength of the alloy was increased and the breaking elongation was reduced. In addition, the machinability of these alloys in turning process was investigated experimentally and the effect of Cu and Si on machinability was revealed. As a result of cutting experiments, the highest cutting force was measured in Al-25Zn-3Cu-3Si alloy while the lowest cutting force was measured in Al-25Zn-3Cu alloy. The highest surface roughness value was measured in the Al-25Zn-3Cu-3Si alloy at all cutting speeds, while the lowest was in the Al-25Zn alloy.

### Article Info:

Research article

Received: 10/09/2019

Revision 01/12/2019

Accepted: 21/12/2019

### Highlights

- Al-25Zn alloy.
- Cutting tool performance
- Machinability properties

### Keywords

Al-Zn Alloy  
Microstructure  
Cu and Si Additives  
Machinability  
Cutting Force  
Surface Roughness

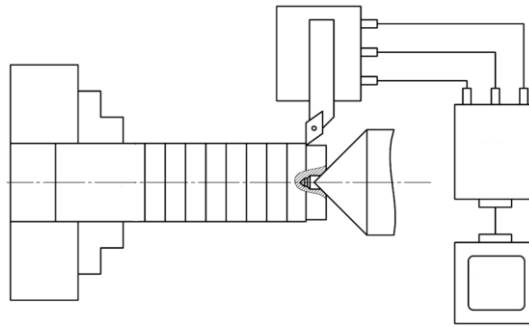


Figure A. Experimental setup

**Purpose:** In this study, it was aimed to investigate the effect of Cu and Si on the machinability properties of Al-25Zn alloy.

**Theory and Methods:** Firstly, microstructural and mechanical properties of alloys were determined by optical microscope and universal test methods, respectively. Cutting force and roughness values were measured with the Kistler dynamometer and surface roughness measuring device, respectively. The cutting performance of CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inserts was evaluated by imaging the adhesion formed at the insert with SEM (Scanning Electron Microscope).

**Results:** The addition of Cu and Si to the Al-25Zn alloy increased the hardness, yield and tensile strength of the alloy, while reducing the breaking elongation. Si element was found to worsen the machinability properties of alloy, but copper improved.

**Conclusion:** In this study, the effect of Cu and Si on microstructural, mechanical and machinability properties of Al25-Zn alloy was presented. The results show that Cu and Si have a significant effect on the microstructural and mechanical properties and cutting performance of the alloy.



## Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi

Şenol BAYRAKTAR<sup>1\*</sup>  Çiğdem ÇAMKERTEN<sup>1</sup> Nurten SALİHOĞLU<sup>1</sup>

<sup>1,2,3</sup> Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, 53100, Merkez/RİZE

### Öz

Bu çalışmada, bakır (Cu) ve silisyum (Si) katkılarının Al-25Zn alaşımının mekanik ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İkili Al-25Zn, üçlü Al-25Zn-3Cu ve dördü Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlar induksiyonla ergitme ve kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilerek mikroyapı ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kesme deneyleri, CNC torna tezgâhında CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı takım ile üçer farklı kesme hızı (250-350-450 m/dak) ve ilerleme (0,05-0,1-0,15 mm/dev) ile birlikte 1,5 mm sabit kesme derinliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Al-25Zn alaşımının iç yapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritlerinden ve çinkoca zengin interdendritik  $\eta$  fazından oluştuğu gözlenmiştir. Bu alaşıma yapılan %3 Cu ilavesi ile iç yapıda intermetalik  $\alpha$  ve  $\alpha+\eta$  fazı ile birlikte  $\theta$  fazının oluştuğu, Al-25Zn-3Cu alaşımına yapılan %3 Si ilavesi ile  $\alpha$ ,  $\alpha+\eta$ ,  $\theta$  fazlarının yanı sıra ötektik ve primer silisyum parçacıklarının oluştuğu tespit edilmiştir. Al-25Zn alaşımına Cu ve Al-25Zn-3Cu alaşımına ise Si ilavesi ile sertlik, akma ve çekme dayanımının arttığı, kopma uzamasının azaldığı belirlenmiştir. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda, kesme kuvvetlerinin en yüksek Al-25Zn-3Cu-3Si en düşük ise Al-25Zn-3Cu alaşımlarının işlenmesinde ölçüldüğü gözlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tüm kesme hızlarında ve 0,05-0,1 mm/dev ilerleme oranlarında Al-25Zn alaşımında ve 0,15 mm/dev ilerlemede ise Al-25Zn-3Cu alaşımında ölçüldüğü tespit edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri ise tüm kesme hızlarında Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında olduğu belirlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 10/09/2019  
Düzeltilme: 01/12/2019  
Kabul: 21/12/2019

### Anahtar Kelimeler

Al-Zn Alaşımı  
Mikroyapı  
Cu ve Si İlaveleri  
İşlenebilirlik  
Kesme Kuvveti  
Yüzey Pürüzlülüğü

### Keywords

Al-Zn Alloy  
Microstructure  
Cu and Si Additives  
Machinability  
Cutting Force  
Surface Roughness

## Investigation of the Effect on Copper and Silicon Additives on Machinability in Turning of Al-25Zn Alloy with CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coated Tools

### Abstract

In this study, the effect of copper (Cu) and silicon (Si) additives on mechanical and machinability properties of Al-25Zn alloy was investigated experimentally. Binary Al-25Zn, ternary Al-25Zn-3Cu and quaternary Al-25Zn-3Cu-3Si alloys were produced by induction melting and permanent mold casting method and microstructure and mechanical properties of these alloys were determined. Cutting tests were conducted using CVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated cutting tool on CNC lathe with three different cutting speeds (250-350-450 m/min) and feed rate (0,05-0,1-0,15 mm/rev) and 1,5 mm constant depth of cut. The internal structure of Al-25Zn alloy was observed to be composed of aluminum-rich  $\alpha$  dendrites and zinc-rich interdendritic  $\eta$  phase. In addition to intermetallic  $\alpha$  and  $\alpha+\eta$  phases,  $\theta$  phase was formed with 3% Cu addition to this alloy and the eutectic and primary silicon particles were formed in addition to  $\alpha$ ,  $\alpha + \eta$ ,  $\theta$  phases with the addition of 3% Si to the Al-25Zn-3Cu alloy. Al-25Zn and Al-25Zn-3Cu alloys by adding Cu and Si, respectively, hardness, yield and tensile strength increased while breaking elongation decreased. As a result of the machinability tests, it was observed that the cutting forces were measured at the highest Al-25Zn-3Cu-3Si and the lowest Al-25Zn-3Cu alloys. It was found that the lowest surface roughness values were measured in Al-25Zn alloy at all cutting speeds and feed rates of 0,05-0,1 mm/dev and in Al-25Zn-3Cu alloy at feed rate of 0,15 mm/rev. The highest surface roughness values were determined in Al-25Zn-3Cu-3Si alloy at all cutting speeds.

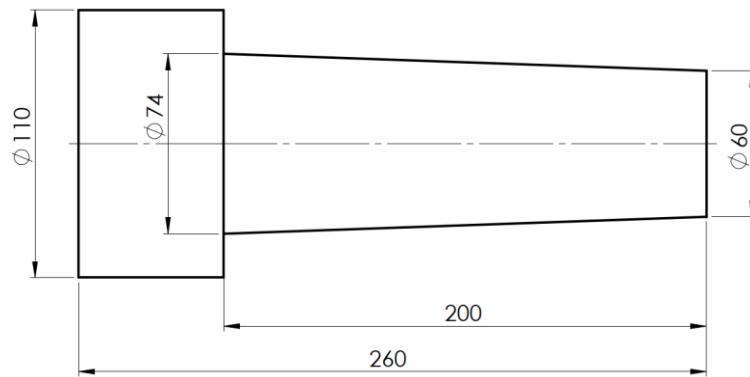
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum-çinko (Al-Zn) esaslı alaşımların, yüksek aşınma dayanımına sahip, özgül mukavemetlerinin yüksek, üretimlerinin kolay ve ekonomik, aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranışlar sergiledikleri bilinmektedir [1-3]. Söz konusu alaşımlardan üretilen yataklar, daha çok düşük hız ve aşırı yüklemenin söz konusu olduğu uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir [2-4]. Bu alaşımlar, kaymalı yatak üretiminden başka mühendislik amaçlı bazı parçaların üretiminde de gittikçe artan oranda kullanılmaktadır [5,6]. Örneğin, otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, silindir kapağı, dişli kutusu kapakları, motor ayakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar, bu alaşımlardan üretilmektedir [7,8]. Alüminyum alaşımları, iyi elektriksel ve ısı iletkenliğinin yanı sıra yüksek ısı ve ışık yansıtma özelliğine de sahiptir. Ayrıca, korozyon direncinin iyi olması, döküm ve şekillendirilebilme kolaylığı birçok hizmet alanlarında kullanılmalarını sağlamaktadır [9]. Talaşlı imalat sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü, malzemenin kalitesini belirleyen önemli bir imalat parametresidir. Birbirleriyle temas halinde çalışan makine parçalarının istenilen işlevi uzun süreli ve minimum enerji harcayarak gerçekleştirmesi yüzey pürüzlülüğüne ve parçanın boyut hassasiyetine bağlıdır. Yüzey kalitesi; malzemenin yorulma dayanımını, korozyon direncini ve malzemenin tribolojik özelliklerini büyük oranda etkilemektedir [10]. Bu sebeple, yüzey pürüzlülüğünün ölçümü ve karakterize edilmesi talaşlı imalat işlemlerinin optimizasyonu bakımından önem taşımaktadır. Alüminyumun talaşlı imalatı sırasında gösterdiği davranışlar diğer metalik malzemelere göre daha farklıdır. Alüminyum alaşımları, işleme sırasında sıvanma davranışı gösterdiği için kesici takımların üzerine yapışarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi işleme çıktılarını olumsuz etkilemektedir. Alüminyum alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili yapılan bazı çalışmalara bakıldığında, Manna ve Bhattacharayya, kaplamasız karbür kesici uç ile silisyum karbür takviyeli kompozitin tornalanması esnasında yüksek kesme hızının kesme kenarı sıcaklığını artırarak takım aşınmasına neden olduğunu ve optimum kesme hız aralığının 60-150 m/dak olduğunu [11], Sasimurugan ve Palanikumar, hibrit alüminyum metal matrisli (Al6061-SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) kompozitlerin tornalanmasında kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerleme hızındaki artış ile arttığı ve minimum yüzey pürüzlülüğünün 60 m/dak kesme hızı, 0,20 mm/dak ilerleme hızı ve 0,5 mm kesme derinliğinde elde edildiğini [12], Bhushan, ağırlıkça %15 SiC partikül takviyeli alüminyum alaşımının işlenmesinde kesme hızının en önemli faktör olduğunu ve minimum güç tüketimi için 90 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme, 0,2 mm kesme derinliği ve 0,42 mm uç yarıçapının kullanılması gerektiğini [13], Davoodi ve Tazehkandi, yüksek Mg içeriğine sahip AA5083 dövme alaşımının kaplamalı karbür kesici uç kullanarak yaptıkları çalışmada, yüksek kesme hızlarında kuru işlemede kesme ve ilerleme kuvvetlerinin ıslak işlemeden daha düşük olduğunu, kesme ve ilerleme kuvvetlerinin belirgin bir şekilde artması ile takım ucu sıcaklıklarının hem kuru hem de ıslak işlemede deforme olmamış talaş kalınlığının artmasıyla birlikte önemli derecede arttığını [14], Demir ve Gündüz, ısı işlem ve yaşlandırma proseslerinin Al-6061 alaşımının çok katmanlı kaplamalı sementit karbür kesici uçlar ile tornalanmasında, işlenecek parçanın yaşlanma ısı işlemine bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişikliğin çok belirgin olmadığını, farklı zamanlarda 180 °C için yaşlandırmanın yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediğini ve kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını [15], Dos Santos ve ark., Al-Si alaşımlarının DLC (Diamond like carbon) kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici uçlar ile işlenmesinde ağırlıkça %16 silisyum içeren alüminyum alaşımında kesme kuvvetinin daha yüksek olduğunu, DLC kaplı sementit karbür takımların kullanılmasıyla alüminyum alaşımındaki silisyum içeriğine rağmen kesme kuvvetlerinin azaldığını [16], Muthukrishnan ve ark., üç farklı kaliteye sahip (1300-1500-1600 grade) PCD kesici takım ile %15 SiC takviyeli Al-SiC kompozitlerin işlenmesi esnasında daha iyi yüzey kalitesi için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme kombinasyonunun kullanılması gerektiğini ve 1600 grade kaliteye sahip kesiciler ile daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiğini [17], Sekmen ve ark., AA2011 ve AA 7075 alaşımlarının işlenmesinde talaş açısının artması ile yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanının azaldığını, kesme hızının artması ile AA 2011 malzemenin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve katman oluşumu üzerinde herhangi bir etki oluşturmadığını, ancak AA 7075 işlemede ise yığıntı katman ve talaş oluşumunun azaldığını [18], Gökkaya ve Nalbant, AA5052 alaşımının kaplamasız karbür ile tornalanmasında yığıntı talaş ve katman oluşumunun azaltılması için kesme hızının artırılması ve 500 m/dak'dan daha yüksek kesme hızlarının test edilmesi gerektiğini [19] belirtmişlerdir. Hekimoğlu ve ark., [20] ve Bayraktar ve ark., [21] Al-35Zn alaşımının frezelenmesinde, kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü azalırken, ilerlemenin artması ile arttığını, TiAlN kaplamalı karbür takımların kaplamasız kesicilere göre daha fazla kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, BUE (Built up edge) ve BUL (Built up layer)

oluşumu sergilediğini tespit etmişlerdir. Rubio ve ark., [22] ve Sanchez ve ark., [23] AA7050 (Al-Zn) alaşımının TiN kaplamalı karbür kesiciler ile tormalanmasında, işleme uzunluğu ile yüzey pürüzlülüğünün genel olarak artma eğiliminde olduğu, kesme hızındaki artış ile hafif artış gösterirken ilerleme ile belirgin bir şekilde arttığını ve kesici kenarda BUE ve talaş yüzeyinde ise BUL'un oluştuğunu gözlemişlerdir. BUE belirli bir kalınlığa ulaştıkça mekanik ve termal nedenlerden dolayı talaş yüzeyinde sıvanma ile BUL oluştuğunu belirtmişlerdir. Wang ve Liu, AA7050 alaşımının ortogonal işlenmesinde 1000-5000 m/dak aralığındaki kesme hızlarında birincil deformasyon bölgesinde iş parçası malzemesinde sünek kırılma, 5000-7000 m/dak kesme hızlarında ise talaşta gevrek kırılmanın gerçekleştiğini, malzemenin kırılma ve deformasyon davranışının büyük gerilme hızları altında önemli derecede değiştiği ve bunun da talaş kaldırma mekanizmasını ve işlenmiş yüzey kalitesini doğrudan etkilediğini belirtmişlerdir [24]. Literatürde silisyumun (Si) alüminyum alaşımlarının dökülebilirlik ve mekanik özelliklerini [25], bakırın ise yüksek sıcaklık dayanımı ve mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir [26]. Son yıllarda yapılan ar-ge çalışmaları neticesinde çinko içeren alüminyum esaslı malzemelerin kaymalı yataklarda üstün tribolojik özellikler sergilediği ve bronz, pirinç ve dökme demir gibi malzemelere alternatif olabileceği belirlenmiştir. Döküm yöntemi ile üretilen bu alaşımların son ürün haline dönüştürülmesi ise tormalama, frezeleme ve delme gibi işleme operasyonları ile gerçekleştirilmektedir. Alüminyum esaslı alaşımların işlenmesinde farklı kesme parametrelerinin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri ile ilgili bir takım çalışmanın yapıldığı belirlenmiştir. Ancak, literatürde yüksek oranda çinko içeren alüminyum alaşımlarının ve bu alaşımlara yapılan bakır ve silisyum ilavelerinin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri ile ilgili detaylı bir çalışmanın yapılmadığı tespit edilmiş olup bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bu çalışmada, otomotiv sektöründeki kaymalı yatakların imalatında kullanılma amaçlı geliştirilen Al-Zn alaşımlarında, kesme hızı ve ilerleme oranının yanı sıra bakır ve silisyum ilavelerinin bu alaşımın işlenebilirliğine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

İkili Al-25Zn, üçlü Al-25Zn-3Cu ve dördü Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlara ait nominal kimyasal bileşimler Tablo 1'de verilmiştir. Bu alaşımlar, İndemak marka orta frekanslı bir indüksiyon ocağında eritildikten sonra SAE 8620 çeliğinden üretilmiş olan konik kalıba 700 °C civarındaki döküm sıcaklığından dökülerek üretilmiştir. Alaşımların üretiminde yüksek saflıkta (%99,9) alüminyum, çinko, bakır ve silisyum kullanılmıştır. Döküm kalıbından çıkan alaşım külçesinin ölçülerini gösteren teknik resim Şekil 1'de verilmiştir. Bu alaşım, universal torna tezgâhında işlenerek kesme deneyleri için Ø50X250 mm ölçülerine getirilmiştir.



Şekil 1. Döküm Alaşımın Külçesinin Teknik Resim Ölçüleri (Ölçüler mm'dir)

Tablo 1. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri

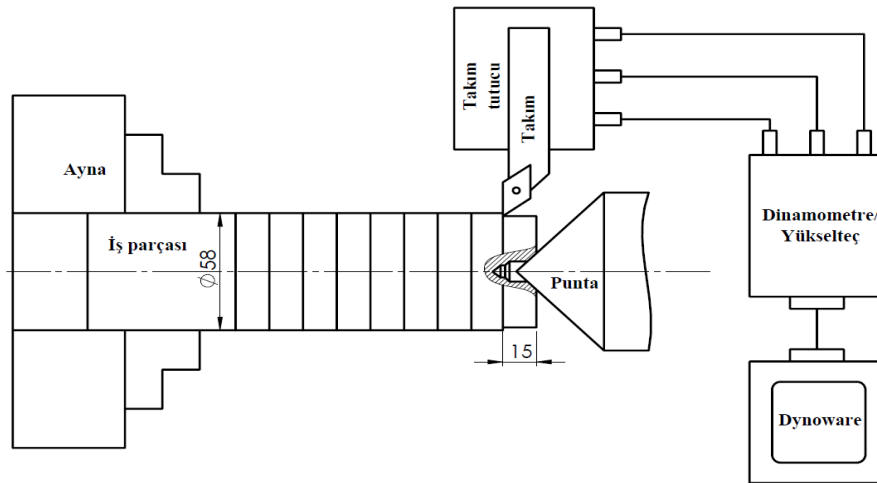
Alaşım	Ağırlıkça element oranı (%)			
	Çinko	Bakır	Silisyum	Alüminyum
Al-25Zn	-	-	-	Kalan
Al-25Zn-3Cu	25	3	-	Kalan
Al-25Zn-3Cu-3Si	-	3	3	Kalan

Üretilen alaşımlara ait sertlik ölçümleri ise Qness Q250CS cihazı ile Brinell sertlik ölçümü yöntemine göre 62,5 kgf yük altında 2,5 mm çapında uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her bir alaşıma ait numunenin üç farklı bölgesinden ölçüm yapılarak elde edilen verilerin aritmetik ortalaması ile sertlik ölçümleri yapıldı. Mekanik testler ISO 6892 standardına göre 20 ton kapasiteli universal cihaz ile gerçekleştirildi. Alaşımlara ait çekme mukavemeti ölçümü için Ø8x40 ölçü boyutlarına sahip alaşım örnekleri ile  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik ortalama deformasyon hızı kullanılmıştır. Mekanik testler altı farklı örnek ile gerçekleştirilerek elde edilen sayısal verilerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır. Böylelikle, alaşımların sertlik, akma ve çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri tespit edilmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2.** Üretilen alaşımların mekanik özellikleri

<i>Alaşım</i>	<i>Sertlik (BSD)</i>	<i>Akma dayanımı (MPa)</i>	<i>Çekme dayanımı (MPa)</i>	<i>Kopma uzaması (%)</i>
<i>Al-25Zn</i>	<i>108</i>	<i>265</i>	<i>280</i>	<i>4,50</i>
<i>Al-25Zn-3Cu</i>	<i>130</i>	<i>278</i>	<i>317</i>	<i>1,83</i>
<i>Al-25Zn-3Cu-3Si</i>	<i>141</i>	<i>320</i>	<i>334</i>	<i>0,83</i>

Tornalama deneyleri, 10 kW gücündeki JOHNFORD TC-35 CNC torna tezgâhında 1,5 mm sabit kesme derinliği, üçer farklı kesme hızı (250-350-450 m/dak) ve ilerleme değeri (0,05-0,1-0,15 mm/dev) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri ve kesici takım, üretici firma katalog değerleri ve literatür araştırması dikkate alınarak tespit edilmiştir. Literatürde Agustina ve ark., [27] ile Marcos-Bárcena ve ark., [28] Al-Zn alaşımının DCMT 11T308 kesici uç ile tornalanmasında 40-170 m/dak kesme hızı ve 0,05-0,30 mm/dev ilerleme aralığında kesme parametreleri kullandıkları ve Campbell ve ark., [29] ise sabit 360 m/dak kesme hızı ve 0,076 mm/dev ilerleme değerleri ile kesme deneyleri gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Buna göre, kesme deneyleri için Sumitomo marka CVD yöntem ile kaplanmış DCMT 11T308N-MU geometrisine sahip  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamalı uçlar temin edilmiştir. Alaşımların tornalanması esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümünde, Kistler marka dinamometre kullanılmış olup dinamometreden alınan titreşim sinyalleri yükselteç yardımı ile Dynoware yazılımına aktarılmıştır. Böylelikle, Dynoware yazılımından elde edilen  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  kuvvetlerinin bileşkesi hesaplanarak kesme kuvvetleri belirlenmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Deneysel düzeneğin şematik gösterimi

Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde Mahr Perthometer M1 (MarSurf PS1) marka izleyici uçlu yüzey pürüzlülük cihazı, 0,8 mm örnekleme uzunluğu ve 4 mm ölçme uzunluğu kullanılmıştır. İşlenmiş yüzey kalitesinin belirlenmesinde ISO 4287 standardına göre ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) kriteri dikkate alınmış olup işlenmiş yüzeyler üzerindeki pürüzlülük profilindeki saptamaların aritmetik ortalaması ile

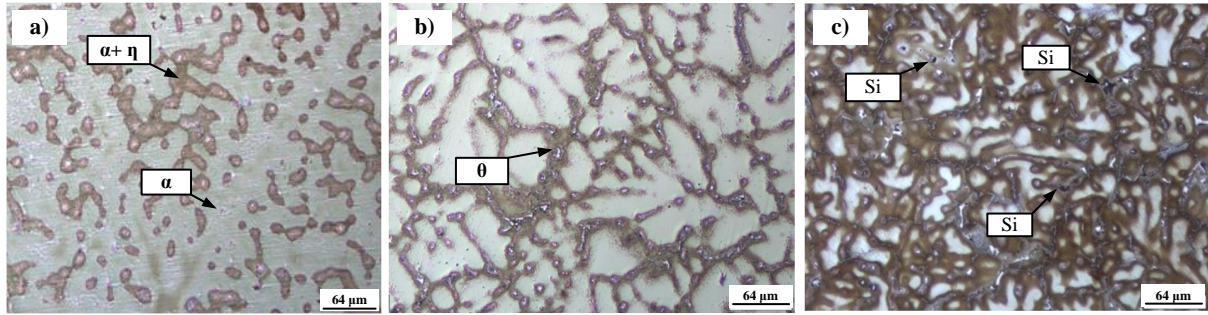


sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen pürüzlülük değerlerinin doğruluğu için işlenen yüzeyin farklı bölümlerinden üçer adet ölçüm yapılarak bu ölçümlerin de aritmetik ortalamaları hesaplanarak nihai yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Mikroyapısal Özelliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Microstructural Properties)

Optik mikroskopta incelenen ikili, üçlü ve dördü alaşımların içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 3.a-c'de verilmiştir. İkili Al-25Zn alaşımının içyapısı alüminyumca zengin  $\alpha$  dentritleri ile  $\eta$  fazlarından oluştuğu görüldü (Şekil 3.a). Bu fazların oluşumu, alaşımın katılma davranışına göre açıklanmaktadır [30, 31]. Al-25Zn metali ikili faz diyagramına göre birbiri içerisinde tamamen çözülmüş durumda bulunan alüminyum ve çinkodan oluşmaktadır. Sıvı metal içerisinde farklı noktalar ve konumlarda öncelikle katılma sıcaklığı daha yüksek olan alüminyumca zengin  $\alpha$  çekirdekleri oluşur. Katılma sıcaklığı çinkodan daha yüksek olan  $\alpha$  çekirdekleri kristalleşmeye merkezlik yapmaktadır. Metalin soğumasıyla artan atom ya çekirdeklere bağlanmakta ya da kendi çekirdeklerini oluşturmaktadır. Her bir  $\alpha$  çekirdeği sıvı metalden atom çekerek kendi uzay kafesinde farklı yönlerde büyümekte ve dendritik formdaki  $\alpha$  fazını oluşturmaktadır. Soğuma devam ettikçe bir başka deyişle  $\alpha$  fazının sıcaklığı ötektoid dönüşüm sıcaklığına düşünce aşırı doymuş  $\alpha$  fazı ötektoid dönüşüm ile  $\alpha+\eta$  fazına dönüşür. Bu dönüşüm sonucunda  $\eta$  fazı  $\alpha$  dentritlerinin kolları arasında kalan bölge de çökler [32-34].



Şekil 3. Alaşımların içyapı görüntüleri, a) Al-25Zn, b) Al-25Zn-3Cu ve c) Al-25Zn-3Cu-3Si

Al-25Zn alaşımına bakır katılması durumunda alaşımın içyapısının fazla değişmediği, ancak dentritler arası bölgelerde bakırca zengin  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) fazının oluştuğu gözlenmiştir [35, 36] (Şekil 3.b). Al-25Zn-3Cu alaşımına silisyum katılarak elde edilen Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının içyapısının ise  $\alpha$ ,  $\alpha+\eta$ ,  $\theta$  fazları ile birlikte ötektik ve primer silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 3.c). Ötektik silisyum parçacıklarının alaşım içerisinde primer silisyum parçacıklarına göre daha homojen bir dağılım sergilediği belirlenmiştir [37].

#### 3.2. Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Mechanical Properties)

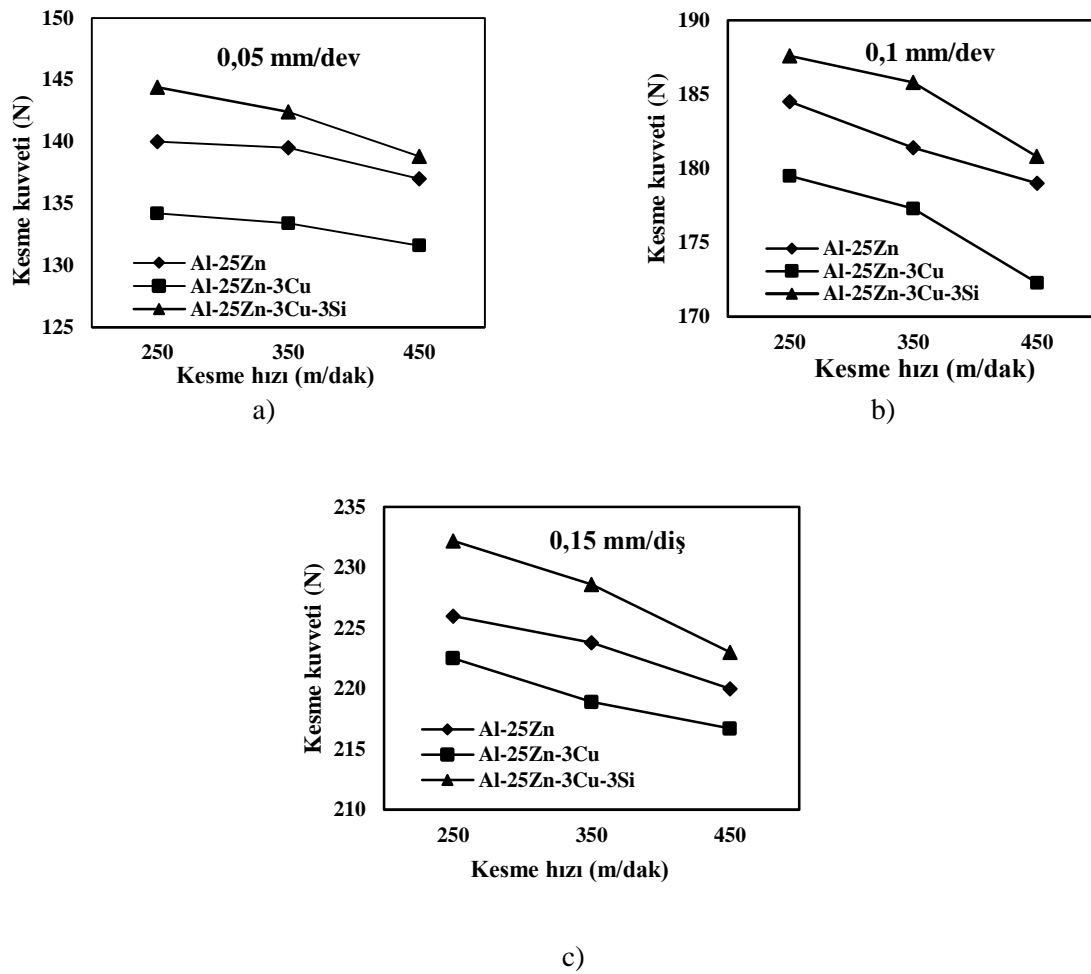
Sertlik, akma ve çekme dayanımı bakımından en yüksek değerler Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında, en düşük değerler ise Al-25Zn alaşımında oluştuğu tespit edilmiştir (Tablo 2). Bakır ilavesi ile Al-25Zn alaşımının sertlik, akma ve çekme dayanımları artarken, kopma uzamasının azaldığı görüldü. Elde edilen bu veriler, alaşımın içyapısına dayandırılarak açıklanabilir. İkili Al-25Zn alaşımına ilave edilen bakır, etkisini iki farklı şekilde göstermektedir. Bunlardan biri  $\alpha$  fazı içinde çözünerek katı çözelti sertleşmesine neden olması, diğeri ise alüminyum ile birleşerek  $\theta$  fazı olarak bilinen  $Al_2Cu$  bileşiğini oluşturmasıdır. Hem katı çözelti hem de ikincil faz çökmesi mekanizmaları nedeniyle yapıda distorsiyon meydana gelir. Yapıda distorsiyon oluşması da dislokasyonların ilerlemesinin önünde engel oluşturacağından alaşımların sertlik ve mukavemetlerinde artışa neden olmaktadır. Kopma uzamasındaki azalma ise içyapıda  $\theta$  fazının oluşumuna ve alaşım içerisindeki dağılımına dayandırılabilir. İçyapı incelemesinde  $\theta$  fazının genelde dendritler arası bölgelerde yer aldığı görülmüştür. Bileşik olduğu için nispeten sert ve gevrek olan bu parçacıkların çentik etkisi yaparak gevrek kırılmaya yol açtığı bilinmektedir. Bu sebeple,  $\theta$  fazının alaşımında kopma uzaması değerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Al-25Zn-3Cu alaşımına ilave edilen



silisyum, alaşımın sertlik, akma ve çekme mukavemetini artırırken, kopma uzamasını azaltmıştır. Bu durum, içyapı içerisindeki ince silisyum parçacıklarının homojen dağılması ile açıklanabilir. İçyapıdaki bu ötektik silisyum parçacıkları, dispersiyon sertleşmesi mekanizmasıyla alaşımın sertlik ve mukavemetini arttırmaktadır [38-40]. Ayrıca, bu sert ve gevrek parçacıklar, çentik etkisi oluşturmasının yanı sıra dentritler arası bölgelerde yer alan bölgeleri zayıflatmakta ve bu alaşımların kopma uzamasının azalmasına sebep olmaktadır [41, 42].

### 3.3. Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Force and Surface Roughnesses)

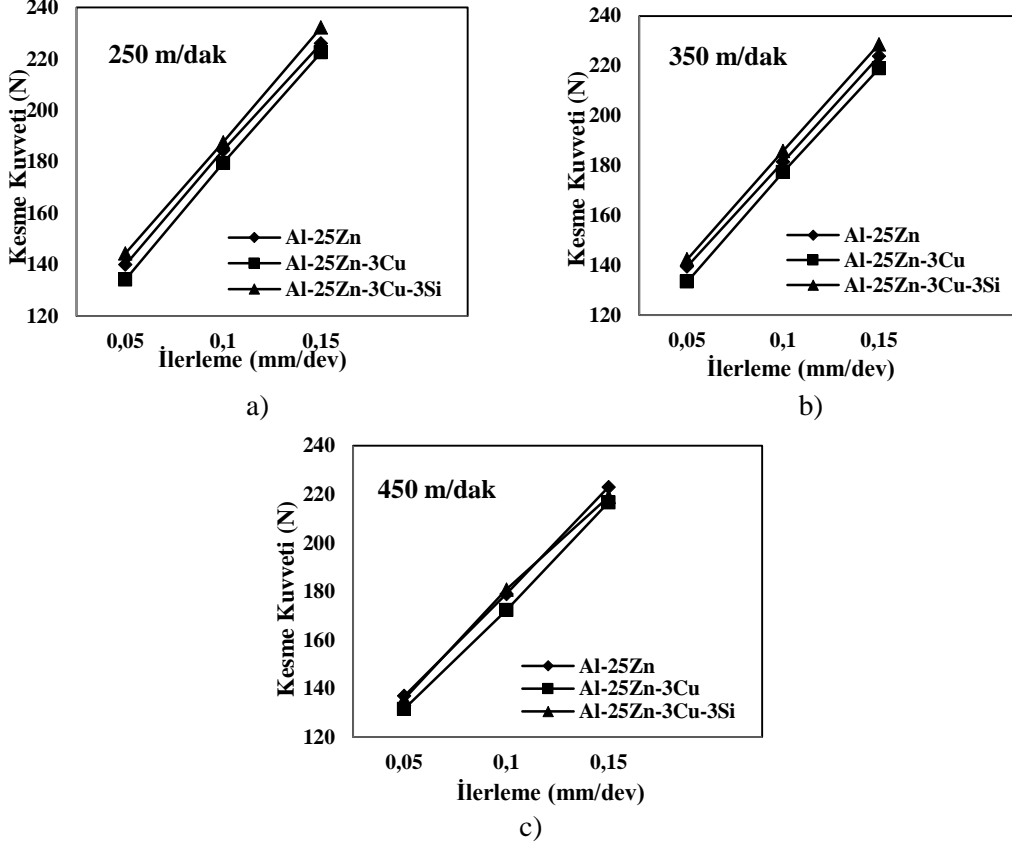
CVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı karbür uçlar ile Al-25Zn, Al-25Zn-3Cu, Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımlarının tornalanmasında oluşan kesme hızı-kesme kuvveti ve ilerleme-kesme kuvveti grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Sabit ilerlemede kesme hızı- kesme kuvveti ilişkisi, a) 0,05 mm/dev, b) 0,1 mm/dev ve c) 0,15 mm/dev

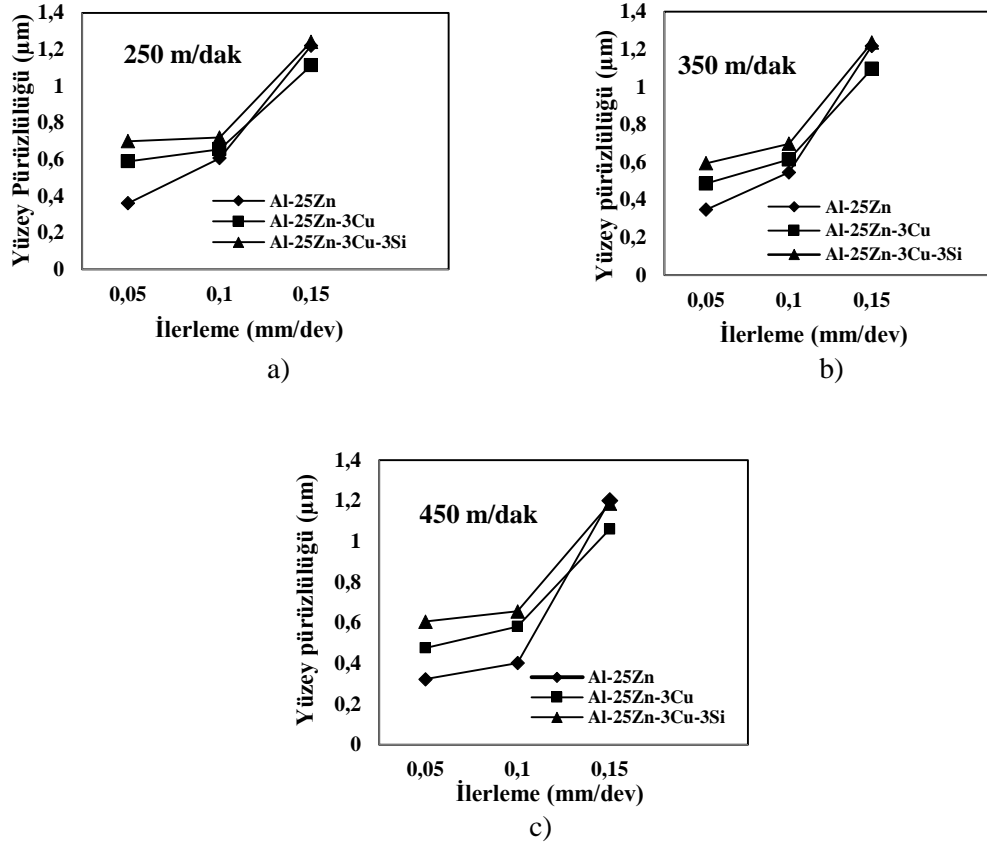
Şekil 4'e bakıldığında, kesme hızının artması ile tüm alaşımların işlenmesinde kesme kuvvetinin azaldığı gözlenmiştir. 250 m/dak kesme hızında ve 0,05-0,1-0,15 mm/dev ilerleme değerlerinde sırasıyla en yüksek kesme kuvvetlerinin 144,4 N, 187,5 N ve 232,2 N ile Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında, en düşük kesme kuvveti 131,6 N, 172,3 N ve 216,7 N ile 450 m/dak kesme hızında Al-25Zn-3Cu alaşımında ölçülmüştür. 0,05 mm/dev ilerlemede kesme hızının 250-450 m/dak aralığında değişimi ile Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında kesme kuvveti %4,34, Al-25Zn-3Cu alaşımında %2,29 ve Al-25Zn alaşımında ise %2,18 azalmıştır. 0,1 mm/dev ilerlemede kesme hızının 250-450 m/dak aralığındaki değişimi ile kesme kuvveti, Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %3,88, Al-25Zn-3Cu alaşımında %4,06 ve Al-25Zn alaşımında ise %2,79 azalmıştır. 0,15 mm/dev ilerlemede kesme hızının 250-450 m/dak aralığındaki değişimi ile kesme kuvveti, Al-25Zn-3Cu-

3Si alaşımında %4,03, Al-25Zn-3Cu alaşımında %2,77 ve Al-25Zn alaşımında ise %2,72 azaldığı gözlenmiştir. Kesme hızının artması, birincil deformasyon bölgesinde oluşan sıcaklığın artmasına bağlı olarak malzemenin akma mukavemetinin azalmasına sebep olmaktadır. Akma mukavemetinin azalması, kesme işlemini kolaylaştırarak kuvvetlerin azalmasına katkı sağlamaktadır [19].



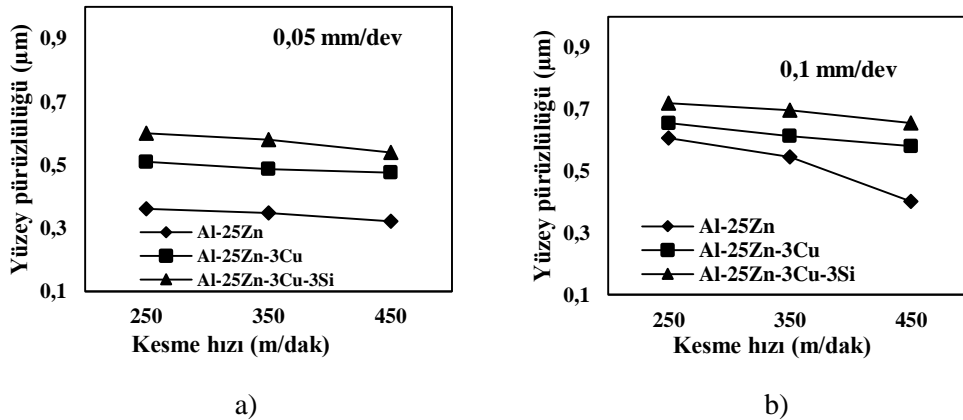
Şekil 5. Sabit kesme hızında ilerleme-kesme kuvveti ilişkisi, a) 250 m/dak, b) 350 m/dak ve c) 450 m/dak

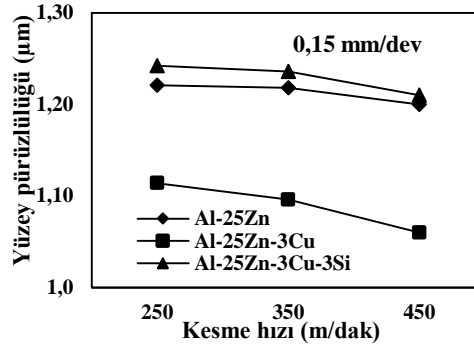
İlerleme oranının artması ile tüm alaşımların işlenmesinde kesme kuvvetlerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 5). Tüm kesme hızı değerlerinde ilerlemenin 0,05-0,15 mm/dev aralığında değişimi ile tüm alaşımlarda yaklaşık olarak kesme kuvvetinde %61,11 artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, birim zamanda kaldırılması gereken talaş hacminin artmasından ve kesme işlemi için daha fazla güce ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır [43, 44]. Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımının işlenmesinde, kesme kuvveti değerlerinin Al-25Zn ve Al-25Zn-3Cu alaşımına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 5). Alaşım içyapısında bulunan ötektik ve primer silisyum parçacıkları dispersiyon sertleşmesi mekanizmasıyla alaşımın sertlik ve mukavemetini arttırmaktadır. Ancak, bu silisyum parçacıkları kesme işlemi esnasında kesici takım ile yüzey arasında sürtünmeyi artırarak [45] kesici takımın aşınmasına ve iş parçası işlenmiş yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü arttıran bir etken olarak ortaya çıkmaktadır [46] (Şekil 4-7). İdeal kesme kuvveti değerleri ise Al-25Zn-3Cu alaşımında ölçüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum, alaşımın kopma mukavemetinin Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına göre daha düşük, Al-25Zn alaşımına göre ise fazla olmasına dayandırılabilir. Diğer bir ifade ile Al-25Zn ikili alaşımına %3 Cu ilavesi, çökeltme sertleşmesine [47] ve dentritik bölgelerde  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) intermetalik faz oluşumuna sebep olarak [35, 36] alaşımın sertliğini ve çekme mukavemetini artırırken, kopma uzamasını azaltmaktadır. Böylelikle, kesme esnasında talaşın kolay kırılmasını sağlayarak kesici takım üzerine etkileyen kuvvetlerin Al-25Zn ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımına göre daha az oluşmasına sebep olmuş olabilir [48, 49]. Şekil 6'da sabit kesme hızlarında ilerleme-yüzey pürüzlülüğü ilişkisi verilmiştir.



Şekil 6. Sabit kesme hızlarında ilerleme-yüzey pürüzlülüğü ilişkisi, a) 250 m/dak, b) 350 m/dak ve c) 450 m/dak

Şekil 6 incelendiğinde, ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğünün tüm alaşımlarda arttığı gözlenmiştir. 250 m/dak sabit kesme hızında ve ilerlemenin 0,05-0,15 mm/dev aralığında değişimi ile Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında yüzey pürüzlülüğü %77,42, Al-25Zn-3Cu alaşımında %88,81 ve Al-25Zn alaşımında ise %238,22 arttığı tespit edilmiştir. 350 m/dak sabit kesme hızında ilerlemenin 0,05-0,15 mm/dev aralığındaki değişimi ile Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %107,73, Al-25Zn-3Cu alaşımında %153,79 ve Al-25Zn alaşımında ise yüzey pürüzlülüğü %255,72 oranında yüzey pürüzlülüğü artmıştır. 450 m/dak kesme hızı ve 0,05-0,15 mm/dev aralığında ise yüzey pürüzlülüğü Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %95,7, Al-25Zn-3Cu alaşımında %122,68 ve Al-25Zn alaşımında ise %268,32 oranında arttığı gözlenmiştir. Bu durum, birim zamanda kaldırılan talaş kesitinin artması ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 7’de sabit ilerleme hızlarında kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir.

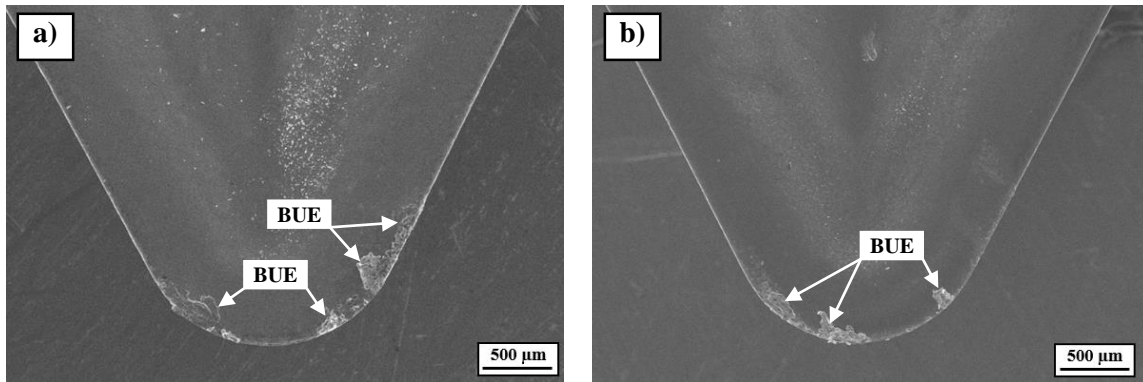


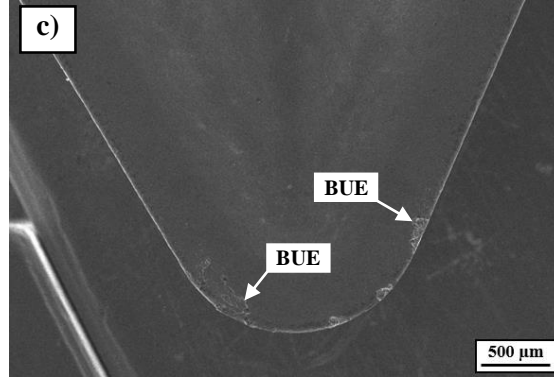


c)

Şekil 7. Sabit ilerleme hızlarında kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü ilişkisi, a) 0,05 mm/dev, b) 0,1 mm/dev ve c) 0,15 mm/dev

Şekil 7'ye göre sabit 0,05 mm/dev ilerleme ve 250-450 m/dak kesme hızı aralığında yüzey pürüzlülüğü, Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %39,4, Al-25Zn-3Cu alaşımında %34,38 ve Al-25Zn alaşımında %10,8 azalmıştır. 0,1 mm/dev ilerleme ve 250-450 m/dak kesme hızı aralığında yüzey pürüzlülüğü, Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %34,4, Al-25Zn-3Cu alaşımında %11,43 ve Al-25Zn alaşımında ise %33,77 azaldığı gözlenmiştir. 0,15 mm/dev ilerleme ve 250-450 m/dak kesme hızı aralığında ise yüzey pürüzlülüğü, Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında %2,57, Al-25Zn-3Cu alaşımında %4,84 ve Al-25Zn alaşımında %1,719 azalma olmuştur. Alüminyum alaşımlarının işlenmesi esnasında süneklik özelliğinden dolayı kesici takım kesme kenarında yığıntı talaş (BUE-Built up edge) oluşmaktadır [50]. Yığıntı talaş oluşumu ise kesici kenar geometrisini değiştirerek ilerlemenin de artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır (Şekil 4-5) [51-53]. Yığıntı talaş oluşumunu azaltmanın en etkili yöntemlerinden birisi de kesme hızının artırılmasıdır. Kesme hızının artması, birincil deformasyon bölgesinde sıcaklığı artırarak kesme işlemini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, artan kesme hızı kesici takım talaş yüzeyde oluşan yığıntı talaşın azalmasına ve takım aşınması başlayıncaya kadar kesme kuvvetleri ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 8'de de görüldüğü gibi 250 m/dak kesme hızında (Şekil 8.a) Al-25Zn-3Cu alaşımının işlenmesinde talaş yüzeyinde 350 (Şekil 8.b) ve 450 m/dak kesme hızlarına (Şekil 8.c) göre daha fazla yığıntı talaşın oluştuğu gözlenmiştir. Alaşımlar arasında en iyi yüzey kalitesinin tüm kesme hızlarında 0,1 ve 0,05 mm/dev ilerleme oranlarında Al-25Zn alaşımında, 0,15 mm/dev ilerleme oranında ise Al-25Zn-3Cu alaşımında elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 5). Al-25Zn-3Cu alaşımının içyapısında bulunan  $\theta$  fazı, özellikle yüksek ilerleme değerlerinde talaşı daha kırılğan hale getirerek yığıntı talaş oluşumunu azaltmakta ve işlenebilirliği arttırmaktadır [48, 49]. En kötü yüzey kalitesi ise Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımında olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıkları işleme zorlaştırarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır [45].





**Şekil 8.** Al-25Zn-3Cu alaşımının farklı kesme hızlarında tormalanması esnasında oluşan BUE, a) 250 m/dak, b) 350 m/dak ve c) 450 m/dak

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bakır ve silisyum ilavelerinin Al-25Zn alaşımının işlenebilirliği üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Al-25Zn alaşımının içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dentritlerinden ve çinkoca zengin interdendritik  $\eta$  fazından oluştuğu gözlenmiştir. Bu alaşıma yapılan %3 Cu ilavesi ile içyapıda  $\alpha$  ve  $\eta$  fazına ilave olarak  $\theta$  fazının oluştuğu, Al-25Zn-3Cu alaşımına yapılan %3 Si ilavesi ile de üçlü alaşımda görülen fazlara ek olarak ötektik ve primer silisyum parçacıklarının oluştuğu,
- Al-25Zn alaşımına Cu ve Al-25Zn-3Cu alaşımına ise Si ilavesi ile sertlik, akma ve çekme dayanımının arttığı, kopma uzamasının azaldığı,
- Kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü azalırken, ilerlemenin artması ile arttığı,
- Kesme kuvvetlerinin en fazladan en aza doğru sırasıyla Al-25Zn-3Cu-3Si, Al-25Zn ve Al-25Zn-3Cu alaşımlarının işlenmesinde ölçüldüğü,
- En düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tüm kesme hızı ve 0,05 ve 0,1 mm/dev ilerleme oranlarında Al-25Zn alaşımında, 0,15 mm/dev ilerlemede ise Al-25Zn-3Cu alaşımında ölçüldüğü tespit edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma, “2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı” kapsamında 1919B011702369 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ataç, A., Özyürek, D., Güral, A. (2014). Mekanik Alaşımlama ile Üretilmiş Çinko-Alüminyum (ZA) Alaşımlarının Kuru Sürtünmeli Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2(4), 309-313.
- [2] Calayag, T. (1983). Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings. Mining Engineering, 35, 727-728.
- [3] Geng, H., Ma, J. (1993). Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearings Alloy. Wear, 169, 201-207.
- [4] Mihaichuk, W., Bess, M.L. (1986). The ZA Die Casting Alloys. Society of Automotive Engineers, 95, 560-568.
- [5] Savaşkan, T., Murphy, S. (1987). Mechanical Properties and Lubricated wear of Zn-25Al-Based Alloys. Wear, 116, 211-224.

- [6] Gross, D.K. (1987). Zinc Alloys: Specifications and Processing. Society of Automotive Engineers, 1039-1046.
- [7] Zhu, Y., Yan, B., Huan, W. (1995). Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35). *Materials Science and Technology*, 11, 109-113.
- [8] Savaşkan, T., Çuvalcı, H. (1990). Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. 4. Ulusal Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi, Ankara, 328-336.
- [9] Erdoğan, M. (2001). Demir Dışı Alaşımlar Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 339, 372.
- [10] Karayel, D. (2008). Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3125-3137.
- [11] Manna, A., Bhattacharaya, B. (2005). Influence of machining parameters on the machinability of particulate reinforced Al/SiC-MMC. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 850-856.
- [12] Sasimurugan, T., Palanikumar, K. (2011). Analysis of the Machining Characteristics on Surface Roughness of a Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite (Al6061-SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10, 1213-1224.
- [13] Bhushan, R.K. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of Cleaner Production*, 39, 242-254.
- [14] Davoodi, B., Tazehkand, A.H. (2014). Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*, 68, 234-242.
- [15] Demir, H., Gündüz, S. (2009). The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 30, 1480-1483.
- [16] Dos Santos, G.R., Da Costa, D.D., Amorim, F.L., Torre, R.D. (2007). Characterization of DLC thin film and evaluation of machining forces using coated inserts in turning of Al-Si alloys. *Surface and Coatings Technology*, 202, 1029-1033.
- [17] Muthukrishnan, N., Murugan, M., Prahlada, R.K. (2008). An investigation on the machinability of Al-SiC metal matrix composites using pcd inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 447-454.
- [18] Sekmen, M., Günay, M., Şeker, U. (2015). Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18, 141-148.
- [19] Gökkaya, H., Nalbant, M. (2007). Kesme hızının yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu üzerindeki etkilerinin SEM ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 481-488.
- [20] Hekimoğlu, A.P., Bayraktar, Ş., Turgut, Y. (2018). Kesme Hızı ve İlerlemenin Al-35Zn Alaşımının İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi. *ISAS'18 Winter*, Samsun, Türkiye, 77-83.



- [21] Bayraktar, Ş., Hekimoğlu, A.P., Turgut, Y., Hacıosmanoğlu, M. (2017). A Performance Comparison Study of Uncoated and TiAlN Coated Carbide End Mill on Machining of the Al-35Zn Alloy. 9th International Conference on Tribology (Balkantrib'17), Nevşehir, Turkey, 1-7.
- [22] Rubio, E.M., Camacho, A.M., Sánchez-Sola, J.M., Marcos, M. (2005). Surface roughness of AA7050 alloy turned bars: Analysis of the influence of the length of machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 682-689.
- [23] Sánchez, J.M., Rubio, E., Álvarez, M., Sebastián, M.A., Marcos, M. (2005). Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 164, 911-918.
- [24] Wang, B., Liu, Z. (2016). Investigations on deformation and fracture behavior of workpiece material during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 14, 43-54.
- [25] Barzani, M.M., Zalnezhad, E., Sarhan, A.A., Farahany, S., Ramesh, S. (2015). Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al-Si-Cu-Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, 61, 150-161.
- [26] Rajaram, G., Kumaran, S., Rao, T.S. (2011). Effect of graphite and transition elements (Cu, Ni) on high temperature tensile behaviour of Al-Si Alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 128, 62-69.
- [27] Agustina, D.B., Saá, A., Marcos Bárcena, M., Rubio, E.M. (2011). Analysis of the machinability of aluminium alloys UNS A97050-T7 and UNS A92024-T3 during short dry turning tests. In *Advanced Materials Research*, 264, 931-936.
- [28] Marcos-Bárcena, M., Sebastián-Pérez, M.A., Contreras-Samper, J.P., Sánchez-Carrilero, M., Sánchez-López, M., Sánchez-Sola, J.M. (2005). Study of roundness on cylindrical bars turned of aluminium-copper alloys UNS A92024. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 644-648.
- [29] Vilches, F., Hurtado, L., Fernández, F., Gamboa, C. (2017). Analysis of the chip geometry in dry machining of aeronautical aluminum alloys. *Applied Sciences*, 7, 132.
- [30] Auer, H., Mann, K.E. (1936). Magnetic Investigation of Zinc Aluminum System. *Zeitschrift für Metallkunde*, 28, 323-326.
- [31] Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A., Chrevyakova, V.V. (1961). The Aluminum-Zinc Phase Diagram. *Journal of Physical Chemistry*, 35, 632-633.
- [32] Savaşkan, T. (2017). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*. İstanbul: Papatya Yayınevi.
- [33] Kuznetsov, G.M., Barsukov, A.D., Krivosheeva, G.B. (1986). Calculation of Phase Equilibria of The Al-Zn System. *Russian Metallurgy*, 5, 195-198.
- [34] Hekimoğlu, A.P., Turan, Y.E. (2019). Çinko Oranının Al-(5-50) Zn Alaşımlarının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9, 16-25.
- [35] Gonçalves, R.A., Silva, M.B. (2015). Influence of copper content on 6351 aluminum alloy machinability. *Procedia Manufacturing*, 1, 683-695.
- [36] Savaşkan, T., Bican, O., Alemdağ, Y. (2009). Developing aluminium-zinc-based a new alloy for tribological applications. *Journal of Material Science*, 44, 1969-1976.

- [37] Bican, O., Savaşkan, T.A. (2014). Comparative study of lubricated friction and wear behaviour of Al-25Zn-3Cu-3Si bearing alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 228, 896-903.
- [38] Savaşkan, T., Bican, O. (2005). Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si alloys. *Materials Science Engineering A*, 404, 259-269.
- [39] Lee, P., Savaşkan, T., Laufer, E. (1987). Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys. *Wear*, 117, 79-89.
- [40] Alemdağ, Y., Savaşkan, T. (2008). Effects of silicon content on the mechanical properties and lubricated wear behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si alloys. *Tribology Letters*, 29, 221-227.
- [41] Bican, O., Savaşkan, T. (2012). Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-(0.5Si) Alloys in the As-Cast and Heat-Treated Conditions. *Tribology Letters*, 40, 327-336.
- [42] Savaşkan, T., Bican, O. (2010). Dry sliding friction and wear properties of Al-25Zn-3Cu-3Si alloy. *Tribology International*, 43, 1346-1352.
- [43] Bouacha, K., Yaltese, M.A., Mabrouki, T., Rigal, J.F. (2010). Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28, 349-361.
- [44] Sharma, V.S., Dhiman, S., Sehgal, R., Sharma, S.K. (2008). Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 473-483.
- [45] Konca, E., Cheng, Y.T., Weiner, A.M., Dasch, J.M., Alpas, A.T. (2006). Elevated temperature tribological behavior of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings against 319 aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 200, 3996-4005.
- [46] Roy, P., Sarangi, S.K., Ghosh, A., Chattopadhyay, A.K. (2009). Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27, 535-544.
- [47] Zeren, M., Karakulak, E., Gümüş, S. (2011). Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 1698-1702.
- [48] Basavakumar, K.G., Mukunda, P.G., Chakraborty, M. (2007). Influence of melt treatments and turning inserts on cutting force and surface integrity in turning of Al-7Si and Al-7Si-2.5 Cu cast alloys. *Journal of Material Science*, 42, 8714-8724.
- [49] Froehlich, A.R., Jacques, R.C., Strohaecker, T.R., Mombro, R. (2007). The correlation of machinability and microstructural characteristics of different extruded aluminum alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16, 784-791.
- [50] Pul, M., Şeker, U. (2014). Metal Matrisli Kompozitlerin Tornalanmasında İlerleme Oranının Kesici Takım Aşınma Davranışlarına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 17, 99-106.
- [51] Gómez-Parra, A., Álvarez-Alcón, M., Salguero, J., Batista, M., Marcos, M. (2013). Analysis of the evolution of the Built-Up Edge and Built-Up Layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys. *Wear*, 302, 1209-1218.

- [52] Rubio, E.M., Camacho, A.M., Sánchez-Sola, J.M., Marcos, M. (2006). Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16, 164-170.
- [53] Batista, M., Salguero, J., Gómez, A., Carrilero, M.S., Álvarez, M., Marcos Bárcena, M. (2010). Identification, analysis and evolution of the mechanisms of wear for secondary adhesion for dry turning processes of Al-Cu alloys. *Advanced Materials Research*, 107, 141-146.

## Personnel Selection with Fuzzy VIKOR: An Application in Automotive Supply Industry

 Fatih ÖZTÜRK<sup>1,\*</sup>  Gülşüm Kübra KAYA<sup>2</sup> 
<sup>1,2</sup>Istanbul Medeniyet University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering, 34700, Uskudar/Istanbul

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 22/07/2019

Revision: 13/11/2019

Accepted: 21/12/2019

#### Highlights

- VIKOR was used to select personnel.
- Fuzzy logic was used to make more accurate and reliable decisions.

#### Keywords

Fuzzy Logic

Fuzzy VIKOR

Personnel Selection

This study applies fuzzy VIKOR method to select personnel for a company that manufactures auto spare parts in the automotive supply industry.

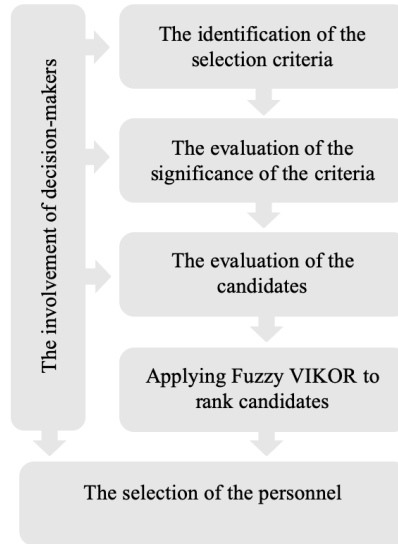


Figure A. Research design

**Purpose:** It is certain that the more qualified human resources in the supplier industry, the more quality products and the more reliable supply chain will emerge. Therefore, this study aims to contribute to the selection of personnel, especially in the automotive supplier industry.

**Theory and Methods:** This study used VIKOR method to make the right choice among the candidates based on conflicting criteria, and fuzzy logic was used to make the results more reliable.

**Results:** The results have revealed that alternative 4 is the most appropriate candidate for the job position based on the five conflicting criteria.

**Conclusion:** Human resources should observe how well the candidate fits to the criteria they identified while selecting personnel. Organisations may have difficulty in making healthy choices among candidates when recruiting personnel and may also have difficulty in making the right decision among the criteria determined when choosing personnel. At this point, multi-criteria decision-making methods, which supports businesses, function as an important tool.



## Bulanık VIKOR ile Personel Seçimi: Otomotiv Yan Sanayiinde Uygulama

Fatih ÖZTÜRK<sup>1,\*</sup> Gülsüm Kübra KAYA<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>*İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34700, Üsküdar/İstanbul*

### Öz

İşletmelerin, günümüz rekabetçi atmosferde hayatlarını sürdürebilmek ve uzun vadede ayakta kalabilmeleri için, dinamik ve gelişime açık bir yapıya sahip olmaları gerekmektedir. Gelişim ihtiyacı, işletmelerin ellerindeki kaynakları tekrardan gözden geçirmelerini gerektirmekle birlikte, özellikle personel seçimi konusundaki kriterler ve bu kriterlerin belirsizliği karar verme konusunda işletmeleri ciddi anlamda zora sokmaktadır. Bu kapsamda, çok kriterli karar verme yöntemleri, bu süreçteki bir dizi karmaşıklığı ortadan kaldırmak adına bize yardımcı olan bir karar verme sistemidir. Bu çalışmamızda otomotiv yan sanayiinde oto yedek parça üretimi yapan bir işletmenin personel alım süreci incelenmiştir. Bu süreçte birbirleriyle çelişen kriterler üzerinden doğru seçim yapabilmek adına VIKOR yöntemi kullanılmış, sonuçların daha güvenilir olabilmesi adına bu yöntem bulanıklaştırılmıştır.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 22/07/2019*  
*Düzeltilme: 13/11/2019*  
*Kabul: 21/12/2019*

### Anahtar Kelimeler

*Bulanık VIKOR*  
*Bulanık Mantık*  
*Personel Seçimi*

### Keywords

*Fuzzy Logic*  
*Fuzzy VIKOR*  
*Personnel Selection*

## Personnel Selection with Fuzzy VIKOR: An Application in Automotive Supply Industry

### Abstract

In order to survive in today's competitive environment and to be long-term, companies need for continuous change and development. This need for change and development allows companies to reconsider their resources and to direct their structures to this dynamic process. Of these resources, undoubtedly the most important is the personnel. In particular, the criteria for personnel selection and the uncertainty of these criteria make the organisations seriously difficult to make decisions. In this context, multi-criteria decision-making is a decision-making system that helps us to eliminate a number of complexities in this process. In this study, the personnel selection process of a company that manufactures auto spare parts in the automotive supply industry has been examined. In this process, the VIKOR method was used to make the right choice among the candidates based on conflicting criteria, and fuzzy logic was used to make the results more reliable.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzün yönetim anlayışında, insanın tanımlanan işe karşı belli bir potansiyele, tepkiye sahip olduğu ve zamanla insanın dinamik bir değişim geçirdiği görülmüştür. İnsan kaynakları yönetimi, işletmeye olan katkıyı arttıracak şekilde insan kaynağının, dinamik, sistematik bir şekilde yönetilmesidir [1]. İşletmelerin kendi koşullarını ve durumlarını analiz edip uygun bir işgücü planlamasını yapmaları ve bu planlamayı da kendi yönetim sistemlerine eklemlenmeleri gerekmektedir. Bu planlamaya göre istenen pozisyonlara doğru iş görenlerin bulunması, “personel seçim problemi” olarak nitelenmektedir [2].

Personel seçme süreci, titizlikle yürütülmesi gereken bir süreçtir. Bu sürecin en önemli kazanımı yanlış personel seçmenin yaratabileceği zararı minimize edebilme özelliğine sahip olmasıdır. Bu yüzden işletmeler için önemsenmesi gereken önemli bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygun olmayan personelin çalışma maliyeti işletmeler için ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Bu sistemin önemini Pickle ve Abrahamson [3] personel seçimi için yapılan harcamaların o kişiye ödenen bir yıllık ücret tutarından daha düşük olduğu sonucunu ortaya çıkararak ispatlamışlardır. Günümüzde özel sektörde faaliyet gösteren

işletmeler, personel seçiminde, kamuda hizmet veren işletmelere nazaran daha gelişmiş, farklı ve modern yöntemler arayışına geçmişlerdir. Kamuda eskiden beridir kullanılan yazılı ve test türü sınavlar devam ederken, bu konuda özel sektör biraz daha yelpazeyi geniş tutmakta ve çalışmalarını farklı metotlara yönlendirmektedirler. Özellikle, personelde aranan nitelikler arttıkça seçim işlemleri daha zor hale gelmekte ve işletmeler bu seçim işlemleri için daha farklı metotlar kullanma arayışına girebilmektedirler [4].

İşletmeler hedeflerine ulaşabilmek ve rakiplerine göre üstünlük oluşturmak için gerekli insan kaynağını bulmak, doğru bir seçim sürecinden geçirerek işe almak, adapte etmek, etkin çalıştırmak, işletme içinde tutmak, adil biçimde performanslarını değerlendirmek ve çalışanlara kariyer yapabileceği olanakları sağlamak zorundadır. İnsan kaynakları yönetiminin en önemli aşaması olan personel seçim sürecinin amacı, işletmede personel ihtiyacı saptanan konumun ve görevin tanımına en uygun, yetkin ve verimli insan kaynağını belirleyebilmektir [5]. İnsan kaynakları, istifa, ek iş gücü, emeklilik, işten ayrılma ve işe alma gibi değişkenliklerden dolayı dinamik bir yapıya sahiptir. İşletmeler insan kaynaklarının dinamik yapısından dolayı işletmenin hedeflerini gerçekleştirebilmesi için her bir pozisyon için en uygun niteliklere sahip personelleri işe almalıdır. Yazılı sınav, test ve sözlü sınav personel seçimi için incelenen ilk teknikler olarak literatürde anlatılmıştır [6].

Personel seçiminde kullanılacak kriterler ve bu kriterlerin ağırlıkları, seçim sürecinde incelenmesi gereken ana problem olarak ilk planda karşımıza çıkmaktadır. Personel seçimi sırasında belirlenen kararlar karmaşık bir yapıya sahiptir ve genellikle belirsiz bir ortamda verilir. Karar vericiler birbiriyle çelişen kriterleri eş zamanlı olarak incelemek zorunda olabilirler. Kesin sayılar kullanılarak personel adaylarını değerlendirmede zorluk yaşanabilir. Bu noktada devreye Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri girmektedir. Bu yöntem, özellikle işletmelerin karar verme noktasındaki belirsizlik karşısında kendilerine destek verip büyük bir oranda karar verme problemini çözmede yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ÇKKV yöntemlerinden biri olan Bulanık VIKOR yönteminin personel seçimi sürecinde kullanılabilir etkin bir teknik olduğunu göstererek bunu sektörel bazda örneklendirmektedir. Otomobil sektörünün ülkemizde büyük pay sahibi olmasından ötürü yan sanayisinde de buna dayalı olarak gelişmeler olmaktadır. Otomobil sanayisinin zaman ve ürün kalitesinin istenilen kalitede süreklilik arz etmesi için, yan sanayisinde aynı oranda güçlü olması önem arz etmektedir. Bundan ötürü yan sanayiinde ki işletmelerin kaliteli insan kaynağını istihdam edebilmesi için, işe alım kriterleri dikkatli seçilmeli ve süreç profesyonelce yürütülmelidir. Bu çalışmada uzmanlar tarafından iş tanımlarına göre kriterler belirlenip bu kriterler doğrultusunda alternatifler sıralanarak en uygun alternatif seçilmiştir. İşletmenin üretim çerçevesinin dar olmasından ötürü kriterler mümkün oldukça minimum düzeyde tutulmuştur. Ayrıca yapılan literatür çalışması ile kriter seçimi teyit edilmiştir.

Literatürde personel seçimi için farklı yöntemler ve kuramlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Kankılıç [7] çalışmasında, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerini karma bir şekilde kullanmıştır. Kriterlerin ağırlıklarını bulanık AHP ile hesaplamış olup, alternatifler arasındaki sıralamayı da bulanık değerlendirme metoduyla hesaplamıştır. Problemden kullanılan kriterler, eğitim, yabancı dil, tecrübe, karakter testi, kabiliyet testi, mülakat, referans ve özgeçmiş olarak seçilmiştir. Özgörmüş vd.'nin [2] çalışmasında, personel seçiminde, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılmıştır. Kriterler ve alternatifler değerlendirilirken var olan belirsizliği ortadan kaldırmak adına yöntem bulanık mantık metodu yardımıyla bulanıklaştırılmıştır. Problemden kullanılan kriterler, fiziksel özellikler, bilgisayar bilgisi, eğitim, yabancı dil, deneyim, referans ve yetkinlik kriterleri olarak belirlenmiştir. Dağdeviren [8] çalışmasında, aynı şekilde AHP'yi kullanmış olup, sonuçların doğru bir yanıt vermesi için yöntem bulanıklaştırılmıştır. Değerlendirme sürecinde kullanılan kriterler, teknik faktörler, davranışsal faktörler ve diğer faktörler olarak 3 ana kriter üzerinde durulmuş olup, problemde ayrıca bu üç ana kriterin alt kriterleri de dikkate alınmıştır.

Özkan [9] çalışmasında, AR-GE departmanı için mühendis alma sürecini incelenmiştir. Problemden, AHP, ELECTRE ve TOPSİS yöntemleri birlikte incelenmiştir. Değerlendirme kriterleri, eğitim, tecrübe, yabancı dil ve kişilik olarak belirlenmiştir. Bali [10] bulanık ikili karşılaştırmalı boyut analizi ve bulanık VIKOR yöntemlerinden yararlanarak personel seçimi problemi için bulanık küme temelli birçok nitelikli karar verme (ÇNKV) modeli önermiştir. Çalışmada ele alınan kriterler, genel görünüş, anlatma yeteneği, çalışma disiplini olarak tanımlanmıştır. Kelemenis ve Askounis [11] çalışmalarında, bilgi teknolojileri alanında hizmet veren bir işletmede bilgi işlemleri grup başkanı seçimi incelenmiştir. Problemde TOPSİS yöntemi

kullanılmış olup, alternatifler arasından doğru bir sıralama yapabilmek adına yöntem bulanıklaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri, stratejik karar verme, iletişim becerisi, risk-kriz yönetimi, bilişim ağı, profesyonel deneyim, eğitim geçmişi, liderlik olarak seçilmiştir. Doğan ve Önder [12] çalışmalarını bilişim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede satış temsilcisinin seçimi üzerine yapmışlardır. Problem çözümünde iki farklı karar verme yöntemi birlikte kullanılmıştır. Değerlendirme kriterleri, tecrübe/iş deneyimi, eğitim, bireysel özellikler ve dış görünüm olarak belirlenmiştir. Boran [13] çalışmasında iletişim ve bilişim alanında bulunan bir işletmenin personel seçimi için, TOPSIS yöntemini kullanmış, fakat bu yöntemi daha zengin bir hale getirmek için sezgisel bulanık ortama genişletilmesini önermiş ve bu yöntemi satış uzmanı seçim problemine uygulamıştır. Çalışmadaki kriterler, diksiyon, deneyim, kendini ifade edebilme yeteneği kendine güven ve ilk izlenim olarak dikkate alınmıştır.

Sang vd.'nin [14] çalışmasında, elektrik mühendisi seçim süreci incelenmiştir. Karar verme yöntemlerinden AHP ve Bulanık Veri Zarflama Analizini karma olarak kullanılmıştır. Problemdeki karar kriterleri, iş deneyimi, eğitim geçmişi, mesleki bilgi ve uzmanlık olarak belirlenmiştir. Aksakal ve Dağdeviren [15] personel seçimi çalışmalarında iki farklı karar verme yöntemini, bulanık AHS ve bulanık DEMATEL yöntemini tercih etmişlerdir. Personel seçiminde kullanılan kriterleri, bireysel bilgi ve beceri, takım çalışmasına uyum, disiplinli ve yenilikçi çalışma yaklaşımı, problem çözme tekniği, teknik ve fonksiyonel yeterlilik olarak belirlenmiştir. Efe ve Kurt [16] çalışmalarında personel seçim sürecine yardımcı olması için bulanık genişletilmiş AHP ve Bulanık TOPSIS yaklaşımlarını kullanan bir model sunmuşlardır. Değerlendirme kriterleri, kendine güven, bilgisayar yeteneği, geçmiş tecrübe, sözlü iletişim becerisi, eğitim düzeyi, organizasyon ve planlama yeteneği, yabancı dil ve iş kanunu bilgisi olarak seçilmiştir. Ilgaz [17] çalışmasında lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin personel alma sürecini incelemiştir. Çalışmada AHP ve TOPSIS yöntemi kullanılmış olup kriterler, teknik yeterlilik, mesleki yeterlilik, fiziksel yeterlilik ve sosyal yeterlilik olarak seçilmiştir. Değermenci ve Ayvaz [18] bankacılık sektöründe faaliyet gösteren katılım bankasının uzman yardımcısı seçim problemini bulanık TOPSIS yöntemi ile incelemişlerdir. Problemdeki karar kriterleri, analitik düşünme yeteneği, takım çalışmasına uyum, özgüven, bankacılık bilgisi, bilgisayar bilgisi, yabancı dil bilgisi, adayın iş tecrübesi olarak belirlenmiştir. Akar ve Çakır [19] lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir işletme için lojistik operasyon elemanı alım sürecini, bulanık AHP kullanarak hesaplamışlardır. Önem ağırlıkları ve adaylar arasındaki sıralama MOORA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme kriterleri, temel düzey bilgisayar bilgisi, lojistik bilgi teknolojileri bilgisi, raporlama yeteneği şeklindedir. Ulutaş vd.'nin [20] çalışmadaki kriterlerin ağırlıklarını BAHS yöntemi ile bulmuş, aday personeller arasındaki sıralama ise klasik yöntemlerden farklı olarak BGİA yöntemiyle hesaplanmıştır. Problemdeki karar kriterler, ürün, hammadde ve üretim hakkında bilgi seviyesi, üretim hakkındaki tecrübesi, risk değerlendirme ve önlem alma becerileri, takım çalışmasına uyumluluk, talep edilen ücret şeklindedir.

Kuşakçı vd.'nin [21] çalışmasında, havacılık sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin çeşitli departmanlarda istihdam edilmesi planlanan uzman personel seçimi MULTIMOORA yöntemiyle hesaplanmıştır. Çalışmada üç ana kriterin başlığı altında 8 ayrı alt kriter dikkate alınmıştır. Ana kriterler kurumsal kültür, mesleki yeterlilikler ve kurumsal yeterliliklerdir. El-Santawy [22] çalışmasını VIKOR yöntemi yardımı ile gerçekleştirmiştir. Kriter olarak yaş, iş deneyimi, şirket tecrübesi ve insan kaynakları sınavı sonucunu seçmiştir. Yıldız ve Deveci [23] ise çalışmasında bir teknoloji işletmesinin personel seçimini VIKOR yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada iş tecrübesi, eğitim düzeyi, yabancı dil, aldığı eğitimler ve sosyal ilişkiler kriter olarak ele alınmıştır. Uçar vd.'nin [24] çalışmasında bulanık AHP yönteminden yararlanılarak Gazi üniversitesi endüstri mühendisliği bölümünde derslerin istenen amaçlar doğrultusunda atandığı optimal bir ders çizelgesi elde edilmiştir.

## 2. METODOLOJİ (METHOD)

### 2.1. Bulanık Küme Teorisi

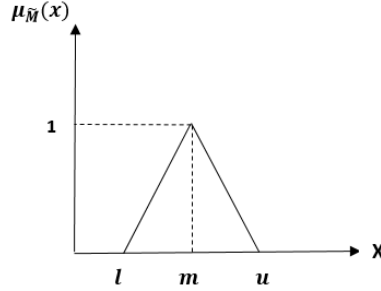
Bulanık küme teorisinde kesin sayısal değerler için günlük hayattaki dilsel ifadeleri barındıran değişkenler ile çalışılır [25]. Bu dilsel ifadeler bulanık sayılara çevrilerek çözümlenmeler sağlanır. Bulanık üyelik fonksiyonlarının üçgensel, yamuksal vb. gibi birçok çeşitli biçimleri mevcuttur. Bu çalışmada kolaylık sağlaması için üçgensel bulanık sayılar tercih edilmiştir. Şekil 1'de,  $\tilde{M} = (l, m, u)$  diye gösterilen üçgensel bir bulanık sayının üyelik fonksiyonu şu şekilde gösterilir;



$$\mu_{\tilde{M}}(x):R \rightarrow [0,1]$$

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \text{ veya } x > u, \\ (x - l)/(m - l) & l \leq x \leq m, \\ (x - u)/(m - u), & m \leq x \leq u, \end{cases}$$

1



Şekil 1. Üçgensel Bulanık Sayı Üyelik Fonksiyonu

## 2.2. Bulanık VIKOR Yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden biri olan VIKOR yöntemi, birbiri ile çelişki içinde bulunan kriterler altında alternatifleri sıralayarak, içlerinden en uygun alternatifin seçimi prensibine dayalı bir yöntemdir [26]. Yöntemin amacı, her alternatif için indeks değeri bulup, daha sonra bu değerleri sıralayarak uzlaştırıcı çözüm bulmaktır.

VIKOR yöntemi tek başına bir karar problemini çözme konusunda yetersiz kalabilir. Özellikle karar kriterleri çok sayıdaysa bu kompleks bir probleme dönüşmüş olur. Doğru ve objektif bir sonuç alabilmek için yöntem bulanık mantık ile bulanıklaştırılır. Yöntemde dilsel değişkenler dikkate alınarak uzlaşık bir çözüme gidilmiştir. İzlenen yöntem aşağıdaki gibidir [27].

Başlangıçta problemi çözmek için karar verici bir grup, alternatif ve alternatifleri değerlendirecek kriterleri oluşturur. Ardından Dilsel değişkenler ve onlara ilişkin bulanık sayılar, Tablo 1’de ki gibi ayrıntılı bir şekilde gösterilir.

Tablo 1. Dilsel Değişken ile Bulanık Sayı Değerleri [27]

Kriterlerin Ağırlıkları		Alternatiflerin Değerlendirilmeleri	
Dilsel Değişkenler	Bulanık Sayılar	Dilsel Değişkenler	Bulanık Sayılar
Çok Düşük	0, 0, 0.1	Çok Kötü	0, 0, 1
Düşük	0, 0.1, 0.3	Kötü	0, 1, 3
Orta Düşük	0.1, 0.3, 0.5	Orta Kötü	1, 3, 5
Orta	0.3, 0.5, 0.7	Orta	3, 5, 7
Orta Yüksek	0.5, 0.7, 0.9	Orta İyi	5, 7, 9
Yüksek	0.7, 0.9, 1.0	İyi	7, 9, 10
Çok Yüksek	0.9, 1.0, 1.0	Çok İyi	9, 10, 10

Bir sonraki adımda kriterlerin ağırlıklarını tespit etmek için dilsel değişkenler, Tablo 1’de ki veriler yardımıyla hazırlanır ve bu dilsel ifadeler bulanıklaştırılır. 2 numaralı formülle kriterlerin bulanık ağırlıkları hesaplanır ve matris formatına getirilir.

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{n} [\sum_{e=1}^n \tilde{w}_j^e] \quad j = 1, 2, \dots, k$$

2

Karar vericiler yine Tablo 1’de ki veriler ışığında alternatifler için değerlendirmiş oldukları sözsöz ifadeleri karşısındaki bulanık sayılar ile bulanıklaştırır. Burada;  $i$ . alternatifin  $j$ . kriterine göre önem ağırlığı hesaplanır.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{n} [\sum_{e=1}^n \tilde{x}_{ij}^e] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 3$$

Bir önceki aşamada elde edilen veriler yardımıyla yöntemin uygulanacağı bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_k \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mk} \end{matrix} \quad 4$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_k], \quad j = 1, 2, \dots, k \quad 5$$

$\tilde{x}_{ij}$ ,  $C_j$  kriterine göre  $A_i$  alternatifinin derecesi;  $w_j$ ,  $j$ . kriterin önem ağırlığını ifade etmektedir. Bulanık karar matrisi ortaya konulduktan sonra bu adımda her bir kriterin ayrı ayrı her bir alternatife göre her bir bulanık en iyi değer ( $\tilde{f}_j^*$ ) ve en kötü değer ( $\tilde{f}_j^-$ ) hesaplanır.

$$\tilde{f}_j^* = \max_i \tilde{x}_{ij} \quad \tilde{f}_j^- = \min_i \tilde{x}_{ij} \quad 6$$

Daha sonra  $\tilde{S}_i$  ve  $\tilde{R}_i$  değerleri hesaplanır.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^k \tilde{w}_j (\tilde{f}_j^* - \tilde{x}_{ij}) / (\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_j^-) \quad 7$$

$$\tilde{R}_i = \max_j [\tilde{w}_j (\tilde{f}_j^* - \tilde{x}_{ij}) / (\tilde{f}_j^* - \tilde{f}_j^-)] \quad 8$$

$\tilde{S}_i$  değeri  $A_i$  alternatifinde kriter değerlerinin en iyi bulanık değere olan uzaklıklarının toplamını göstermektedir.  $\tilde{R}_i$  değeri ise  $j$ . kritere göre  $A_i$  alternatifinin bulanık en kötü değere olan maksimum uzaklığıdır.

Ardından  $\tilde{S}^*$ ,  $\tilde{S}^-$ ,  $\tilde{R}^*$ ,  $\tilde{R}^-$  ve  $\tilde{Q}_i$  değerleri hesaplanır.

$$\tilde{S}^* = \min_i \tilde{S}_i, \quad \tilde{S}^- = \max_i \tilde{S}_i \quad 9$$

$$\tilde{R}^* = \min_i \tilde{R}_i, \quad \tilde{R}^- = \max_i \tilde{R}_i \quad 10$$

$$\tilde{Q}_i = v (\tilde{S}_i - \tilde{S}^*) / (\tilde{S}^- - \tilde{S}^*) + (1 - v) (\tilde{R}_i - \tilde{R}^*) / (\tilde{R}^- - \tilde{R}^*) \quad 11$$

$\tilde{R}^*$  karşı görüştekilerin minimum pişmanlığını ifade ederken  $\tilde{S}^*$  maksimum grup faydasını göstermektedir. Alternatifler arasında sıralama yapmak için  $\tilde{Q}_i$  hesabı yapılmaktadır. Bu hesaplama sonucunda bulunmuş olduğumuz  $\tilde{Q}_i$  değeri ne kadar küçükse o derece pozitif ideal çözüme yakınız demektir.  $v$  değeri maksimum grup faydasını oluşturan stratejinin ağırlığını göstermektedir. Uzlaşmacı çoğunluk için  $v \approx 0.5$  alınabilir [28].

Her bir alternatif için bulunmuş olduğumuz  $\tilde{Q}_i$  indeks değerlerinin doğru bir sonuç vermesi için durulaştırma yöntemi uygulanır ve  $Q_i$  bulunur. Bu çalışma için durulaştırma yöntemi olarak Hsieh vd.’nin [29] önerdiği BNP (Best Nonfuzzy Performance Value) tercih edilmiştir.

Formül incelendiğinde üçgensel bir bulanık sayıda 3 bileşen bulunmaktadır. Burada  $u_i$  üçgen bulanık sayının üst değerini,  $m_i$  orta değerini,  $l_i$  ise alt değerini göstermektedir.

$$BNP_i = [(u_i - l_i) + (m_i - l_i)] / 3 + l_i \quad \forall i \quad 12$$

$Q_i$  ile alternatiflerin sıralaması yapılır ve bu sıralamada en küçük indeks değerine sahip olan alternatif doğru bir tercihtir diyebiliriz. Alternatiflerin indeks değerleri bulunduktan sonra uzlaştırıcı çözümün tespit edilmesi gerekir. Eğer aşağıdaki koşullar sağlanırsa,  $Q_i$  indeksi ile ortaya koyulan çözüm, uzlaştırıcı çözümdür.

1. Koşul: Kabul edilebilir avantaj

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad 13$$

Burada ( $a'$ ) değeri birinci en iyi alternatifi, ( $a''$ ) değeri, ikinci en iyi alternatifin  $Q$  değerini göstermektedir.

$$DQ = \frac{1}{m-1} \quad (m \leq 4 \text{ ise } DQ = 0.25) \quad 14$$

2. Koşul: Karar vermede kabul edilebilir istikrar

S ve/veya R değerleri baz alınarak yapılan sıralamaya göre  $a'$  en iyi alternatiftir. Bu uzlaştırıcı çözüm karar verme sürecinde istikrarlıdır. Eğer  $Q(a^m) - Q(a') \leq DQ$  ise ve 1. koşul yerine gelmiyorsa  $a^m$  ve  $a'$  ise uzlaştırıcı çözümlerdir. Uzlaştırıcı çözümler ( $a'$ ,  $a''$ , ...,  $a^m$ ) benzer olduklarından  $a'$  karşılaştırmalı bir üstünlüğe sahip değildir. Eğer 2. koşul sağlanamıyorsa,  $a'$  karşılaştırmalı bir üstünlüğe sahibi olsa da belli bir istikrara sahip değildir. Bundan dolayı  $a'$  ve  $a''$  uzlaştırıcı çözümü aynıdır.

### 3. UYGULAMA (IMPLEMENTATION)

Bu çalışmada oto yedek parça üretimi yapan bir işletmenin personel alma süreci incelenmiştir. Karar verici yöntem olarak, VIKOR yöntemi seçilmiş olup, yöntemin sağlıklı bir sonuç vermesi için bulanıklaştırılmıştır. Süreci aşağıdaki gibi adım adım tanımlayabiliriz.

*Adım 1:* İnsan kaynakları müdürü, üretim bölüm müdürü, saha destek bölüm müdürü ve kalite yönetim şefinden oluşan uzman karar verici grup bir araya gelir. Problemdeki alternatif sayısı belirlendikten sonra karar kriterleri belirlenir. Karar kriterleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Problemdeki Karar Vericiler (KV) Tarafından Belirlenen Karar Kriterleri

Değerlendirme Kriterleri	Açıklama
Problem Çözme Yaklaşımı (C1)	Problemin farkına varıp, sorunu çözmeye yönelik algoritma oluşturma
Planlama ve Organizasyon (C2)	Zaman ve kaynakları doğru kullanma, iş temposuna ayak uydurma
Bilgi ve Deneyim (C3)	Mesleki deneyim, mesleki bilgi
Kurum Kültürüne Uyum (C4)	Kurumu tanıma, kurumun kültürel değerlerine uygunluk, kurumu başarıyla temsil etmek
İletişim Becerisi (C5)	Kendin ifade edebilmesi, özgüven sahibi, beden dilini aktif ve tutarlı kullanması

*Adım 2:* Bu noktada karar kriterlerini ve her bir kritere göre alternatifleri değerlendirmek için dilsel değişkenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tablo 1, bize bu konuda referans olup sözsözsel ifadeli tablolarımızı oluşturmada yardımcı olmaktadır.

*Adım 3:* Kriterler ve her bir alternatifi ayrı ayrı kriterlere göre sözsözsel değerlendirilmeler tablosu haline getirilir. Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir. Akabinde yine Tablo 1, dikkate alınarak bu dilsel değişkenler, karşılarında yazan bulanık değerleriyle ağırlıklandırılmıştır. Bu işlemler Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Karar vericiler(KV); K1, K2, K3, K4 olarak ifade edilmiştir.

**Tablo 3.** Karar Kriterlerinin Sözsözsel İfadeleri

	C1	C2	C3	C4	C5
<b>K1</b>	Yüksek	Orta Yüksek	Orta Yüksek	Orta	Düşük
<b>K2</b>	Orta Düşük	Orta	Orta	Orta Yüksek	Yüksek
<b>K3</b>	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Orta	Orta Düşük
<b>K4</b>	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek

**Tablo 4.** Alternatiflerin Sözel İfadeleri

Alternatifler	KV	C1	C2	C3	C4	C5
<b>A1</b>	K1	Orta	İyi	Kötü	İyi	İyi
	K2	Kötü	Orta	Orta Kötü	Orta İyi	Kötü
	K3	İyi	Orta İyi	İyi	Kötü	Orta Kötü
	K4	Çok İyi	Kötü	Orta	İyi	İyi
<b>A2</b>	K1	İyi	Çok İyi	Orta İyi	Orta	Orta
	K2	Çok İyi	Orta	İyi	Kötü	Orta
	K3	İyi	Kötü	Kötü	İyi	İyi
	K4	İyi	Çok İyi	Çok Kötü	Kötü	Orta İyi
<b>A3</b>	K1	İyi	Çok İyi	İyi	Kötü	İyi
	K2	Orta	İyi	İyi	Çok Kötü	Çok İyi
	K3	Kötü	Orta İyi	Orta	Orta	Kötü
	K4	Orta Kötü	Kötü	Kötü	Orta İyi	Orta
<b>A4</b>	K1	İyi	Orta İyi	İyi	İyi	İyi
	K2	Orta İyi	Kötü	İyi	Orta	Orta İyi
	K3	Orta	Orta	Orta İyi	Çok Kötü	İyi
	K4	İyi	İyi	Kötü	Kötü	Orta
<b>A5</b>	K1	Orta	Çok İyi	Orta	İyi	Orta
	K2	İyi	Kötü	Orta	Orta İyi	Orta İyi
	K3	İyi	Orta	Kötü	Orta	İyi
	K4	Orta	İyi	Orta İyi	Kötü	Kötü

**Tablo 5.** Kriterlerin Tablo 3'de ki Verilerle Bulanıklaştırılması

KV	C1			C2			C3			C4			C5		
<b>K1</b>	0,7	0,9	1	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0	0,1	0,3
<b>K2</b>	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1
<b>K3</b>	0,7	0,9	1	0,9	1	1	0,9	1	1	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5
<b>K4</b>	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1	0	0,1	0,3	0,7	0,9	1
<b>Ort.</b>	0,45	0,65	0,8	0,5	0,68	0,83	0,6	0,78	0,9	0,28	0,45	0,65	0,38	0,55	0,7

**Tablo 6.** Alternatiflerin Tablo 2'de ki Verilerle Bulanıklaştırılması

	KV	C1			C2			C3			C4			C5		
<b>A1</b>	K1	3	5	7	7	9	10	0	1	3	7	9	10	7	9	10
	K2	0	1	3	3	5	7	1	3	5	5	7	9	0	1	3
	K3	7	9	10	5	7	9	7	9	10	0	1	3	1	3	5

	K4	9	10	10	0	1	3	3	5	7	7	9	10	7	9	10
	Ort.	4,75	6,25	7,50	3,75	5,50	7,25	2,75	4,5	6,25	4,75	6,50	8	3,75	5,50	7
A2	K1	7	9	10	9	10	10	5	7	9	3	5	7	3	5	7
	K2	9	10	10	3	5	7	7	9	10	0	1	3	3	5	7
	K3	7	9	10	0	1	3	0	1	3	7	9	10	7	9	10
	K4	7	9	10	9	10	10	0	0	1	0	1	3	5	7	9
	Ort.	7,5	9,25	10	5,25	6,5	7,5	3	4,25	5,75	2,5	4	5,75	4,5	6,5	8,25
A3	K1	7	9	10	9	10	10	7	9	10	0	1	3	7	9	10
	K2	3	5	7	7	9	10	7	9	10	0	0	1	9	10	10
	K3	0	1	3	5	7	9	3	5	7	3	5	7	0	1	3
	K4	1	3	5	0	1	3	0	1	3	5	7	9	3	5	7
	Ort.	2,75	4,5	6,25	5,25	6,75	8	4,25	6	7,5	2	3,25	5	4,75	6,25	7,5
A4	K1	7	9	10	5	7	9	7	9	10	7	9	10	7	9	10
	K2	5	7	9	0	1	3	7	9	10	3	5	7	5	7	9
	K3	3	5	7	3	5	7	5	7	9	0	0	1	7	9	10
	K4	7	9	10	7	9	10	0	1	3	0	1	3	3	5	7
	Ort.	5,5	7,5	9	3,75	5,5	7,25	4,75	6,5	8	2,5	3,75	5,25	5,5	7,5	9
A5	K1	3	5	7	9	10	10	3	5	7	7	9	10	3	5	7
	K2	7	9	10	0	1	3	3	5	7	5	7	9	5	7	9
	K3	7	9	10	3	5	7	0	1	3	3	5	7	7	9	10
	K4	3	5	7	7	9	10	5	7	9	0	1	3	0	1	3
	Ort.	5	7	8,5	4,75	6,25	7,5	2,75	4,5	6,5	3,75	5,5	7,25	3,75	5,5	7,25

*Adım 4:* Bu aşamada kriterler için Bulanık matrisi oluşturulur. Fakat her bir kriterin Tablo 5’de görüldüğü üzere birden fazla ağırlığı bulunmaktadır. Amaç, kriterlerin ağırlığını tek bir üçgensel bulanık sayıya indirmek. Bu yüzden 2 numaralı denklem yardımıyla her bir kriter kendi içinde formül gereği ortalamaya tabii tutulur. Böylece her bir kriterin kendisine ait tek bir bulanık değeri oluşturulur ve Tablo 7’de ki gibi görülür.

**Tablo 7.** Kriterlerin Bulanık Ağırlıkları

Kriterler	Bulanık Ağırlıklar ( $w_j$ )			BNP <sub>i</sub> Ort.
	$l$	$m$	$u$	
C1	0,45	0,65	0,80	0,63
C2	0,50	0,68	0,83	0,67
C3	0,60	0,78	0,90	0,76
C4	0,28	0,45	0,65	0,46
C5	0,38	0,55	0,70	0,54

Her bir alternatifin karar vericiler tarafından belirlenmiş olan sözsöz ifadeleri Tablo 1 yardımıyla bulanıklaştırılmış olup sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir. Buradan nihai karar matrisini elde etmek için her bir alternatifin birden fazla tanımlı olan bulanık sayı değerleri 3 numaralı denklem yardımıyla tek bir bulanık sayıya indirilmiştir. Bu verilerden bulanık karar matrisi oluşturularak sonuçlar Tablo 8'de işlenmiştir.

**Tablo 8. Bulanık Karar Matris**

	A1			A2			A3			A4			A5		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b>C1</b>	4,75	6,25	7,5	7,5	9,25	10	2,75	4,5	6,25	5,5	7,5	9	5	7	8,5
<b>C2</b>	3,75	5,5	7,25	5,25	6,5	7,5	5,25	6,75	8	3,75	5,5	7,25	4,75	6,25	7,5
<b>C3</b>	2,75	4,5	6,25	3	4,25	5,75	4,25	6	7,5	4,75	6,5	8	2,75	4,5	6,5
<b>C4</b>	4,75	6,5	8	2,5	4	5,75	2	3,25	5	2,5	3,75	5,25	3,75	5,5	7,25
<b>C5</b>	3,75	5,5	7	4,5	6,5	8,25	4,75	6,25	7,5	5,5	7,5	9	3,75	5,5	7,25

**Adım 5:** Bulanık karar matrisi ile her bir kriterin ayrı ayrı her bir alternatife göre en iyi ( $\tilde{f}_j^*$ ) ve en kötü değerleri ( $\tilde{f}_j^-$ ), 6 no'lu denklem ile ortaya konularak sonuçlar Tablo 9'da ifade edilmiştir.

**Tablo 9. Her Bir Kriterin En İyi ve En Kötü Değerleri**

Kriterler	$\tilde{f}_j^*$			$\tilde{f}_j^-$		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b>C1</b>	7,5	9,25	10	2,75	4,5	6,25
<b>C2</b>	5,25	6,75	8	3,75	5,5	7,25
<b>C3</b>	4,5	6,5	8	3	4,25	5,75
<b>C4</b>	4,75	6,5	8	2	3,25	5
<b>C5</b>	5,5	7,5	9	3,75	5,5	7

**Adım 6:** Her bir kritere göre alternatiflerin en iyi bulanık değere uzaklığının toplamı 7 no'lu denklem yardımıyla hesaplanır. Böylece her bir alternatifin en iyi bulanık değere olan yakınsaklığı hesaplanmış olur. Her bir alternatif için bu hesaplama yapılmış olup sonuçlar Tablo 10'da düzenlenmiştir.

**Tablo10. Alternatiflerin En İyi Bulanık Değere Uzaklıkları Toplamı**

Alternatifler	$\tilde{S}_i$			BNP <sub>i</sub> Ort.
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	
<b>A1</b>	1,84	2,32	2,76	2,31
<b>A2</b>	1,04	1,53	2,20	1,59
<b>A3</b>	0,99	1,62	2,18	1,59
<b>A4</b>	0,81	1,30	1,63	1,25
<b>A5</b>	1,58	1,96	2,25	1,93

Bu adımda,  $\tilde{R}_i$  değeri olarak tanımlanan bu indis 8 no'lu denklem aracılığıyla hesaplanmıştır. Aynı işlemi her bir alternatif için hesapladıktan sonra, sonuçları Tablo 11'de ki gibi görülür.

**Tablo 11.** Alternatiflerin En Kötü Değere Maksimum Uzaklığı

Alternatifler	$\tilde{R}_i$			BNP <sub>i</sub> Ort.
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	
<b>A1</b>	0,70	0,69	0,825	0,74
<b>A2</b>	0,60	0,78	0,90	0,76
<b>A3</b>	0,45	0,65	0,80	0,63
<b>A4</b>	0,50	0,68	0,83	0,67
<b>A5</b>	0,70	0,69	0,61	0,67

Adım 7: 9. ve 10. denklemler ile hesaplanan  $\tilde{S}^*min$ ,  $\tilde{S}^-max$ ,  $\tilde{R}^*min$ ,  $\tilde{R}^-max$  değerleri Tablo 12 ve Tablo 13'de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** Grup Faydasının  $\tilde{S}^*min$ ,  $\tilde{S}^-max$  Değerleri

	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b><math>\tilde{S}^*min</math></b>	0,81	1,30	1,63
<b><math>\tilde{S}^-max</math></b>	1,84	2,32	2,76

**Tablo 13.** Bireysel Pişmanlığın  $\tilde{R}^*min$ ,  $\tilde{R}^-max$  Değerleri

	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
<b><math>\tilde{R}^*min</math></b>	0,45	0,65	0,80
<b><math>\tilde{R}^-max</math></b>	0,60	0,78	0,90

Tablo 12 ve Tablo 13'de ki değerler yardımıyla her bir alternatifin indeks değeri  $\tilde{Q}_i$  değerini hesaplamaya geçilir. 11 no'lu denklemin çözümü için *v* değerini de bilmemiz gerekir. Çalışmamızda uzlaşık bir çözüm aradığımız için bu değeri (0,5) olarak alacağız. Alternatiflerin indeks değerleri hesaplandıktan sonra Tablo 14'de uzlaşık çözüm değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 14.** Alternatiflerin Uzlaşık Değerleri

Alternatifler	$\tilde{Q}_i$			BNP <sub>i</sub> Ort.
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	
<b>A1</b>	1,33	0,65	0,62	0,87
<b>A2</b>	0,61	0,59	0,75	0,65
<b>A3</b>	0,09	0,15	0,24	0,16
<b>A4</b>	0,17	0,09	0,13	0,13
<b>A5</b>	1,21	0,47	-0,67	0,34



Adım 8:  $S_i$ ,  $R_i$ ,  $Q_i$  değerlerini, 12 no'lu denklem ile durulaştırma işleminden geçirerek, alternatifler arasındaki sıralamayı veren Tablo 15'i oluştururuz. En küçük indeks değerine haiz alternatif, seçim için en uygun alternatif olarak tanımlanır.

**Tablo 15.** Alternatiflerin  $Q_i$ ,  $S_i$ ,  $R_i$  Sıralaması

Alternatifler	$Q_i$		$S_i$		$R_i$	
	İndeks	Sıra	İndeks	Sıra	İndeks	Sıra
A1	0,87	5	2,31	4	0,74	3
A2	0,65	4	1,59	2	0,76	4
A3	0,16	2	1,59	2	0,63	1
A4	0,13	1	1,25	1	0,67	2
A5	0,34	3	1,93	3	0,67	2

Adım 9: Tablo 15'de ki veriler incelendiğinde yöntemin ortaya koyduğu kural gereği, en küçük indeks değerine haiz olan ( $Q_i$ ) alternatif en uygun seçimdir sonucunu bize vermektedir. Bu verilen bilgiye göre A4 Alternatifi indeks değeri diğer alternatiflere göre minimum olduğundan personel seçiminde tercih edilebilecek bir alternatiftir. Fakat yöntem bize bu alternatifin uzlaştırıcı çözümü verip vermediğini de sorgulattığı için bir sonraki adımda aşağıda verilen iki koşulun sağlanması incelenmektedir.

**1.Koşul - Kabul Edilebilir Avantaj:** 13 numaralı denkleme göre;  $Q(A'') - Q(A') \geq 0.25$  şartı yerine gelmelidir. Tablo 15'de ki verilere göre A4 alternatifinin indeks değeri ( $Q_i$ ) değeri 0,13'tür. Formülde ki tanım, en iyi indeks değerine haiz olan birinci alternatif ile ikinci en iyi indeks değerine sahip olan alternatifin indeks değerinin farkını alıp, çıkan sonucun 14 numaralı eşitlikte tanımlı olan (DQ) değerinden büyük olması beklenmektedir. Bu bilgiler ışığında çıkan sonucun büyük olmadığı görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç en iyi alternatif olan yani A4'nün tek başına avantajlı olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

**2.Koşul - Kabul Edilebilir İstikrar:** Bu şarta istinaden en iyi alternatifin Tablo 15 'de ki verilere göre en iyi bulanık değere uzaklığın toplamını veren ( $S_i$ ) değeri ve en kötü bulanık değere olan maksimum uzaklığı veren değer ( $R_i$ ) değerlerinin herhangi birinde birinci olması gerekmektedir. Tablo incelendiğinde A4 alternatifi en iyi bulanık değere olan uzaklığın toplamını veren ( $S_i$ ) tablosunda birinci sırada görülmektedir. Böylece alternatifin kabul edilebilir istikrar koşulunu sağladığı ispatlanmış olur. A4 alternatifi için 1. Koşul sağlanmadığından, 13 numaralı eşitlik yön değiştirir ve aynı hesaplamalar tekrardan yapılır. Bu durumda 1. en iyi alternatif ile 2. en iyi alternatifin indeks değerleri farkı alınınca çıkan sonucun 14 no'lu eşitlikte tanımlanan DQ değerinden küçük çıktığı görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç A4'ün ve ikinci en iyi indeks değerine sahip olan A3'ün birlikte uzlaşık bir çözüme sahip olduğu kanaatine varılmış olunur.

Tablo 16'da Alternatifler için indeks değerleri arasındaki sıralama, en iyi bulanık değere olan uzaklığının toplamını veren indis değeri ve son olarak da en kötü bulanık değere maksimum uzaklığı veren değeri temsil eden indisin sıralaması bir arada verilmiştir.

**Tablo 16.** Alternatiflerin Sıralanması

Alternatiflerin Sıralanması	
$Q_i$	(A4 > A3 > A5 > A2 > A1)
$S_i$	(A4 > A3 = A2 > A5 > A1)
$R_i$	(A3 > A4 = A5 > A1 > A2)

Adım 10: A4 ve A3, indeks sıralamasında ve en iyi bulanık değere uzaklığın toplamını veren ( $S_i$ ) değerinde ilk iki sırada yer almaktadır. Buradan çıkarılacak sonuç, eğer işletme tek bir personel alımı yapacaksa, indeks değeri en iyi olan alternatifi yani A4 'ü seçecektir. Eğer ikinci bir alım yapacaksa ikinci en iyi indeks değerine sahip olan A3'ü de A4 ile birlikte seçecektir.

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

İnsan kaynakları yönetimi geçmişten günümüze işletmeler için önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle işletmelerin rekabetçi ortamda varlık gösterebilmeleri, gelişen ve değişim gösteren iş dünyasında hayatta kalabilmeleri için ellerindeki kaynakları doğru ve tam zamanında kullanmaları gerekmektedir. Bu noktada, işletmelerin insan kaynakları birimlerine önemli görevler düşmekte ve doğru personelin seçilmesi önem arz etmektedir. Doğru personel seçimi yapılmazsa bu durum işletme için ciddi bir maliyete yol açabilir. Bu yüzden insan kaynakları yetkilileri, personel seçimi yaparken, seçilecek personel veya personellerden en aktif şekilde nasıl verim alınabilir sorusunu muhakkak kendilerine sormalıdırlar. Bir başka bakış açısına göre insan kaynakları, personel seçimi yaparken elinde tuttuğu kriterlere, personel adayının ne denli uyum sağladığını gözlemlemesi gerekir. İşletmeler, personel alımı yaparken adaylar arasında sağlıklı seçim yapmakta zorluk çekebilir ve personel seçerken belirlenen kriterler arasından doğru karar vermekte de zorluk yaşayabilirler.

Bu noktada, işletmelere destek olan ve bu kararsızlık sürecini modern yöntemlerle yürüten ÇKKV önemli bir araç olarak işlev görmektedir. Yöntemin en temel amacı, karar verme sürecindeki belirsizliği kontrol edip, bu olumsuzluğu kendi bünyesindeki çeşitli yöntemlerle çözüme kavuşturmayı sağlayabilmektir. Bu çalışmada, personel seçimi konusunda zorluk yaşayan bir işletmenin mühendis alma süreci, ÇKKV yöntemi ile incelenmiş olup, alternatifler arasından en uygun personel adayı seçimi yapılmıştır. Çalışmada Otomotiv yan sanayiinde oto yedek parça üretimi yapan bir işletmenin 5 mühendis adayı arasından en uygun olanının seçilmesi incelenmiştir.

Otomobil sanayisinin üretim ve ekonomide etkin ve ciddi miktarda pay sahibi olması yan sanayisinin de gelişmesini tetiklemiştir. Yan sanayiinde ne kadar kaliteli insan kaynağı olursa o kadar kaliteli ürün ve o kadar güvenilir bir tedarik zinciri ortaya çıkacağı muhakkaktır. Bundan ötürü bu çalışmanın özellikle ülkemizde önemli bir yere sahip olan otomobil yan sanayiinde personel seçimine katkı yapması beklenmektedir. Ayrıca otomobil yan sanayiinde faaliyet gösteren irili ufaklı işletmelerin personel seçiminde bilimsel yöntemleri kullanmasını teşvik edecek bir bilincin oluşmasına da önemli katkı yapacağı öngörülmektedir. Yan sanayiinde personel seçiminin kalite ve tedarik zincirine olumlu katkısı, bu konuda yapılan çalışmaların önemini somut olarak da ortaya koymaktadır. Sektörün teknoloji ve ekonomiye direkt etkisi olmasından ötürü, üretimin ilk aşaması olarak kabul edebileceğimiz yan sanayiinde personel seçimi, daha sonraları telafi edilemeyecek sorunların oluşmaması açısından da önem arz etmektedir. Personel seçim maliyetleri açısından kaçınılan her maliyet daha sonra daha ağır maliyetlere sebep olmaktadır. Bu doğrultuda alanında uzman 4 karar verici tarafından, iş tanımları ve tecrübeleri ile belirlemiş oldukları 5 ayrı kriter üzerinden personel adayları değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. Seçilen kriterler literatür taraması ile de desteklenmiştir. Kriterlerin birbirleriyle çelişmesi ve bu çelişkiyi ortadan kaldırmak adına VIKOR yöntemi kullanılmıştır. Kriterlerin çelişmesi ve karar vericilerin değerlendirme aşamasında karşılaştıkları öznellik sorununu içermesinden dolayı bu yöntemin objektif bir sonuç vermesi ve sonuçların daha sağlıklı olabilmesi için yöntem bulanıklaştırılmıştır. Çalışmadaki kriterlerin bulanık ağırlıkları durulaştırıldıktan sonra aralarında bir sıralama yapılmıştır. Bu sıralama bize hangi kriterin işletme için önemli olduğunu, hangi kriterin ise işletme için ikinci planda kaldığının yorumunu kazandırmıştır. Durulaştırma verilerine göre en önemli kriterin Bilgi-Deneyim (C3) olduğu, ikinci planda kalan kriterin ise Kurum Kültürüne Uyum (C4) olduğu görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç, işletmenin bilgiye ve tecrübeye daha çok önem verdiği, kurum kültürüne uyumun ise çok hızlı bir değişim geçireceğinden ikinci planda tutulduğu sonucudur. Çalışmanın devamında alternatifler arasından indeks sıralaması yapılmış ve en uygun alternatif A4 alternatifi olarak seçilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Werther, W. B., Davis, J. R. (1994): "Human Resource and Personnel Management", McGraw-Hill Inc.
- [2] Özgörmüş, E., Mutlu, Ö., Güner, H. (2005): "Bulanık AHP ile Personel Seçimi", Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Ticaret Üniversitesi, 111-116.
- [3] Pickle, H., Abrahamson, R. (1980): Introduction to Business (Cilt 4). Goodyear Pub.Co.

- [4] Yılmaz, N. (2009): Personel Seçim Problemine Analitik Hiyerarşi Yöntemi İle Bir Yaklaşım Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Küçükaya, G. (2006): İnsan Kaynakları Yönetiminde Personel Seçimi ve Bir Uygulama, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [6] Arvey, R., Campion, J. (1982): "The Employment Interview: A Summary and Review of Recent Research", 281-322, (Psych, Röportaj Yapan)
- [7] Kankılıç, H. (2005): "Development of a Fuzzy Decision Making Model for Personnel Selection (Yüksek Lisans Tezi)", Ankara.
- [8] Dağdeviren, M. (2007): "Personel Değerlendirme Sürecinin Bulanık AHP ile Bütünleşik Modellenmesi", Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 3(25).
- [9] Özkan, Ö. (2007): "Personel Seçiminde Karar Verme Yöntemlerinin İncelenmesi: AHP, TOPSIS, ELECTRE Örneği (Yüksek Lisans Tezi)". İstanbul.
- [10] Bali, Ö., (2013): Bulanık Boyut Analizi ve Bulanık Vikor ile Bir ÇNKV Modeli: Personel Seçimi Problemi, Kara Harp Okulu Bilim Dergisi, 23(2), 125-149.
- [11] Kelemenis, A., Askounis, D. (2010): "A new TOPSIS-based Multi-Criteria Approach to Personnel Selection", Expert systems with applications, s. 4999–5008.
- [12] Doğan, A., Önder, E. (2014): "İnsan Kaynakları Temin ve Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinin Kullanılması ve Bir Uygulama", 9(34), s. 5796–5819.
- [13] Boran, F. (2009): "Personel Seçimi Probleminde Sezgisel Bulanık Küme Uygulaması (Yüksek Lisans Tezi)", Ankara.
- [14] Sang, X., Liu, X., Qin, J. (2015): "An Analytical Solution to Fuzzy TOPSIS and Its Application in Personnel Selection for Knowledge-Intensive Enterprise", Applied Soft Computing (30), s. 190–204.
- [15] Aksakal, E., Dağdeviren, M. (2015): "Yetenek Yönetimi Temelli Personel Atama Modeli ve Çözüm Önerisi", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2(30), 249-262.
- [16] Efe, B., Kurt, M. (2018): "Bir Liman İşletmesinde Personel Seçimi Uygulaması", Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(2), 417-427
- [17] Ilgaz, A. (2018): "Lojistik Sektöründe Personel Seçim Kriterlerinin AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Değerlendirilmesi", Journal of Süleyman Demirel University Institute of Social Sciences, 3(32), 586-605.
- [18] Değermenci, A., Ayvaz, B. (2016): "Bulanık Ortamda TOPSIS Yöntemi ile Personel Seçimi: Katılım Bankacılığı Sektöründe bir Uygulama", İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 15(30), 77-93.
- [19] Akar, G., Çakır, E. (2016): "Lojistik Sektöründe Bütünleştirilmiş Bulanık AHP- MOORA Yaklaşımı ile Personel Seçimi", Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 14(2), 185-199.
- [20] Ulutaş, A., Özkan, A., Tağraf, H. (2018), "Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve Bulanık Gri İlişkisel Analizi Yöntemleri Kullanılarak Personel Seçimi Yapılması", Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 17(65), 223-232.
- [21] Kuşakçı, A., Ayvaz, B., Öztürk, F., Feyza, S. (2019): "Bulanık MULTIMOORA ile Personel Seçimi: Havacılık Sektöründe bir Uygulama", Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 96-110.

- [22] El-Santawy, M.F. (2012): "A VIKOR Method for Solving Personnel Training Selection Problem", *Internatinal Journal of Computing Science*, 1(2), 9-12.
- [23] Yıldız, A., Deveci, M. (2013): "Bulanık VIKOR Yöntemine Dayalı Personel Seçim Süreci", *Ege Akademik Bakış*. 13(4), 427-436.
- [24] Uçar, U., İşleyen, S. Demir, Y., (2015): "Üniversite Ders Çizelgeleme Probleminin Bulanık AHP ve Çok Amaçlı Karışık Tam Sayılı Matematiksel Modelle Çözümü", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3 (3) , 513-523 .
- [25] Çakır, O., Canbolat, M. (2008): "A Web-based Decision Support System for Multi-Criteria Inventory Classification Using Fuzzy AHP Methodology", *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1367-1378.
- [26] Opricovic, S., Tzeng, G. (2004): "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS", *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455.
- [27] Chen, L., Wang, T. (2000): "Optimizing Partners' Choice in IS/IT Outsourcing Projects: The Strategic Decision of Fuzzy VIKOR", *International Journal of Production Economics*, 120(1), 233-242.
- [28] Opricovic, S. (2011): "Fuzzy VIKOR With an Application to Water Resources Planning", *Expert Systems with Applications*, 38, 12983-12990.
- [29] Hsieh, T., Lu, S., Tzeng, G. (2004): "Fuzzy MCDM Approach for Planning and Design Tenders Selection in Public Office Buildings", *International Journal of Project Management*, 22(7), 573-584.

## Design Of A New Lighting Unit Using TRIZ Approach

Ceren KİRAZ<sup>1</sup> , Hüdayim BAŞAK<sup>2</sup> , Neslihan TOP<sup>3,\*</sup> , İsmail ŞAHİN<sup>4</sup> 

<sup>1,2,3,4</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6690-5270, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 17/06/2019  
 Revision 06/10/2019  
 Accepted: 23/12/2019

#### Highlights

- TRIZ.
- User centered design.
- Physical contradiction.

#### Keywords

Lighting design  
 Interior lighting  
 TRIZ methodology

In this study, a new lighting element is designed by using TRIZ methodology, by predicting that individuals using the common living space may need different intensity light at the same time. Requiring both bright and dim light in the same space is an example of physical contradiction according to the TRIZ methodology, and this problem is solved by the principles of separation methods in time and space.

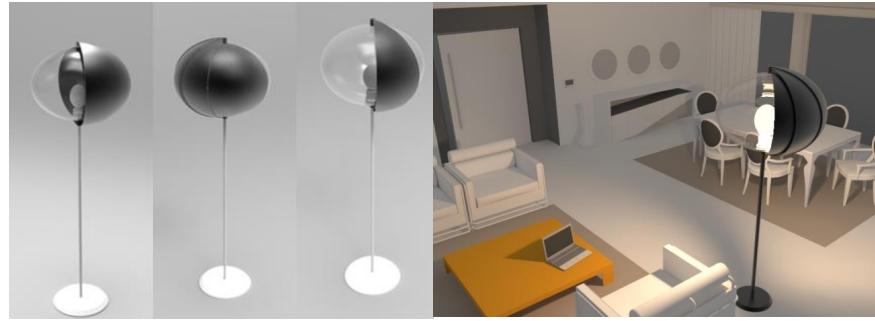


Figure A. Design and use of lighting element

**Purpose:** In this study, it was ensured that different light levels were obtained in the same space with a new user-oriented lighting design. A new lighting element has been designed in order to meet the individualization needs of people who use the common living space such as dormitory, office, hotel etc. It is possible to obtain different levels of light in the same place and time with this lighting element.

**Theory and Methods:** With the TRIZ methodology, a new lighting element has been designed with physical conflict solutions used in the problem solving process. It is an example of physical contradiction that it is desired to be both dark and light at the same time and place. In the solution of the problem, a lighting element that can be adjusted according to the usage situation has been developed by using separation methods in time and space.

**Results:** It has been seen that different light levels can be obtained in the same space according to the image results obtained as a result of three-dimensional modeling and visualization of the lighting element design. By using the moving parts on the lighting designed in a circular form in different locations, different lighting levels that will occur in the space are obtained.

**Conclusion:** Expecting a space to be both bright and dim at the same time was defined as a physical contradiction according to the TRIZ methodology and was resolved by separation methods in space and time. In contradictions that arise during solution researches, time separation methods are deemed appropriate and it is aimed to reach optimum design. Offering users a bright and dim light environment at the same time, this design can divide a space into two different usage areas. These different areas of use are created by 5 equivalent parts on the lighting element. The width of the bright area can be adjusted by moving the parts.



## TRIZ Yaklaşımı Kullanılarak Yeni Bir Aydınlatma Elemanı Tasarımı

Ceren KİRAZ<sup>1</sup>, Hüdayim BAŞAK<sup>2</sup>, Neslihan TOP<sup>3,\*</sup>, İsmail ŞAHİN<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6690-5270, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

İç mimari tasarımların gereklerinin başrollerinden birisi de mekân aydınlatmasıdır. Doğru tasarlanmış bir aydınlatma ile mekânların ergonomik kullanımı mümkün kılınmaktadır. Mekanda kurgulanmak istenen konsept, kullanım amacı ve fonksiyonellik doğru aydınlatma tasarımı ve kullanımıyla gerçekleştirilmekte. Son yıllarda popüler olan kişiselleşmiş tasarımlar, aydınlatma sektöründe de önemli bir kriter olarak yerini almaktadır. Bu çalışma kapsamında, ortak yaşam alanını kullanan bireylerin, aynı anda farklı şiddette ışığa ihtiyaç duyabileceği öngörülerek yeni bir aydınlatma elemanı TRIZ metodolojisinden faydalanılarak tasarlanmıştır. Aynı mekânda hem aydınlık hem de loş ışık olmasının istenmesi, TRIZ metodolojisine göre bir fiziksel çelişki örneğidir ve bu problem, zamanda ve mekânda ayırma yöntemlerinin prensipleri ile çözülmüştür. Tasarlanan yeni aydınlatma elemanı ile yurt ve otel gibi paylaşımlı alanlarda, kişilerin farklı ihtiyaçlarına çözüm olabilecek ayarlanabilen ışık seviyeleri ve odak noktaları sağlanmıştır.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 17/06/2019*  
*Düzeltilme: 06/10/2019*  
*Kabul: 23/12/2019*

### Anahtar Kelimeler

*Aydınlatma tasarımı*  
*İç mekan aydınlatması*  
*TRIZ metodolojisi*

### Keywords

*Aydınlatma tasarımı*  
*İç aydınlatma*  
*TRIZ metodolojisi*

## Design Of A New Lighting Unit Using TRIZ Approach

### Abstract

One of the leading roles of interior design is the lighting of the place. Ergonomically designed spaces are made possible by a properly designed lighting. The concept, purpose and functionality that can be designed in the space can be realized by using the right lighting design and usage. Personalized designs, which are popular in recent years, are also an important criterion in the lighting sector. Within the scope of this study, it has been designed by using a new lighting element TRIZ methodology foreseeing that individuals using common living space may need different intensity light at the same time. It is an example of a physical contradiction according to the TRIZ methodology, which is solved by the principles of separation methods in time and space. With the new lighting element designed, adjustable light levels and focal points are provided in shared areas such as dormitory and hotel, which can be solved for different needs of people.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Işık, günlük yaşamda bireyin algısını değiştirebilecek özellikte bir uyarıcıdır [1]. Işığın birey üzerindeki psikolojik etkilerine bakıldığında, algı becerilerinin sınırlarını belirlediği tespit edilmiştir. Bireyin duyuşal, bilişsel ve davranışsal tepkilerini etkileyerek çevreyi keşfetme sürecinde bireye rehberlik etmektedir [2].

Işık, insan hayatında önemli bir kavramdır. Günlük aktiviteleri gerçekleştirmek, nesnelerin görünürlüğünü sağlamak amacı ile kullanılır. Aynı zamanda, ışığın psikolojik ve görsel etkilerinden faydalanılır. Işık, bilgiyi aktarma, insanlarda farklı duygular uyandırma amacı ile tasarımcı ve mimarlar tarafından sıklıkla kullanılır. Ürün tasarımında, kullanıcı ile ürün arasındaki deneyimi geliştirme aracı olarak kullanılmaktadır [3]. Özellikle yeni bir aydınlatma tasarımı sürecinde, kullanıcı odaklı tasarım (user centered design / UCD) geliştirebilmek için ürünün kullanıcıda bıraktığı etki oldukça önemlidir.

Aydınlatmaların asıl amacı, bir mekanın gece kullanımını da mümkün kılmaktır. Gündüz kullanımındaki amaç ise mekanın daha farklı algılanmasını sağlamak ve estetik bir özellik kazandırmaktır. Mekan tamamıyla aydınlatılırsa gizemi kaybolabilir. Bu yüzden aydınlatmanın kullanılacağı alana uygun olarak, ayarlanabilir seviyedeki ışıklandırmalar kullanılarak bütünlük sağlanabilir [4].

Aydınlatma tasarımında, teknik ve estetik özellikler göz önünde bulundurularak tasarım süreci iyi bir şekilde planlanmalıdır. Tasarımcı, güncel teknolojik gelişmeleri takip ederek uygun ekipmanları bir araya getirmelidir. Mekanın özelliklerine uygun olarak ideal bir aydınlatma tasarlanmalıdır [5]. Kullanılacağı alana göre optimum bir ürün geliştirmek amacıyla farklı metodolojilerden faydalanılabilir. Sistematik tasarım [6,7], TRIZ (Theoria Resheneyva Isobretatelskehuh Zadach) [8], General Design Theory [9], Abstract design theory [10] vb. yaklaşımlar bu amaçla kullanılır.

TRIZ metodolojisi, 1946 yılında Genrich S. Altshuller tarafından geliştirilen, geleneksel problem çözme tekniklerinden farklı olarak çelişkilerden beslenen bir tasarım yaklaşımıdır. Rusça'da "Yaratıcı problem çözme kuramı" anlamına gelen ifadenin baş harflerinden oluşur. Bu yaklaşım başlangıçta patent başvuruları için yararlı bir teknik olarak kullanılsa da sonraki süreçte daha geniş bir uygulama alanına sahip olmuş ve yaratıcı problem çözme aracı olarak kullanılmıştır [8].

Bu çalışma kapsamında, kullanıcı odaklı, yeni bir aydınlatma tasarımı sürecinde TRIZ yaklaşımını kullanarak aynı mekânda farklı ışık seviyelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Yurt, işyeri, otel vb. gibi ortak yaşam alanını kullanan kişilerin bireyselleşme ihtiyacını karşılaması amacıyla yeni bir aydınlatma elemanı tasarlanmıştır. Bu aydınlatma elemanı ile aynı mekânda ve zamanda, farklı seviyede ışık elde edilmesi mümkün kılınmıştır. Tasarım sürecinde TRIZ metodolojisinin fiziksel çelişki çözümünde kullanılan zaman, mekân ve durumda ayırma tekniklerinden yararlanılmıştır.

## 2. TRIZ METODOLOJİSİ (TRIZ METHODOLOGY)

TRIZ metodolojisi 1946 yılından beri ilerlediği süreçte, öncelikle patent çalışmalarının incelenmesiyle başlamış, ilerleyen aşamalarda ise teknik problem çözme aracı haline gelmiştir. Bir Sovyet mühendis olan Cenrikh Saulov Altshuller tarafından ortaya atılan bir yöntemdir. Altshuller'in yarattığı çelişki matrisi ile teknik ve fiziksel çelişkiler çözülerek birçok yeni patent üretilmiştir. İnovatif fikirlerin ortaya çıkmasında etkin bir şekilde kullanılan ve bu fikirlerin doğuşunu kolaylaştıran bir metodolojidir [11-14].

TRIZ metodolojisinin ortaya çıkış sürecinde, 200.000 patent incelenmiş ve ortak özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Bu patentlerin 40.000 tanesinin yenilikçi ve yaratıcı çözüme sahip olduğu tespit edilmiştir. Altshuller, benzer problemler için çözüm prensiplerinin standart olduğunu belirlemiş ve bu sonuçtan yola çıkarak 39 çelişki ve 40 yaratıcı çözüm prensibini ortaya koymuştur. TRIZ yönteminin temeli, tasarımda karşılaşılabilecek tüm çelişkilerin ve bunlara sunulan çözümlerin incelenmesine dayanmaktadır. Bu sebeple TRIZ metodu uygulanırken öncelikle çelişkilerin tanımlanması gerekmektedir.

Altshuller patent araştırmalarını yaparken kütle, basınç, dayanıklılık gibi 39 teknik parametre tanımlamıştır. Altshuller'in geliştirdiği bu yöntemde, parametrelerden birinin iyileştirilmesi, başka bir parametrenin kötüleşmesine sebep olmasıyla mümkündür. Ortaya çıkan bu çelişki, teknik çelişki matrisinde çaprazlanarak hangi yaratıcı prensibin kullanılması gerektiğine dair bir öneri sunar. Matriste dikey olarak listelenen parametreler iyileşen özellikleri gösterirken, kötüleşen özellikler yatay olarak listelenmiştir [15]. Teknik çelişki matrisinin bir örneği Şekil 1'de belirtilmiştir. Çelişki matrisinin kullanılmasıyla elde edilen rakamlar, 40 yaratıcı prensipten hangilerinin bu çelişkinin çözümü için kullanılabileceğini göstermektedir. Çelişki matrisinde kullanılan 39 parametrenin tamamı ise Tablo 1'de verilmiştir.



Kötüleşen özellik →	Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	...
İyileşen özellik ↓	Hareketli nesnenin ağırlığı	.	15, 8 29, 34	...
Hareketli nesnenin ağırlığı	.	.	.	...
Sabit nesnenin ağırlığı	.	.	.	...
Hareketli nesnenin uzunluğu	8, 15 29, 34	.	.	...
...	...	...	...	...

Şekil 1. Altshuller'in çelişki matrisi

Tablo 1. 39 çelişki matrisinde kullanılan mühendislik parametreleri [16]

1	Hareketli nesnenin ağırlığı	14	Dayanıklılık, güç	27	Güvenilirlik
2	Sabit nesnenin ağırlığı	15	Hareketli nesnenin dayanıklılığı	28	Ölçülerin doğruluğu
3	Hareketli nesnenin uzunluğu	16	Sabit nesnenin dayanıklılığı	29	Üretimin doğruluğu
4	Sabit nesnenin uzunluğu	17	Sıcaklık	30	Nesneye etki eden zararlı faktörler
5	Hareketli nesnenin alanı	18	Parlaklık	31	Zararlı yan etkiler
6	Sabit nesnenin alanı	19	Hareketli nesnenin harcadığı enerji	32	Üretilebilirlik
7	Hareketli nesnenin hacmi	20	Sabit nesnenin harcadığı enerji	33	Kullanım kolaylığı
8	Sabit nesnenin hacmi	21	Güç	34	Tamir edilebilirlik
9	Hız	22	Enerji kaybı	35	Uyumluluk
10	Kuvvet	23	Madde kaybı	36	Sistemin karmaşıklığı
11	Gerilim ve basınç	24	Bilgi kaybı	37	Karmaşık kontrol
12	Şekil	25	Zaman kaybı	38	Otomasyon seviyesi
13	Nesnenin dengesi	26	Madde miktarı	39	Verimlilik

TRIZ yaklaşımında çelişkiler, teknik ve fiziksel çelişkiler olarak iki gruba ayrılmıştır. Teknik çelişkiler, 39x39 çelişki matrisine dayanmaktadır. Bu matrisin bileşenleri arasında 39 çelişki ve 40 çözüm prensibi bulunmaktadır. Satır ve sütunlara yerleştirilen 39 çelişki parametresinin bu matristeki birleşim alanları, 40 yaratıcı çözüm prensibinden uygun olanları içermektedir. 40 yaratıcı çözüm prensibi Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** 40 yaratıcı çözüm prensibi [16]

1	Bölümleme	14	Yuvarlama	27	Ucuz ve kısa ömürlü cisimler kullanma
2	Ayırma	15	Dinamiklik	28	Mekanik sistemin yerine koyma
3	Kısmi Kalite	16	Kısmi Fazlalık	29	Pnömatik ve hidrolik yapılar
4	Asimetri	17	Yeniden Boyutlama	30	İnce film ya da zar
5	Kombinasyon	18	Mekanik Titreşim	31	Gözenekli malzeme
6	Evrensellik	19	Periyodik Eylem	32	Renk değiştirme
7	Yuvalama	20	Yararlı Bir Eylemin Sürekliliği	33	Homojenlik
8	Karşı Ağırlık	21	Hızlı Hareket	34	Atılan ya da değiştirilen parçalar
9	Öncü Karşıt Eylem	22	Zararı Faydaya Çevirme	35	Fiziksel ya da kimyasal durum
10	Öncü Eylem	23	Geri Besleme	36	Faz dönüşümü
11	Öncü Önlem	24	Aracılık	37	Isıl genleşme
12	Eşit Potansiyel	25	Self - Servis	38	Güçlü okside ediciler kullanma
13	Ters Eylem	26	Kopyalama	39	Durağan çevre
				40	Kompozit malzeme

Teknik çelişkiler, sistemin bir özelliği iyileşirken başka bir özelliğinin kötüleşmesi durumlarında kullanılmaktadır. Örneğin; tasarlanacak bir masanın ağır bir yük taşıyabilecek kadar mukavemetli olması istenirken, ağırlığının da taşınabilecek kadar hafif olması beklenmektedir. Bu durum teknik bir çelişki ortaya çıkarmaktadır. Bu parametrelerin çelişki matrisindeki kullanımı Şekil 2'de gösterilmiştir. Kesişim yerinde bulunan 1, 27, 26 ve 40 ile belirtilen numaralar, 40 yaratıcı prensipten hangilerinin kullanılabileceğini ifade etmektedir.

	Kötüleşen özellik	Hareketli nesnenin ağırlığı	Sabit nesnenin ağırlığı	Hareketli nesnenin uzunluğu	Sabit nesnenin uzunluğu
Hareketli nesnenin ağırlığı				15, 8 29, 34	
Sabit nesnenin ağırlığı					10, 1 29, 35
Hareketli nesnenin uzunluğu	8, 15 29, 34				
Sabit nesnenin uzunluğu		35, 28 40, 29			
Kuvvet	8, 1 37, 18	18, 13 1, 28	17, 19 9, 36		28, 10
Gerilim ve Basınç	10, 39 37, 40	13,29 10,18	35, 10 36		35, 1 14, 16
Şekil	8, 10 29, 40	15, 10 26, 3	29, 34 5, 4		13, 14 10, 7
Nesnenin dengesi	21, 35 2, 39	26, 39 1, 40			
Dayanıklılık, Güç	1, 8 40, 15	40, 26 27, 1			14 28, 26
Hareketli nesnenin dayanıklılığı	19, 5 34,31			2, 19 9	

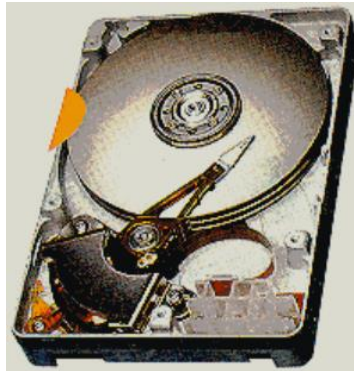
**Şekil 2.** 39x39 çelişkiler matrisinden ilgili alan

Teknik çelişkiler ile çözülemeyecek problemler için diğer bir çelişki türü olan fiziksel çelişkiler kullanılmaktadır. Teknik çelişkilerde olduğu gibi fiziksel çelişkilerde de 40 yaratıcı problem çözümünden yararlanılmaktadır. Fiziksel çelişkiler, teknik çelişkilerden farklı olarak sistemin bir özelliğinin hem olması istenilen hem de olmaması istenilen durumlarda ya da iki zıt özellikte var olması beklenen durumlarda kullanılmaktadır. Örneğin; şemsiyenin yeterli büyüklükte açılabilmesi için uzun, ancak çantada taşınabilmesi için kısa olmasının istenmesi bir fiziksel çelişkidir. Temel olarak ayırma prensibine dayanan fiziksel çelişkiler, zamanda ayırma, mekânda ayırma, duruma göre ayırma ve parçalar ve bütün arasında ayırma olmak üzere 4 şekilde gerçekleşmektedir.

Zamanda ayırma prensibi, bir sistemin bir zaman diliminde var olması, diğer bir zaman diliminde ise yok olması ya da bir zaman dilimindeki özelliğinin diğer zaman diliminde zıt yönde değişmesinin istendiği durumlarda kullanılmaktadır. Mekânda ayırma prensibi, bir sistemin iki zıt özellikteki alanlara ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılmaktadır. Duruma göre ayırma prensibi, sistemin bir özelliği belirli bir koşulda yüksek değerde iken başka bir koşulda düşük değerde olması beklenen durumlarda kullanılmaktadır. Parçalar ve bütün arasında ayırma prensibi ise bir sistemin parçalarının, bütünden zıt özellik göstermesi beklenen durumlarda kullanılır.

TRIZ metodolojisi, ilk ortaya çıkış sürecinde mühendislik problemlerini çözmek amacıyla geliştirilmiş bir araç olsa da, daha sonraki süreçte mühendislik dışı alanlarda da kullanılabilmesi fark edilmiştir. TRIZ metodolojisinin farklı alanlarda da kullanılabilmesi için yapılan çalışmalar devam etmektedir [17]. TRIZ'in farklı alanlarda da kullanılabilmesi için insanların yaratıcılıklarını geliştirme ve kullanma konusunda eşit haklara sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. TRIZ, yaratıcı problem çözme teorisi olarak geniş bir tanıma sahip olmalıdır. Böylece, mühendislik problemlerinin çözümünün yanı sıra günlük problemlerin çözümünde de kullanılan bir yöntem olacaktır [18].

TRIZ metodolojisinin farklı alanlarda kullanımına, Zinoviy Royzen'in [19] sabit diskteki veri kaybını önlemek amacıyla bu yöntemi uygulaması gösterilebilir. Manyetik disk elektrik motoruyla döndürülürken, sabit diskte hareket eden ve manyetik alana duyarlı bir okuyucu/yazıcı kafaya sahip kol vardır (Şekil 3). Bu sabit disk ile okuyucu/yazıcı kafa arasında dönen disk, hava akımı oluşturur ve bu hava akımı kafa ile sabit disk arasında boşluk yaratır. Sabit disk ile kafanın teması sonucu bu hava akımının kaybolması veri kaybına sebep olur. Diskin dönmediği süreçte, diskte veri depolanmayan bir alan bulunur. Bilgisayar çalıştırıldığı zaman disk döner ve erişim kolunu kolunun kaldırılmasını sağlayan bir hava akımı oluşturur. Bilgisayar kapandığı zaman bu kol yerine geri döner ve azalan hava akımı kolun alanda kalmasını sağlar. Bilgisayara dışarıdan bir kuvvet uygulanırsa kol yerinden çıkar ve diskteki verinin hasar görmesine sebep olabilir. Kolun bu hareketini engellemek için bir mıknatıs kullanılır. Bu süreçte, dış kuvvetlerin diske zarar vermesinin engellenmesi gereklidir. Royzen, bu problemin çözümü için TRIZ yönteminden yararlanmış ve farklı çözüm önerileri elde etmiştir. Bu çözüm önerileri; erişim kolunun tutulmasına olan gereksinimi yok etmek, kilitleyici mıknatısın değiştirilmesi ve erişim kolunun gerekli olduğunda serbest bırakılabilen daha güçlü bir mıknatısla tutulması şeklindedir.



Şekil 3. Sabit disk görseli [17]

TRIZ metodolojisi ile çözülmüş bir başka probleme örnek olarak topraklı elektrik prizlerinde kullanıcının güvenliğinin sağlanması verilebilir. Topraklı elektrik prizlerinde kontak basıncı yeterince sağlanmazsa elektrik aktarımı sırasında ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı engellenemezse yangın çıkma olasılığı yüksek olur. Kontak basıncının fazla sağlanması durumunda ise kullanıcıların fişi prizden takma ve çıkarma işlemi zorlaşmaktadır. Bu problemin çözümü için TRIZ yöntemine başvurulmuştur. Fiş ayaklarının gerilim kontakları tarafından yeterince kavranabilmeleri için yay gibi parçalarla kontak basıncı artırılabilir. Basıncı arttırmak amacı ile kullanılan bu ekstra malzemeler, malzeme ve montaj maliyetlerini arttırmaktadır. Bu sebeple ilave malzeme kullanılmaksızın yeterli kontak basıncı sağlayabilen bir kontak tasarlanmıştır [20].

Topraklama prizlerinde yaşanan bir diğer sorun ise duvara sabit prizlerde çoklu çerçeve uygulamalarının montajında uygun eksen aralığının sağlanması ve yatay hizanın korunmasıdır. Montajı yapan kişilerin eksen aralığını ayarlayamaması ve yatay hizayı bozması durumunda, üst grup montajının yapılmasında sorun yaşanmaktadır. Mekanizmaların sökülerek uygun hizaya ve eksen aralığına getirilerek tekrar montajı yapılması gerekmektedir. Ayrıca altlıklarda kullanılan malzeme termoset olduğu için geri dönüşümü mümkün değildir. Prizlerin duvara montajı sırasında vidaların fazla sıkılması ise plastik tırnakların zarar görmesine sebep olmaktadır. Bu problemlere çözüm bulabilmek amacıyla TRIZ yönteminden faydalanılmıştır. Prizin yan kısımlarına eklenen kulakçıklar ile çoklu çerçevelerin birbirine geçirilerek hizaya sokulması uygun eksen aralığına getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4). Altlıkta kullanılan termoplastik malzeme ile geri dönüşüm mümkün kılınmıştır. Tırnak tasarımında ise vidaların aşırı sıkılması halinde dahi deformasyona uğramayacak bir geometri sağlanmıştır [20].



**Şekil 4.** Çoklu çerçeve uygulamalarında hizalama sorununa TRIZ yöntemi ile getirilen çözüm [20]

Örneklerde de görüldüğü üzere TRIZ yaklaşımı, farklı disiplinlerdeki problemlerin çözüm sürecinde kullanılabilir. TRIZ yaklaşımının getirdiği standart çözüm parametreleri, farklı problemlere uygulanarak yaratıcılığın artırılması ve yeni çözüm geliştirme sürecinin kısaltılması mümkün kılınmıştır.

### 3. TRIZ YAKLAŞIMININ PROBLEME UYGULANMASI (PROBLEM APPLICATION OF TRIZ APPROACH)

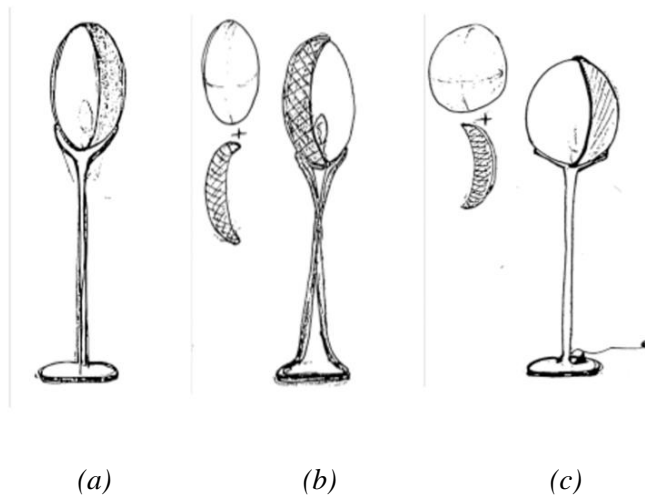
Aynı mekânda bulunan kişiler, farklı şiddette ışığa ihtiyaç duyabilmektedir. Öğrenci yurdu, otel gibi uyuma ve yaşam alanının beraber olduğu paylaşımlı alanlarda, bir kişi uyumak isterken başka birisi kitap okumak isteyebilir. Mevcutta kullanılmakta olan aydınlatma uygulamaları ile bu kişilerin mekân değiştirmesi gerekir. Bu problemin çözümü için aynı mekânda hem loş ışık hem de parlak ışık sağlayarak mekânı kişiselleştirebilen bir aydınlatma tasarımı gereklidir.

Bu çalışma kapsamında belirlenen problem, TRIZ yaklaşımına göre bir fiziksel çelişki örneği olup, ayırma yöntemleri kullanılarak çözülmüştür. Ayırma yöntemleri ayrı ayrı incelendiğinde, zamanda ayırma yöntemi için farklı zaman dilimlerinde zıt özellik göstermesi beklenmesi gerekmektedir. Bir malzemenin işlem

yapıldığı sırada sert, kullanım sırasında yumuşak özellikte olması zamanda ayırma yöntemiyle çözülebilecek bir fiziksel çelişkidir. Mekânda ayırma yönteminin uygulanabilmesi için tasarımın iki zıt özellik gösteren alanının olması gerekmektedir. Örneğin; içindeki çayın sıcak olacağı ancak dışarısından tutulabilecek kadar soğuk olan bir bardak tasarımı, mekânda ayırma yöntemiyle çözülebilmektedir. Duruma göre ayırma prensibinin uygulanması için farklı durumlarda zıt özellik göstermesi beklenen durum olmalıdır. Mutfak lavabosu filtresinin suyun rahat bir şekilde akabileceği kadar gözenekli olması ancak, katı parçacıkların geçemeyeceği kadar da kapalı olmasının beklenmesi bir fiziksel çelişkidir ve durumda ayırma yöntemleri ile çözülebilmektedir. Son olarak parçalar ve bütünde ayırma prensibinin uygulanabilmesi için ise tasarımın bir parçasının istenilen özellikte olması beklenirken, bütününe zıt özellikte olması beklenmelidir. Bisiklet zinciri parçalarının tek başına rijit iken, bisiklet zincirinin bütün olarak esnek olması bu duruma örnek olarak gösterilebilir.

Bir iç mekânın, aynı zaman diliminde hem aydınlık hem de loş ışıklı olmasının istenmesi bir fiziksel çelişki olup mekânda ayırma prensipleri ile çözüme kavuşulması mümkündür. Bu sebeple, mekânda ayırma yönteminin kapsadığı 40 çözüm prensiplerinden, 1, 2, 3, 4, 7, 13, 14, 17, 24, 26, 30 ve 40 numaralı prensipler incelenmiştir. Bunlar sırasıyla, bölümlenme, ayırma, kısmi kalite, asimetri, yuvalama, ters eylem, yuvarlama, yeniden boyutlama, aracılık, kopyalama, ince film ya da zar, kompozit malzemedir.

Bu çelişkinin çözümü için problem çözme yöntemleri incelenerek en uygun çözüm için 2 ve 14 numaralı prensipler kullanılmıştır. Bu prensiplerden 2 numaralı "ayırma" prensibine göre ürünün iki ana parça halinde tasarlanması öngörülmüştür. Bu şekilde aydınlatmanın bir tarafında ışık yayılımı engellenerek mekânı aydınlık ve loş ortam olarak ikiye ayırabilecektir. 14 numaralı "yuvarlama" prensibi ise 360 derecelik geniş bir açı sayesinde mekânın her köşesine ulaşımı artıracak özelliği kapsamaktadır. Bu prensipler için uygulanan tasarım eskizleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5a'da eliptik bir form kullanılmıştır. Ürünün belli açıdaki kısmı renkli boyanarak ışık geçirgenliğini azaltmak amaçlanmıştır. Şekil 5b'de, bu durum iki parça haline getirilerek uygulanmıştır ancak, eliptik formun yeterli ışık açısını sağlamadığı öngörülerek form daireselleştirilmiştir. Şekil 5c'de ise daha dairesel bir form ve birisi renkli olmak üzere iki parça kullanılmıştır.

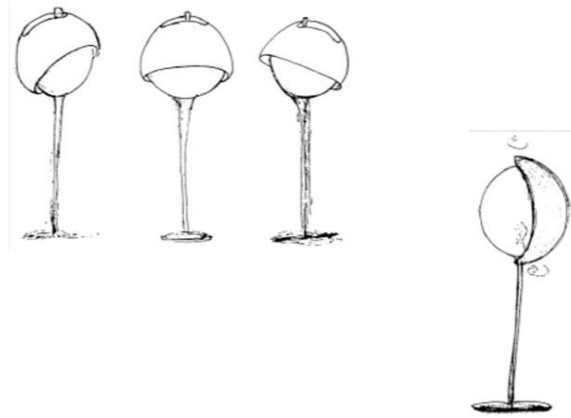


**Şekil 5.** Ürün eskizleri

Yapılan eskiz çalışmaları ile belirlenen probleme kısmen çözüm bulunmakla birlikte, yeni çelişkiler ortaya çıkmaktadır. İki parça şeklinde tasarlanan bu ürün, yalnızca bir kullanım senaryosu sunmaktadır ve kişiselleştirme amacıyla ters düşmektedir. Kullanıcı bir zaman diliminde bir bölgeyi aydınlatmak isterken, diğer zaman diliminde başka bir bölgeyi aydınlatmak isteyebilir. Bu durum yine fiziksel bir çelişki olup zamanda ayırma prensipleriyle çözülmelidir. Zamanda ayırma prensiplerinden bu problemin çözümü için kullanılacak olanlar; 1, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 19, 21, 24, 26, 27, 29, 34, 36 ve 37'dir ve bu prensipler

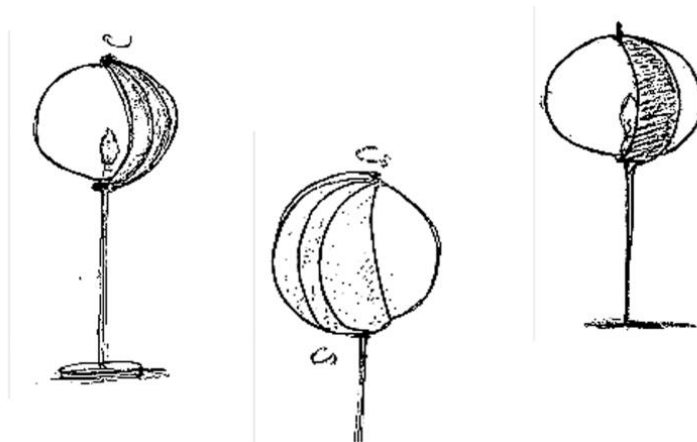
sırası ile bölümlene, yuvalama, başlangıçta hareketsizlik, başlangıçta eylemli, önceden güvenliği sağlama, dinamik, kısmi veya aşırı eylem, mekanik titreşim, periyodik hareket, yararlı hareketin devamlılığı, acele etme, aracılık, kopyalama, ucuz kısa ömürlü nesnelere, pnömatik ve hidrolik, atma ve yeniden ele alma, hal geçişleri, termal genişlemedir.

Bu problemin çözümü için en uygun yöntem olarak 24 numaralı "aracılık" prensibi seçilmiş olup, aracı bir cismin geçici olarak diğer cisimle birleştirilmesi amaçlanmıştır. Geçici olma özelliği aracı parçaya bir hareketlilik katmakla birlikte, aydınlatmanın üzerinde hareket eden bir parça olarak tasarlanması planlanmıştır (Şekil 6).

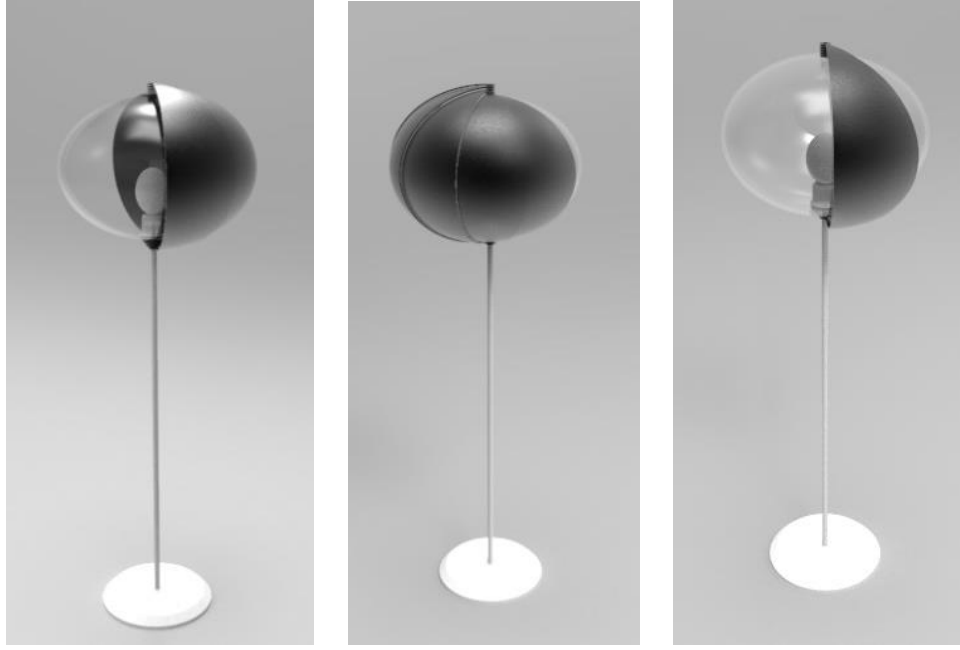


*Şekil 6. Geliştirilen eskiz çalışmaları*

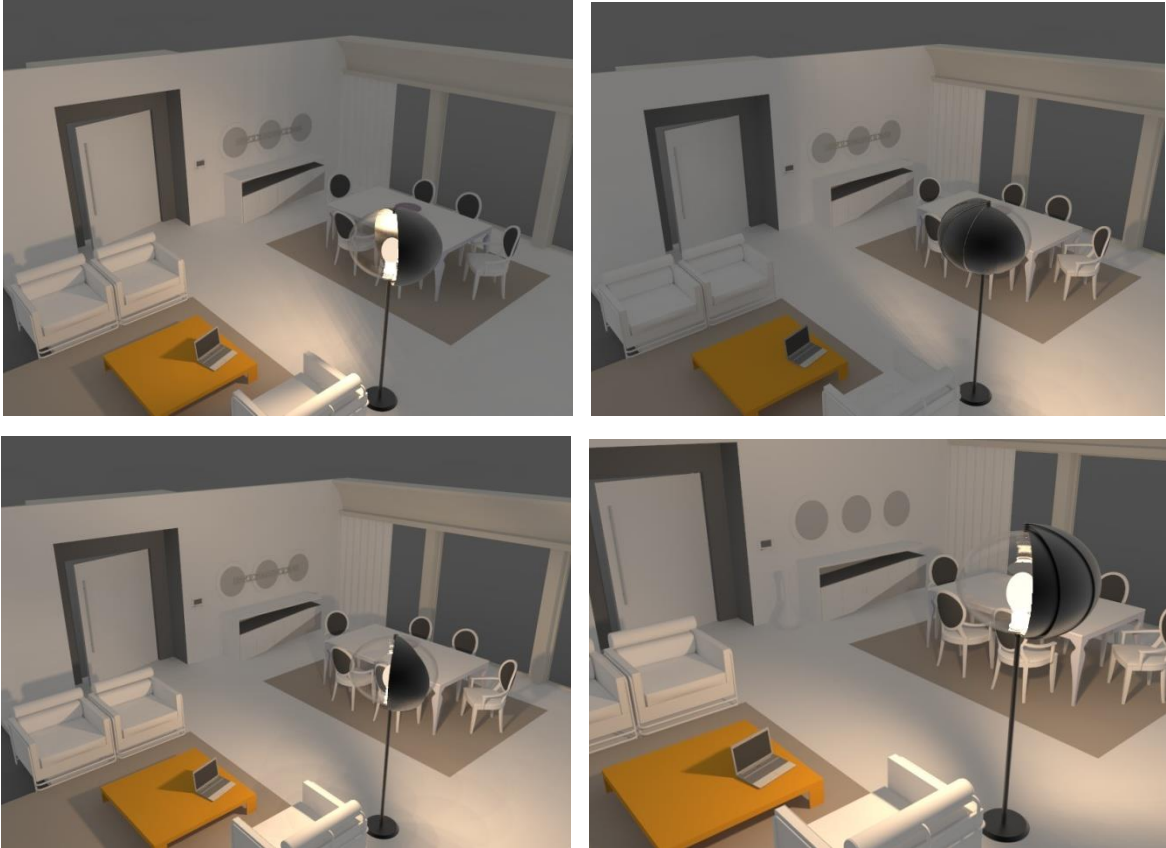
Son tasarlanan ürünün iki parça olma hali, kullanıcıyı iki ayrı mekân ile sınırlandırmakta ve sadece ürünün bulunduğu büyüklükte aydınlık ortama izin vermektedir. Bu durum yine kişiselleştirme amacı ile ters düşmektedir çünkü kullanıcı istediği büyüklükte aydınlık ve loş alan ayarını yapabilmelidir. Aracı olan parça bir zaman diliminde belli büyüklükte iken, diğer zaman diliminde başka bir büyüklükte olabilmelidir. Bu çelişki yine zamanda ayırma yöntemleri ile çözülmüş ve 1, 7 numaralı prensiplerden yararlanılmıştır. Aracı parça, bölümlere ayrılarak iç içe yerleşebilecek bir form oluşturulmuştur. Yapılan eskizler ve sonuç ürün, Şekil 7-8'de gösterilmiştir. Aydınlatma elemanının farklı açılardaki kullanımında, iç mekânda elde edilecek aydınlık seviyeleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



*Şekil 7. Tasarımın nihai haline ait eskizler*



**Şekil 8.** Tasarlanan aydınlatma elemanının 3 boyutlu modellemesi



**Şekil 9.** Aydınlatma elemanının farklı ışık şiddetlerinde kullanılması durumunda iç mekanın durumu

TRIZ metodolojisinden faydalanılarak dairesel bir formda tasarlanan aydınlatmanın üzerindeki hareketli parçaların farklı konumlarda kullanılması ile mekânda oluşacak farklı aydınlanma seviyeleri ve açıları Şekil 9'da gösterilmiştir.



#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, TRIZ metodolojisi kullanılarak yeni bir iç mekân aydınlatması tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde, ortak yaşam alanını paylaşan kişilerin tek bir aydınlatma ile bireyselleşebileceği bir ortam oluşturulmuştur. Bir mekânın aynı anda hem aydınlık hem de loş olmasının beklenmesi, TRIZ metodolojisine göre bir fiziksel çelişki olarak tanımlanmış ve mekân ve zamanda ayırma yöntemleri ile çözülmüştür. Çözüm araştırmaları sırasında ortaya çıkan çelişkilerde, zamanda ayırma yöntemleri uygun görülmüş ve optimum tasarıma ulaşmak hedeflenmiştir. Kullanıcılara eş zamanda aydınlık ve loş ışıklı bir ortam sunan bu tasarım, bir mekânı iki farklı kullanım alanına bölebilmektedir. Bu farklı kullanım alanları, aydınlatma elemanının üzerinde bulunan 5 adet eşdeğer parça sayesinde oluşturulmaktadır. Parçaların hareket ettirilmesi ile aydınlık alan genişliği ayarlanabilmektedir. Kullanım senaryosunda iç mekan aydınlatması konsepti belirlenmiş olsa da, tasarım sürecinde öğrenci yurtları veya otel odaları gibi ortak kullanım alanlarına uygulanabilecek özelleşmiş bir tasarım haline gelmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Fusco, Analisispsicologica di alcuneopere di Anton Chekhov: Unastorianoiosa. In A. Fusco, & R. Tomassoni (Eds.), *Psicologia e comunicazioneletteraria* (pp. 146-170). Milan: Franco Angeli, 2005.
- [2] R. Tomassoni, G. Galetta, E. Treglia, *Psychology of Light: How Light Influences the Health and Psyche*, *Psychology*, 2015, 6, 1216-1222, 2015.
- [3] V. E. T.A.M., *The Effects of Lighting Characteristics on Atmosphere Perception*. Unpublished manuscript for Philips Research, Eindhoven, Netherlands, 2008.
- [4] H. A. Turgut, S. Yılmaz, *Peyzaj Mimarlığında Yapay Aydınlatma ve Estetik Kaygılar*. *Sanat Dergisi*, 0 (9), 46-56. <http://dergipark.org.tr/ataunigsfd/issue/2597/33398>, 2010.
- [5] P. Yıldız, *Televizyon Stüdyolarında Aydınlatma*, *e-Journal of New World Sciences Academy* 2007, Volume: 2, Number: 2, 2007.
- [6] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K. H. Grote, *Engineering Design A Systematic Approach*. Wallace K, Blessing L (Trans. and Eds.) 3rd ed. Springer, Berlin, 2007.
- [7] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, F. Kimura, *Design methodologies: Industrial and educational applications*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58, 543–565, 2009.
- [8] G. Altshuller, *And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving*. 2nd ed. Worcester, MA: Technical Innovation Center, Inc., 1996.
- [9] T. Tomiyama, *A Classification of Design Theories and Methodologies*. Proceedings of the 2006 ASME IDETC, Paper No. DETC2006-99444, ASME. (CD-0 ROM), 2006.
- [10] Y. Kakuda, M. Kikuchi, *Abstract Design Theory*. *Annals of Japan Association of Philosophical Science* 10(3):19–35, 2001.
- [11] F. Palčák, *Improvement of dynamic characteristics of the car in the light of technological evolution*, *Mechanisms and Machine Science* Vol.44, p. 391-397. doi: 10.1007/978-3-319-44087-3\_53, 2016.
- [12] Z. Katolický, B. Bušov, M. Bartlová, *Turbojet engine innovation and TRIZ*. *Mechatronika* 2014, Article number 7018230, p. 16-30. doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018230, 2014.
- [13] Bultey, W. Yan, C. Zanni, *A proposal of a systematic and consistent Substance-Field Analysis*. *Procedia Engineering* Vol.131, p. 701-710. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.357, 2015.

- [14] H. Başak, İ. Şahin, N. Top, TRIZ Yaklaşımı Kullanılarak Havalimanı Bekleme Alanlarının Arttırılması, Conference: 3<sup>rd</sup> International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE 2018), Antalya, Turkey, 2018.
- [15] G. Altschuller, Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- [16] Ideation International Inc., Tools of Classical TRIZ. MI: Ideation International, Southfield, 1999.
- [17] S. D. Şener, TRIZ: Yaratıcı Problem Çözme Teorisi Ve Diğer Problem Çözme Yöntemleriyle Karşılaştırma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği, 2006.
- [18] Enlarging TRIZ and Teaching Enlarged TRIZ for the Large Public URL: <http://www.hcmuns.edu.vn/CSTC/En/Activity/Enl TRIZ.htm>
- [19] Z. Royzen, Z, Case Study: TRIZ Solves a Hard Drive Reliability Problem, TRIZ Journal, 1998 November issue. URL: <http://www.triz-journal.com/archives/1998/11/a/index.htm>, 1998.
- [20] M. A. Akbulut, Yaratıcı Problem Tekniğinin (TRIZ) Elektrik Prizleri İçin Tasarım Alanına Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 2014.

## Natural Circulation Hole Optimization in Food Drying Oven

 Faruk KILIÇ 

Department of Machine, Technical Sciences Vocational College, Gazi University, Ankara, Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a food drying oven (GKF), which is managed by microcontroller, is designed and experimentally, the most suitable hole open area for GKF is determined. Drying time and electrical energy consumption values were determined for drying the apple slices prepared with 3 mm thickness at 80 °C for four different cover apertures of GKF.

#### Article Info:

Research article  
 Received: 31/10/2019  
 Revision: 21/12/2019  
 Accepted: 11/01/2020

#### Highlights

- Electricity consumption in food drying.
- Hole Optimization.
- Oven thermal analysis.

#### Keywords

Food drying oven design  
 Energy analysis  
 Apple drying

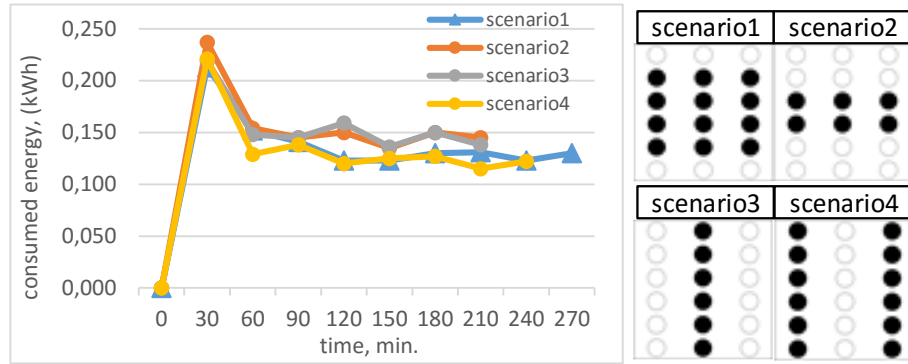


Figure A. Time dependent electricity consumption for different scenarios

**Purpose:** In this study, the most suitable oven door open area required for air circulation inside the furnace was determined experimentally by interpreting the electrical energy consumption.

**Theory and Methods:** In the food drying oven, it was operated with time control using a coincident-centered fan-resistance pair. In order to determine the apple drying parameters, the oven ambient temperature and weight were recorded during the drying. Temperature meter (Thermocouple) measures the ambient temperature. The weight of the food was recorded at the time intervals determined by the load cell.

**Results:** The apple experiment dried at four different scenarios at 80 °C lasted 240 minutes in scenarios 1 and 4 and 210 minutes in scenarios 2 and 3. Scenario 4 consumed approximately the same energy consumption as scenarios 2 and 3, but was able to complete relief in 240 minutes. Scenario 2 and 3 drying times are 210 minutes. Considering the energy consumption, scenario 2 consumed 1,131 kWh and scenario 3 consumed 1,087 kWh.

**Conclusion:** In this study, the most suitable cover open area of the drying oven was determined. The drying process was determined by determining four different scenarios on Argentina apples and the best scenario was determined by comparing the energy they consumed and the drying times. Energy consumption-time comparison was made in scenario selection. Scenario 1 1.289 kWh scenario 4 was deemed inappropriate because it consumes both time and energy by consuming energy of 1,107 kWh. Scenarios 2 and 3 have the same drying times, so when we look at the approximate values of energy consumption, scenario 2 consumed 1,131 kWh and scenario 3 consumed 1,087 kWh. For this reason, it is determined that the best open space scenario is scenario 3.



## Gıda Kurutma Fırınında Doğal Sirkülasyon Açık Alan Optimizasyonu

Faruk KILIÇ 

Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 06374, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada mikro denetleyici ile yönetilen bir gıda kurutma fırını (GKF) tasarlanmış ve deneysel olarak GKF için en uygun kapak açık alanı tespit edilmiştir. GKF'nin dört farklı kapak açıklığı değeri için, 3 mm kalınlığında hazırlanan elma dilimlerinin 80 °C'de kurutulması ile ilgili olarak kurutma süresi ve elektrik enerji sarfiyatı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler zaman ve enerji tüketimi açısından değerlendirilerek, elma dilimlerinin kurutulması için dört farklı senaryo içerisinde en uygun olanı seçilmiştir. En uygun senaryoda 210 dakika süre ile 1,087 kWh enerji tüketilmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 31/10/2019  
 Düzeltilme: 17/12/2019  
 Kabul: 09/01/2020

### Anahtar Kelimeler

*Gıda kurutma fırını tasarımı*  
*Enerji analizi*  
*Elma kurutma*

### Keywords

*Food drying oven design*  
*Energy analysis*  
*Apple drying*

## Natural Circulation Hole Optimization in Food Drying Oven

### Abstract

In this study, a food drying oven (GKF), which is managed by microcontroller, is designed and experimentally, the most suitable hole open area for GKF is determined. Drying time and electrical energy consumption values were determined for drying the apple slices prepared with 3 mm thickness at 80 °C for four different cover apertures of GKF. The values obtained were evaluated in terms of time and energy consumption and the most suitable one among the four different scenarios was selected for drying apple slices. In the optimal scenario, 1,087 kWh of energy was consumed for 210 minutes.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Genişleyen tarım alanları ve su tüketimi iklim değişikliğine sebebiyet vermektedir. Birleşmiş milletler Dünya Nüfusu Beklentileri, 21. yüzyılda insan nüfusunun 7,6 milyardan 9 ila 10 milyara yükseleceğini tahmin etmektedir (World Population Prospects The 2015 Revision). Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) gıda üretiminin 2050 yılında 2005 yılına göre % 60 oranında artacağını söylemiştir.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) verilerine göre 2017 yılında Dünyada 4933841 hektar alana ekili olan elmadan 83139326 ton ürün aldığı hesaplanmıştır. Bu verilere göre 168508 hektogram/hektar verim elde edilmiştir [1].

2017 Türkiye verileri ise 175357 hektar alana ekili olan elmadan 3032164 ton ürün alındığı hesaplanmıştır. Alınan bu ürün Dünya üretiminin tonajda % 3,64 üne sahip olduğumuzu göstermektedir. Yine bu verilere göre 172914 hektogram/hektar verim elde edilmiştir. Bu değer ise Dünya ortalama veriminin iki katından fazladır [1]. Türkiye gıda kurutma alanında ekonomik katkıları artırma yönünde katkıda bulunmalıdır. Elma bu kapsama giren ürünlerimizdendir.

Kurutma tekniği gıda bünyesindeki su oranını %75-95 oranlarından %10-20 oranlarına düşürmektir [2]. Kurutma artan gıda tüketimi düşünüldüğünde gıda teminini kolaylaştıran önemli faktörlerden biridir. Konserve ya da dondurarak saklamaya göre daha fazla kullanılan bir yöntemdir [3]. Kurutma, ürünlerin nem içeriğini azaltmakla birlikte, antioksidan kapasite, enzimatik aktivite, hoş koku, v.b. gibi diğer fiziksel,

kimyasal ve biyolojik özellikleri de değiştirir [4]. Kurutma teknikleri sayesinde dondurma, ve konsantrasyon sayesinde gıda mevsim dışı da kullanılabilir [5].

Woong Oh, laminer doğal konveksiyon üzerine sayısal çalışmalar yapmıştır [6]. Davidson fırın donanımının izlenmesi için gerekli tüm güvenlik sistemlerini, pişirme sırasında sorun çıkaran operatörleri uyaran alarmları ve ciddi arıza durumunda fırını kapatmaları için gerekli sistemleri ele alarak önemli bir çalışma yapmıştır [7]. Davidson fırın verimliliği hakkında da çalışma yapmıştır. Gıda pişirme işleminde gerekli olan enerji sarfiyatını, fırın havası nemini, fırın yalıtımını, ısı eşanjöründen gelen akışkanlardan kaynaklanan ısı kaybını ve dahi fırın verimini kapsamlı olarak irdelemiştir. Pratik deneyime dayanarak ayrıntılı enerji kullanımı ve kaybı hesaplamaları ile ilgili çalışılmış ve bir ısı geri kazanım sistemi ile elde edilebilecek enerji tasarrufunu elde etmiştir. Ayrıca, gaz ve petrol arasındaki yakıt maliyetlerinin karşılaştırılmasına bir örnek sunmuştur [8]. Fırın muayene ve denetimleri ile ilgili kontrol ve ayrıntılarla ilgili teknik bilgiler verilmiştir [9]. Fırında yakıt verimliliğini en az % 15 artıran, pişirme için kullanılacak atık ısıyı geri kazanan bir sistem açıklanmıştır [10].

Fırın konveyör bantlarının ürüne etkileri hakkında kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Hamur parçalarını fırın içinde taşımak için fırın bandı tanımlanması yapılarak örnekleri ile beraber uygulamadaki kullanımları anlatılmıştır. Her bir bant tipi, ısı transferi ve fiziksel performans bakımından özel pişirme özelliklerine sahip olduğu belirtilmiş ve bu nedenle özel bir uygulama alanına sahip olduğu vurgulanarak bantları kısaca sınıflandırmıştır [11].

Donnelly ve ark. yaptıkları çalışmada, 3 el tipi yakın kızılötesi spektrofotometre biriminin, kuru madde tahminlerini 2 alfafa ve 2 mısır silajı kullanılarak 60 °C'de geleneksel fırında kurutması ile karşılaştırmıştır [12]. Varyenli ve arkadaşları farklı tipteki güneş ocaklarının tasarımı imalatı ve performanslarının deneysel incelemişlerdir [13].

Demacro ve ark. yaptıkları çalışmada, büyük motorlar için yeni bir kurutma fırını tasarımını destekleme amacı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği uygulaması ele alınmıştır. ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Tesisin geometrik ve operasyonel gereksinimleri çerçevesinde en iyi kurutma koşullarını tespit edilmiştir. Birkaç giriş ve çıkış konfigürasyonu incelenerek ve geometrideki ve sınır şartlarındaki değişikliklerin ısıtma hızı ve kurutma kalitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir [14].

Pfeifer Endüstriyel fırınların durumu ve araştırılması ile ilgili çalışmalar yapmıştır [15]. Walker fırın teknolojilerini anlattığı bu çalışmada, ısı transfer mekanizmaları ve hibrit fırınlar ile ilgili çalışmalar yapmıştır [16]. Cooper mikrodalga fırın teknolojileri hakkında çalışmış ve mikrodalga fırınlarda kullanım için ambalaj ve ürün geliştirme ile ilgili bilgiler sunmuştur [17]. Kılıç gıda kurutma fırınında dış yalıtımın kurutma süresine ve enerji tüketimine etkisini araştırmıştır [18].

Bu çalışmada fırın içi hava dolaşımı için gerekli olan en uygun fırın kapağı açık alanını elektrik enerjisi tüketimi dolayısı ile elma kurutarak deneysel olarak tespit edildi.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. GKF Çalışma Prensipleri ve Ölçüm Düzenliği (Food Drying Oven Working Principle and Measuring Mechanism)

Fan-rezinstans ikilisi ile çalışan çakışık merkezli GKF, 27/10/2004 tarihli ve (AT) 1935/2004 sayılı Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Hakkında Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Tüzüğü göz önünde bulundurularak Avrupa Birliği mevzuatına uyum çerçevesinde hazırlanan Türk gıda yönetmeliğine uyan paslanmaz çelik 316 sac tepside kurutmalar gerçekleştirilmiştir. Zaman rölesi kullanılarak GKF süre kontrollü çalıştırılmıştır. Termostat ortam ısısına duyarlı konumlandırılıp devreyi açıp-kapatmakta ve fan-motor ikilisini eş zamanlı olarak çalışmasını kontrol etmektedir.

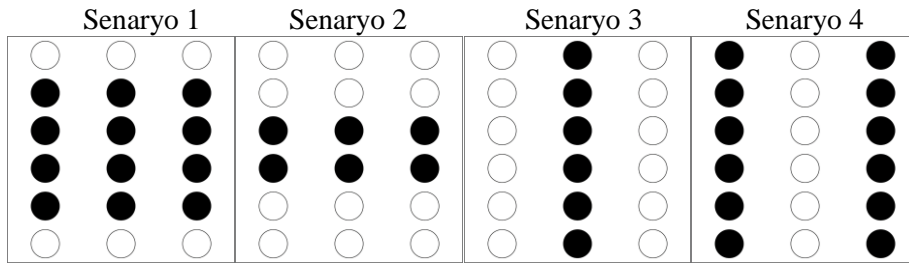
Kurutma parametrelerini belirleyebilmek için fırın ortam sıcaklığı ve ağırlığı kurutma süresince kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçer (Termokupl) ortam sıcaklığını ölçmektedir. Gıdanın ağırlığı yük hücresiyle belirlenen zaman aralıklarında kaydedilmiştir.

**Tablo 1.** GKF düzeneği kullanılan cihaz özellikleri

kullanılan cihaz	özellikleri	ölçüm aralığı
sıcaklık ölçer	sıcaklık ölçümü	-20 °C ~ 85 °C
yük hücresi	ağırlık kapasitesi (en fazla)	1 kg
zaman rölesi	ortam / depolama sıcaklığı	0...50 °C/-25...70 °C

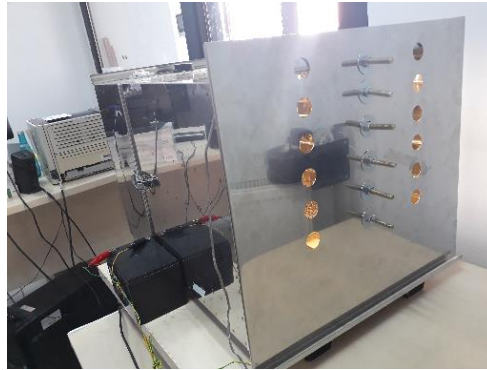
## 2.2. GKF Kapak Açık Alan Senaryoları (GKF Cover Hole Scenarios)

2,4 mm çaplı 15 delikli bir kapak tasarlanıp, lazer ile paslanmaz çelik 316 sac hatasız kesilmiştir. Her delik  $4,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  alana sahiptir. Delikler dört farklı senaryo ile yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kapak Açık Alan Senaryoları

Delikler vida-somun-pul üçlüsü ile kapatılmıştır (Şekil 2). Senaryo yatay ve dikey sıralı seçimlerin ana sebebi düşey bir düzlemde doğal ısı taşınımı davranışlarıdır.



Şekil 2. Kapak açık alanı (senaryo 3)

## 2.3. Gıda Kurutma Fırınında Yapılan Deneyler (Experiments in Food Drying Ovens)

Deneylerde Karaman kaynaklı, I. Sınıf, Arjantin elma kullanılmıştır [19]. Elma 3mm dilimlenerek kurutulmuştur (Şekil 3). Zyliss marka dilim kalınlıkları ayarlanabilen dilimleme makinesinde dilimlenmiştir.



**Şekil 3.** Elma, elma dilimleri, kurutulmuş elma dilimleri

Dilimlenmiş yaş elmadan dakikada bir veri alınarak veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Kuru kütle belirleme işleminde deneyler ard arda iki ölçüm sonucu arasında ağırlıkça % 1 den daha az fark oluşuncaya kadar sürdürülmüştür [20-21]. % 1 den daha az fark oluşunca deney durdurulmuştur. Yapılan bu deneyler sonucunda kurutulmuş elma 15,8 g olarak belirlenmiştir. Kurutma işlemi sonunda kuru elma dilimlerinde oksitlenme ve kömürleşme gibi negatiflik görülmemiştir.

Dikmen E. ve ark. “Türk standardı TS 4087’ye göre birbirini izleyen iki tartı arasında kütle farkının, her bir deney parçası için % 1 den az olması halinde tam kuru hale gelmiş olur” kuru hal tanımına uygun çalışmıştır [20,22].

Kurutulmuş elma dilimleri için Türk Standart Enstitüsü “Kurutulmuş elma- Özellikler ve deney metotları” başlıklı TS 3688 ISO 7701 kodlu standarda sahiptir [19]. Yapılan deneylerde bu standarda uyulmuştur. 3688 ISO 7701 kodlu standart gereği kurutulmuş elma diliminde % 25 nem olması gerekmektedir. Yapılan hesaplama sonucunda toplam ağırlık % 25 nem ile birlikte 19,75 g olarak hesaplanmıştır. 30 dk. aralıklarla değerlendirilen kurutma işlemleri 19,75 g değerine geldiğinde kurutma işlemi sona erdirilmiştir. GKF de açık alan iyileştirilmeye çalışıldığı için tek sıcaklıkta (80 °C) çalışılmıştır. Ölçümün güvenilirliği hatırına her senaryo için deneyler üçer defa tekrarlanmış ve bu sebeple toplamda on iki deney yapılmıştır.

## 2.4. Ölçüm Parametreleri (Measurement Parameters)

### 2.4.1. Analiz metotları (Methods of analysis)

Sistem, Termodinamiğin 1. kanununa göre incelenildiğinde, sisteme rezistansla elektrik enerjisi verilerek ( $W_r$ ) fırın içi sıcaklık arttırılmıştır. Homojen sıcaklık dağılımı sağlayabilmesi amacıyla rezistansla eş zamanlı çalışan fan enerji harcamaktadır ( $W_f$ ). Fırın duvarı ( $Q_d$ ) (paslanmaz çelik) ve fırın içinde oluşan ısı kaçaklar ( $Q_k$ ) yüzünden ısı harcanmaktadır. Kurutulacak ürünün ( $Q_{\dot{u}}$ ) istenilen sıcaklığa kadar ısıtılması için ve fırın içindeki havanın ( $Q_h$ ) ısıtılması için gerekli ısı miktarıda hesaba katıldığında. Dengeli bir sistem için

$$E_{giren} - E_{çıkan} = 0 \quad 1$$

genel eşitliği dikkate alınır [23]. Eş. 2 ise

$$W_r + W_f - Q_k - Q_h - Q_{\dot{u}} - Q_d + E_g - E_c = \Delta E \quad 2$$

olarak düzenlenmiştir.

Duvarları ısıtmak için gerekli olan ısı

$$Q_k = m_k c_p \Delta T \quad 3$$

$$Q_h = m_h c_p \Delta T \quad 4$$

$$Q_{\dot{u}} = m_{\dot{u}} c_p \Delta T \quad 5$$



$$Q_d = m_d c_p \Delta T \quad 6$$

olarak hesaplanır.

Fırın duvarlarından çıkan ısı, fırın iç havasının ısıtılması için gerekli olan ısı, ısı kaçakların tespiti Eş. 2

$$W_r + W_f = Q_k + Q_{\dot{u}} + Q_h + Q_d \quad 7$$

olarak düzenlenir. Fırının harcadığı elektrik enerjisi ( $W_f$ ) ve rezistans ( $W_r$ ) sistemin harcadığı toplam elektrik enerjisine eş olacağından fırının harcadığı enerji hesaplanarak sistem hakkında yorumlama yapılacak hale gelir. Sistemdeki ısı hareketleri fan ve rezistansın harcadığı enerji sayesinde değerlendirilmiştir.

#### 2.4.2. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Deney sonucunda elde edilen bulgular ölçüm cihazlarından dolayı belirsizlik içermektedir (Tablo 2). Bu belirsizliklerin toplamı makul aralıklarda olup olmadığı Eş. 8 de verildiği gibi hesaplanmaktadır [24].

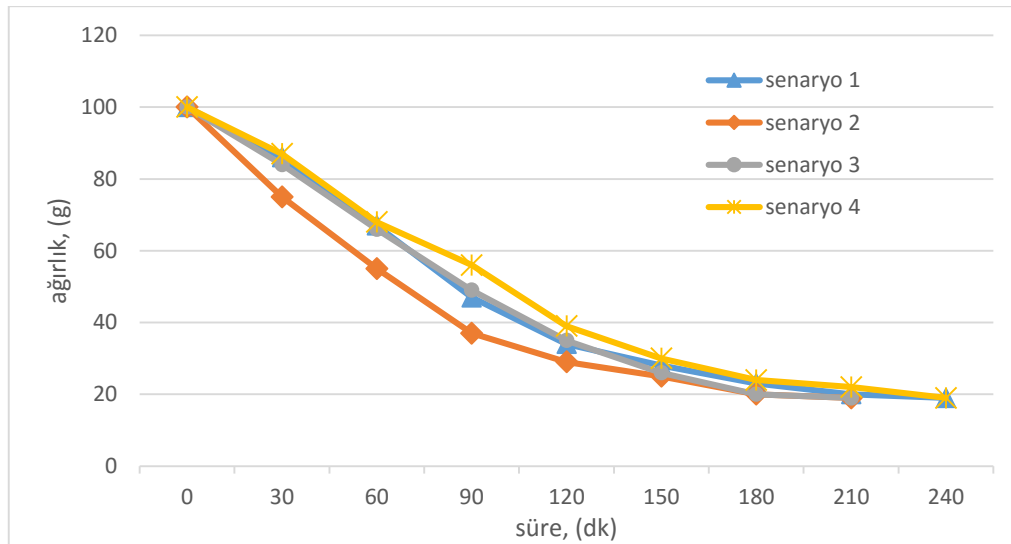
$$W = [(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots \dots \dots (x_n)^2 + ]^{1/2} \quad 8$$

**Tablo 2.** GKF düzeneği kullanılan cihaz özellikleri

kullanılan cihaz	hassasiyet	belirsizlik
sıcaklık ölçer	$\pm \% 0,1$	$\pm 0,141$
yük hücresi	$\pm \% 0,00001$	$\pm 0,05$

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (DATA AND DISCUSSION)

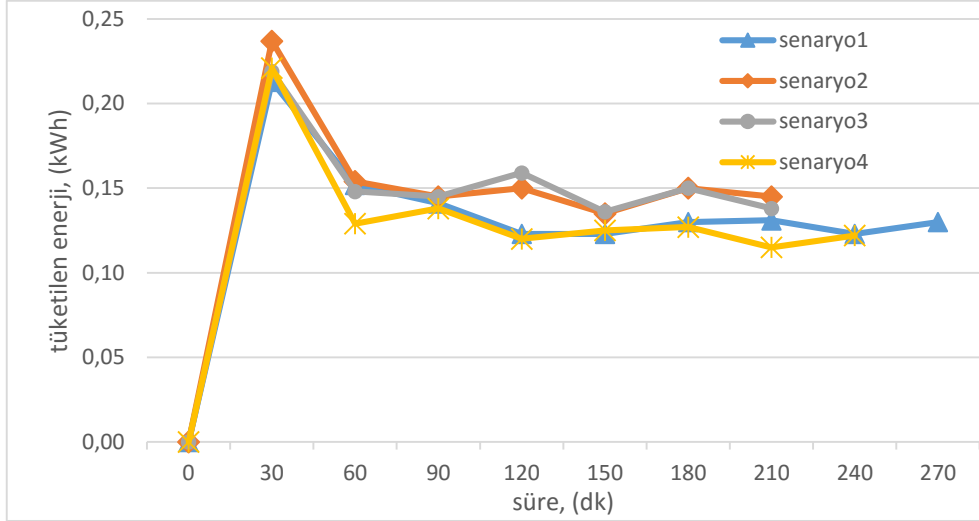
Elma için yapılan deneylerde kurutma süresine karşı çizilen ağırlık grafiği Şekil 4'te verilmiştir. 80 °C de dört farklı senaryoda kurutulan elma deneyi 1. ve 4. senaryolarda 240 dk. ve 2. ve 3. senaryolarda 210 dk. sürmüştür. Tüm deneyler boyunca fan ve ısıtma sayesinde fırın içi bağıl nemi % 1 de tutulmuştur.



**Şekil 4.** Elma kurutmak için ağırlık-süre grafiği

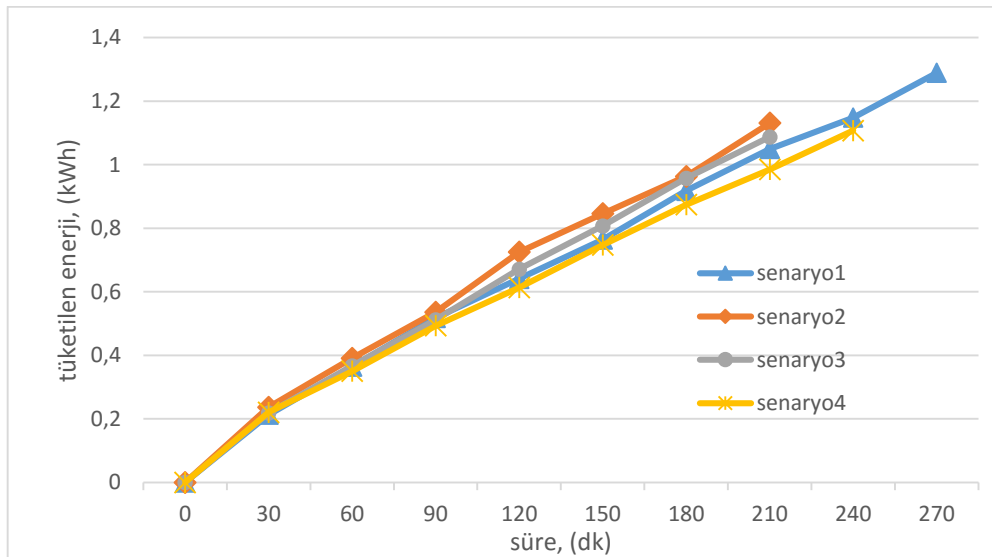
Eş. 1 ve 2 dikkate alındığında tüketilen enerji miktarının ilk anda yüksek olmasının sebebi fırın cidar sıcaklığı, fırın içi hava sıcaklığı, kurutulacak ürün sıcaklığı ve ortam sıcaklığının kurutma sıcaklığına getirilene dek enerji tüketmesindedir. Fırın cidarı, fırın içi hava sıcaklığı ve ürün sıcaklığı kurutma sıcaklığına ulaştıktan sonra elektrik tüketimi dengeli seyretmektedir. İlk 30 dk. içerisinde tepe noktalara ulaşıp 60. dk. sonrasında 0,12-0,15 bandında devam etmiştir. 80 °C de yapılan kurutma deneyinde tüketilen enerji tüketimi senaryo 2,3 senaryo 1,4 den daha fazla enerji tüketmiştir. Bunun başlıca sebebi kapak açık

alanının daha fazla olmasıdır. Senaryo 1 ve 4 denge halinde daha az tüketim yapması diğer senaryolardan daha üstün olduğu anlamına gelmez. Burada sürenin değerlendirilmesi gerekir. Senaryo 2 ve 3 daha kısa sürmüştür. Dolayısı ile tüketim enerji miktarlarını üst üste binmiş (kümülatif) olarak görmek gerekir.



Şekil 5. Elma kurutmak için tüketilen enerji-süre grafiği

Şekil 6 da üst üste bindirilerek toplam tüketilen enerji miktarı gösterilmiştir. En kötü senaryo olarak senaryo 1 görülmektedir hem 270 dk. sürmüş hem de 1,289 kWh enerji tüketmiştir. Senaryo 4, senaryo 2 ve 3 ile yaklaşık olarak aynı enerji tüketimi yapmıştır ancak 240 dk. da kurutmayı tamamlayabilmiştir. Dolayısı ile en iyi senaryo senaryo 2 ve 3 arasında tercih edilmelidir. Senaryo 2 ve 3 kurutma süreleri aynı olduğundan enerji tüketimindeki yaklaşık değerlerine bakıldığında senaryo 2 1,131 kWh senaryo 3 ise 1,087 kWh tüketmiştir. Bu sebeple en iyi açık alan senaryosunun senaryo 3 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Elma kurusu için tüketilen enerji (bindirilmiş)-süre grafiği

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada kurutma fırınının en uygun kapak açık alanı tespit edilmiştir. Kurutma işlemi dört farklı senaryo belirlenerek Arjantin elma üzerinde denenmiş ve en iyi senaryo tükettikleri enerji ve kurutma süreleri karşılaştırılarak tespit edilmiştir. Senaryo 2 ve 3 210 dk. da senaryo 4 240 dk. da ve senaryo 1 de 270 dk. da kurutma işlemi son bulmuştur. Senaryo seçiminde enerji tüketimi-süre karşılaştırması yapılmıştır. Senaryo 1 1,289 kWh senaryo 4 1,107 kWh enerji tüketerek hem zaman hemde enerji tüketimini fazla yaptığından uygun görülmemiştir. Senaryo 2 ve 3 kurutma süreleri aynı olduğundan enerji tüketimindeki yaklaşık değerlerine bakıldığında senaryo 2 1,131 kWh, senaryo 3 ise 1,087 kWh tüketmiştir. Bu sebeple en iyi açık alan senaryosunun senaryo 3 olduğu tespit edilmiştir.

#### Kısaltmalar

$E_{giren}$  = sisteme giren enerji (kJ)

$E_{çıkan}$  = sistemden çıkan enerji (kJ)

$\Delta T$  = sıcaklıklar arasındaki fark ( $^{\circ}C$ )

$W_f$  = fan işi (kJ)

$W_r$  = rezistans işi (kJ)

$Q_k$  = ısı kaçakları (kJ)

$Q_{\dot{u}}$  = kurutulacak ürünün istenilen sıcaklığa kadar ısıtılması için gerekli ısı (kJ)

$Q_d$  = fırın duvarından çıkan ısı (kJ)

$m$  = kütle (kg)

$m_d$  = duvarın kütlesi (kg)

$m_k$  = kaçak havanın kütlesi (kg)

$m_{\dot{u}}$  = kurutulan ürünün kütlesi (kg)

$m_h$  = havanın kütlesi (kg)

$c_p$  = sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kgK)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations 2018, [www.fao.org/statistics/en](http://www.fao.org/statistics/en)
- [2] Kılıç, F., Köse, A. (2017). Meyve-Sebze Kurutma Makineleri İçin Arduino Tabanlı Neme Duyarlı Fan Kontrol Tasarımı. 1st International Turkish World Engineering and Science Congress Antalya, 176-180.
- [3] Bradford, K. J., Dahal, P., Van Asbrouck, J., Kunusoth, K., Bello, P. & Thompson, J. (2018). The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. Trends in Food Science & Technology, 71, 84-93.
- [4] Jiang, N., Liu, C., Li, D., Zhang, Z., Liu, C. & D. Wang. (2017). Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption. LWT - Food Science and Technology, 82, 216-226.

- [5] Aktaş, M. & Gönen, E. (2014). Bay Leaves Drying in a Humidity Controlled Heat Pump Dryer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29, 433-441.
- [6] Oh, Y.W & Choi, Y.S & Ha, A.Y. & Min, H.K. (2019). A numerical study on the buoyancy effect around slanted-pin fins mounted on a vertical plate (Part-I: Laminar natural convection). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 731-744.
- [7] Davidson, I. (2016). Chapter 13 - Oven Safety Monitoring and Alarm. *Biscuit Baking Technology (Second Edition)*, Davidson, I., Academic Press, 221-236.
- [8] Davidson, I. (2016). Chapter 16 - Oven Efficiency. *Biscuit Baking Technology (Second Edition)*, Davidson I., Academic Press, 253-267.
- [9] Davidson, I. (2016). Chapter 17 - Oven Inspection and Audit. *Biscuit Baking Technology (Second Edition)*, Davidson, I., Academic Press, 269-291.
- [10] Davidson, I. (2016). Chapter 9 - Heat Recovery System. *Biscuit Baking Technology (Second Edition)*, Davidson, I., Academic Press, 157-161.
- [11] Davidson, I. (2016). Chapter 10 - Oven Conveyor Bands. *Biscuit Baking Technology (Second Edition)*, Davidson, I., Academic Press, 163-183.
- [12] Donnelly, D. M., Dórea, J. R. R., Yang, H. & Combs, D. K. (2018). Technical note: Comparison of dry matter measurements from handheld near-infrared units with oven drying at 60°C for 48 hours and other on-farm methods. *Journal of Dairy Science*, 101, 9971-9977.
- [13] Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Kaçmaz, H. & Kılıç, F. (2015). Farklı Tipteki Güneş Ocaklarının Tasarımı İmalatı ve Performanslarının Deneysel İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C*, 2, 333-342.
- [14] Demarco D. & Marino, P. (2017). Support to the design of a drying oven for big motors. *Energy Procedia*, 120, 532-539.
- [15] Pfeifer, H. (2017). Industrial Furnaces - Status and Research Challenges. *Energy Procedia*, 120, 28-40.
- [16] Walker, C. E. (2016). Oven Technologies. *Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)*, Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K. & Faubion, J., Oxford: Academic Press, 325-334.
- [17] Cooper, N. (2009). 4 - Microwave ovens. *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens*. Lorence M. W. & Pesheck, P. S., Woodhead Publishing, 105-128.
- [18] Kılıç, F. (2019). Gıda Kurutma Fırınında Dış Yalıtımın Kurutma Süresine ve Enerji Tüketimine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7, 604-613.
- [19] T. S. Enstitüsü. (2002). TS 3688 Kurutulmuş elma- Özellikler ve deney metotları, 2002.
- [20] Dikmen, E., Sahin, A. S. & Yakut, A. K. (2012). Design of an Experimental Drying System and Investigation of Operating Parameters. *Journal of Thermal Science and Technology*, 32, 81-88.
- [21] Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Özkaya, M. G., Kılıç, F. & Kaçmaz, H. (2015). Düz ve Hapsedici Yüzeyle Kurutma Fırın Performanslarının Karşılaştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2, 305-324.

- [22] A.O.A.C. (1990). Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemist. IAC, Arlington, Virginia.
- [23] Çengel, Y. A. & Ghajar A. J. (2015). Isı ve Kütle Transferi: Esaslar ve Uygulamaları. Palme Yayıncılık.
- [24] Holman, J.P. (1994). Experimental Methods for Engineers. McGraw-Hill, Singapore.

## Capture of Submicron Particles in Magnetized Granular Filled Beds

Teoman KARADAĞ 

Inonu University, Department of Electrical Electronics Engineering, 44280, Battalgazi/MALATYA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 01/11/2019

Revision: 10/01/2020

Accepted: 21/01/2020

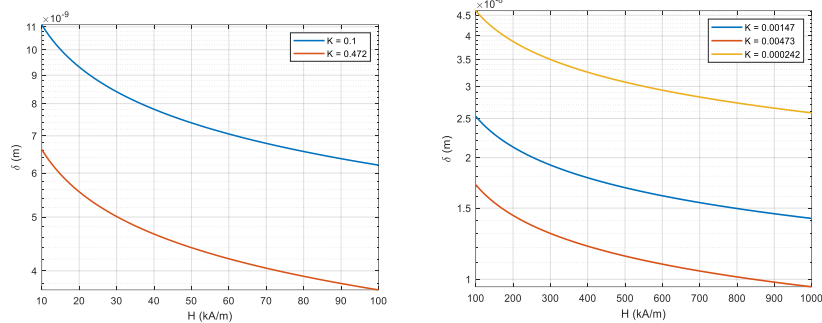
#### Highlights

HGMS  
 Diffusion  
 Magnetic Particles  
 Gradient Magnetic Field

#### Keywords

HGMS  
 Diffusion  
 Magnetic Particle  
 Gradient Magnetic Field

The diffusion separation of micron and submicron sized particles was examined theoretically in the gradient magnetic field formed by tangent ferromagnetic spheres magnetized in external homogeneous magnetic field. In the gradient field around the tangent points of the magnetized spheres, the analytical solution of the diffusion equation for steady states is obtained by using the expression of the magnetic force acting on the submicron-sized particle. The concentration distribution of the particles in these regions was calculated.

a) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particlesb) Mn<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, CuO particles

**Figure A.** Changes of the critical dimensions of the submicron particles held around the tangent points of the magnetized ferromagnetic spheres according to the magnetic field strength

**Purpose:** In this article, the retention of micron and submicron particles in the gradient magnetic field formed by ferromagnetic spheres magnetized by the external homogeneous magnetic field was investigated by the diffusion approach. The analytical solutions of the diffusion equation for steady states were obtained, and the distribution profile of the concentration of the particles was determined in the gradient magnetic field. The critical dimensions of the particles were evaluated to hold the ferromagnetic spheres around their tangent points.

**Theory and Methods:** The basic principle of high gradient magnetic separation (HGMS) and filtration (HGMF) processes is to retain these particles by applying effective magnetic force ( $F_M$ ) to micron-sized, magnetic properties particles in the high gradient magnetic field, or separate the external homogeneous magnetic field from high gradient magnetic fields in HGMS systems. They are formed around ferromagnetic materials (sphere, wire, rod, metal shavings, metal wool, etc.) magnetized by the effect of (H).

**Results:** In Figure A, the changes in the critical dimensions of the particles held in the magnetic field with the gradient formed by the magnetized spheres are shown according to the magnetic field intensity. This relationship is calculated according to equations. The critical size of the particles trapped decreases with increasing outer magnetic field intensity. But in this case, it is important that the particles are single-domain or multi-domain.

**Conclusion:** The diffusion equation of the micron and submicron particles in matrix elements formed from magnetized ferromagnetic spheres has been investigated. Analytical solutions for steady states of the diffusion equation in the high gradient magnetic field formed around the tangent points of the magnetized spheres were obtained.



## Mıknatıslanmış Granül Dolgulu Yataklarda Submikron Parçacıklarının Yakalanması

Teoman KARADAĞ 

İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44280, Battalgazi/MALATYA

### Öz

Dış homojenik manyetik alanda mıknatıslanmış ve teğetleşmiş ferromanyetik kürelerin oluşturduğu gradyanlı manyetik alanda mikron ve submikron boyutlu parçacıkların difüzyon separasyonu olayı teorik olarak incelenmiştir. Mıknatıslanmış kürelerin teğet noktaları etrafında oluşan gradyanlı alanda submikron boyutlu parçacığa etkiyen manyetik kuvvet ifadesinden gidilerek difüzyon denkleminin kararlı durumlar için analitik çözümü elde edilmiş ve parçacıkların bu bölgelerdeki konsantrasyon dağılımı belirlenmiştir. Sistemin manyetik, hidrodinamik, ısı ve geometrik parametreleri dikkate alınarak difüzyon olunan parçacıkların kritik boyutlarını değerlendirmek için analitik formül geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dış manyetik alanın artmasıyla parçacıkların kritik boyutlarının azaldığı gözlenmiştir. Bu düşüşün parçacıkların tek domenli yapısına kadar olabileceği vurgulanmıştır. Analitik hesaplamalara göre parçacıkların kritik boyutlarının kürelerin boyutlarından bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak ferromanyetik kürelerin oluşturduğu gradyanlı manyetik alanda oluşan difüzyon olaylarında parçacıkların kritik boyutlarının matris elemanları olan kürelerin boyutlarından bağımsız olduğu sonucunun tartışılabilir olduğu söylenmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 01/11/2019  
 Düzeltilme: 10/01/2020  
 Kabul: 21/01/2020

### Anahtar Kelimeler

YGMS  
 Difüzyon  
 Manyetik Parçacıklar  
 Gradyanlı Manyetik Alan

### Keywords

HGMS  
 Diffusion  
 Magnetic Particles  
 Gradient Magnetic Field

## Capture of Submicron Particles in Magnetized Granular Filled Beds

### Abstract

The diffusion separation of micron and submicron sized particles was examined theoretically in the gradient magnetic field formed by tangent ferromagnetic spheres magnetized in external homogeneous magnetic field. In the gradient field around the tangent points of the magnetized spheres, the analytical solution of the diffusion equation for steady states is obtained by using the expression of the magnetic force acting on the submicron-sized particle. The concentration distribution of the particles in these regions was calculated. An analytical formula has been developed to evaluate the critical dimensions of the diffused particles considering the magnetic, hydrodynamic, temperature and geometric parameters of the system. According to the results obtained, it was observed that the critical magnetic dimensions of the particles decreased with increasing external magnetic field. It is emphasized that this decrease can be up to the single-domain structure of the particles. According to the analytical calculations, the critical dimensions of the particles were found to be independent of the dimensions of the spheres. However, in the diffusion events occurring in the gradient magnetic field formed by ferromagnetic spheres, the critical dimensions of the particles are independent of the dimensions of the matrix element spheres was said to be discussable.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek gradyanlı manyetik seperasyon (HGMS)'un ve filtrasyon (HGFM)'un teori ve pratiği 1960'lı yıllarda hızla gelişmeye başlamıştır [1-6]. İlk zamanlar esasen minerallerin zenginleştirilmesi [1,2] için kullanılan HGMS daha sonraları çeşitli sanayi alanlarında ve teknolojik işlemlerde etkin olarak kullanılmıştır [7-12]. Bütün bu çalışmalarda gradyanlı manyetik alan esasen dış homojen manyetik alan kutuplarının arasına farklı geometriye sahip olan ferromanyetik malzemelerin (küre, çubuk, ince tel, metal yünü, talaşlar, şekillendirilmiş profiller vb.) yerleştirilmesi ile elde edilmiştir [1-4]. Matris elemanları olarak da tanımlanan bu malzemelerin etrafında oluşan yerel ve yüksek gradyanlı manyetik alanlarda parçacıklar



etkin manyetik kuvvet etkisinde kalarak tutulur ve birikirler. Pratik uygulamalarda daha kullanışlı olduklarından dolayı matris elemanı mıknaatıslanmış ince ferromanyetik tel olarak kullanılır [2-4,11-14]. Manyetik alan ve akışkan ortamın akış yönlerine göre HGMS'ler enine ve boyuna filtreler olarak tanımlanmaktadır.

HGMS'lerin etkinliğini değerlendirmek için separasyon katsayısı veya performans karakteristikleri kullanılır. HGMS performansı sistemin geometrik, manyetik, hidrodinamik, reolojik gibi bir çok etkenlere bağlıdır. Bütün bu etkenlerin performans karakteristiklerine etkisini değerlendirmek için HGMS teorisinde parçacıkların "Trajeksi Model" teorisi yaygın olarak kullanılır [3,4,13,14]. Bu teoride parçacıkların yüksek gradyanlı manyetik alanda hareketini ifade eden denklemden gidilerek bu parçacıkların mıknaatıslanmış ferromanyetik tel üzerinde tutularak biriktirilmesi için gereken uzaklığın "parçacığın tutulma yarıçapı" 'ın belirlenmesi gerekir. HGMS performansı ise parçacığın tutulma yarıçapına göre belirlenir [4,14]. Bu teori baz alınarak HGMS'lerin taşıyıcı ortamın ideal [13], newtonian-aminere [3,14], reolojik [15] akış rejimlerinde performans karakteristikleri incelenmiştir. Son yıllarda ise matris elemanları elipsoid kesitli HGMS'lerin teorisi ve pratiği literatürde geniş olarak incelenmektedir [16-20]. Birçok durumlar için, özellikle tıp ve biyolojik işlemlerde taşıyıcı ortamların matris elemanları ile temassız akışı oluşturulan HGMS sistemlerinin kullanılması daha avantajlıdır. Bu amaçla "HGMS with bounded flow" sistemlerin teorisi oluşturulmuş ve uygulamaları önerilmiştir [21,22]. Bu tür HGMS'lerin Newtonian [21] ve non Newtonian [23] akışkan ortamlar için teorisi de geliştirilmiştir.

Ancak taşıyıcı ortamların içerdikleri parçacıkların boyutları küçüldükçe ( $\delta < 1\mu\text{m}$ ) bu ortamların HGMS'lerle temizlenmesi zorlaşmaktadır. Çünkü bu durumlarda parçacıkların gradyanlı alanda tutularak biriktirilmesi olayları "Trajeksi modeli" 'ne göre belirlenemez. Bu nedenle submikron boyutlu manyetik parçacıkların HGMS'lerde tutularak biriktirilmesi ve böylece HGMS performansının değerlendirilmesi parçacıkların difüzyon teorisine göre incelenmelidir [24-27].

HGMS'lerde parçacıkların separasyonunun difüzyon yaklaşımı ile incelenmesi aslında yeni bir yaklaşım değildir. Difüzyon denkleminin kararlı ve kararsız durumlar için çözümleri yeterince detaylı incelenmiştir [24-27]. HGMS matrislerinde taşıyıcı ortamların farklı modellerinde difüzyon denkleminin çözümleri de literatürde sunulmuştur[natenapit]. HGMS ve HGMF'lerin performans karakteristikleri ilk defa konvektif kütle transferi denklemleri ile 1980'li yıllarda ele alınmış ve birçok durumlar için analitik ve nümerik çözümler üretilmiştir [28-30].

Ancak yapılan bütün bu çalışmalarda HGMS matrisinin mıknaatıslanmış tek ferromanyetik telden oluştuğu varsayılmıştır. Oysa difüzyon yaklaşımı esasen parçacık boyutlarının  $1\mu\text{m}$ 'den küçük oldukları durumlarda uygulanabilir. HGMS ve HGMF'lerde ise parçacık boyutları küçüldükçe matris elemanlarının mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulması öngörülmektedir [1,31]. Buna rağmen manyetik parçacıkların mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş matrislerde difüzyon olayları hiç incelenmemiştir veya yeterince incelenmemiş olduğu söylenebilir. Bunun esas nedeni mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerin etrafında oluşan gradyanlı manyetik alanın silindirlere göre daha karmaşık formüllerle ifade olunmasıdır. Ancak mıknaatıslanmış ferromanyetik tel ile kıyaslandığında mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerde gradyanlı manyetik alan seçici simetriye sahip olup, bizzat kürelerin teğet noktaları etrafında oluşmuştur [1,32]. Bu nedenle bu tür problemlerde difüzyon denklemi iki boyutlu olup, analitik çözümü kolaylaşmaktadır. Kararlaştırılmış (zamandan bağımsız) durumda ise difüzyon denklemi tek boyutlu diferansiyel denkleme dönüşmekte ve analitik çözümü daha da basitleşmektedir. Öte yandan kullanım ve servis bakımından da ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş matrislere sahip olan HGMS'ler sanayi uygulamalarında da birçok avantaja sahiptirler. Günümüzde de bu tür HGMS, HGMF ve benzer manyetik sistemler yaygın olarak kullanılmaktadırlar [33-36]. Dahası özellikle tıp ve biyoloji gibi yeni uygulama alanlarında gelişen manyetik sistemlerde tutulan parçacıkların boyutları da daha düşük düzeylere mikron,nanometre boyutlarına sahiptirler. Buna göre mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş matrislerde parçacıkların difüzyon olaylarının incelenmesi hem teorik hem de pratik uygulama bakımından önem arz etmektedir.

Bu makalede dış homojen manyetik alanla mıknaatıslanmış ferromanyetik kürelerin oluşturduğu gradyanlı manyetik alanda mikron ve submikron parçacıkların tutulması olayı difüzyon yaklaşımı ile incelenmiştir. Difüzyon denkleminin kararlı durumlar için analitik çözümleri elde edilmiş, gradyanlı manyetik alanda parçacıkların konsantrasyonunun dağılım profili belirlenmiştir. Ferromanyetik kürelerin teğet noktaları

etrafından tutulabilmesi için parçacıkların kritik boyutları değerlendirilmiştir. Tutulan parçacıkların kritik boyutlarının dış manyetik alan şiddetine bağımlı olarak değişimleri gösterilmiştir. Literatürde de yer alan ve tutulan parçacıkların kritik boyutlarının matris elemanlarının boyutundan bağımsız olduğu kanaatinin yeterince tespit edilmediğine ve bu sonucun yeni deneylerle kontrol edilmesinin gerektiğine değinilmiştir.

## 2. PROBLEMİN TEORİK FORMÜLİZASYONU (THEORETICAL FORMULIZATION OF THE PROBLEM)

Yüksek gradyantlı manyetik separasyon (HGMS) ve filtrasyon (HGFM) işlemlerinin temel ilkesi, yüksek gradyantlı manyetik alanda mikron boyutlu, manyetik özellikli parçacıklara etkin manyetik kuvvet ( $F_M$ ) uygulayarak bu parçacıkların tutulması veya diğer karışımlardan ayrıştırılmasıdır [1,2,36] HGMS sistemlerinde yüksek gradyantlı manyetik alanlar dış homojen manyetik alanın ( $H$ ) etkisiyle mıknatıslanmış ferromanyetik malzemelerin (küre, tel, çubuk, metal talaşları, metal yünü vb.) etrafında oluşurlar [1,2,4]. Matris elemanları adını alan bu malzemelerin manyetik özelliklerine ve geometrisine bağlı olarak farklı düzeylerde manyetik alan gradyanları oluşturmak mümkündür. Gradyantlı manyetik alanlarda mikron boyutlu parçacıklara etkileyen manyetik kuvvet genelde aşağıdaki gibi belirlenir,

$$\overline{F_M} = \mu_0 k w_p \nabla \frac{h^2}{2} \quad 1$$

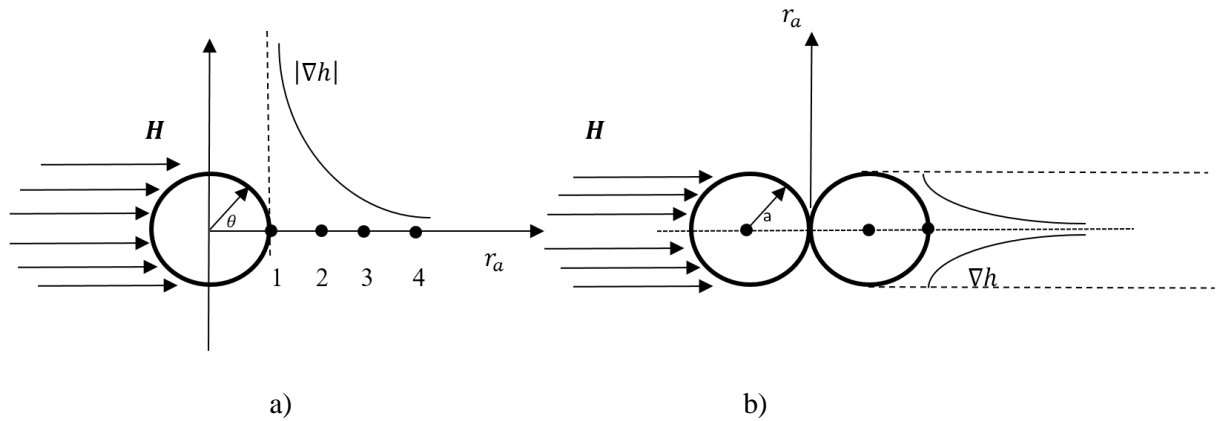
Burada,  $k = k_p - k_f$  – efektif manyetik alınganlıktır,  $k_p(k_f)$ - parçacığın (taşıyıcı ortamın) manyetik alınganlıklarıdır,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$  boşluğun manyetik geçirgenliğidir,  $w_p = \frac{\pi \delta^3}{6}$  – parçacığın hacmi,  $\delta$  – parçacığın çapı,  $h$ - parçacığın tutulduğu bölgedeki manyetik alan şiddetidir.

Basit hesaplamalar göstermiştir ki [1,2] manyetik ayrıştırıcılarda manyetik kuvvetin etkisi klasik ayrıştırıcılardaki diğer kuvvetlerin (Gravitasyon, Arşimet, Van der Waals, iki kat elektrik tabakası vb.) etkisinden birkaç kat yüksektir. Mikron boyutlu parçacıkların ayrıştırılmasında ise bu kuvvete karşı koyabilecek kuvvet Stokse sürüklenme kuvvetidir,

$$F_D = 3 \pi \eta \delta (V_p - V) \quad 2$$

Burada,  $\eta$ - taşıyıcı ortamın dinamik viskozitesi,  $V_p(V)$  – parçacığın (akışkan ortamın) hareket hızıdır. Denklem 1’den görüldüğü gibi, parçacığa etkileyen  $F_m$  kuvvetinin genliği manyetik alan gradyanına ( $gradh$ ) bağımlıdır. Manyetik alan gradyanı ne kadar büyük olursa,  $F_m$  kuvveti de bir o kadar etkin olur. Genelde dış homojen manyetik alan şiddeti ( $H$ ) sınırlı olduğu için  $gradh$  yükseltilmesi manyetik alan kutuplarının veya çalışma bölgesinin geometrisinin değişimi ile elde edilebilir. Manyetik ayrıştırıcılarda yüksek gradyanlar genelde matris elemanlarının geometrisinin değişimi ile elde edilir. Pratik kullanım bakımından ferromanyetik matris elemanları olarak mıknatıslanmış tel ve küreler yaygın olarak kullanılırlar [1-4]. Şekil 1’de ferromanyetik tel ve teğetlenmiş kürelerin etrafında oluşan gradyantlı manyetik alan değişimlerinin grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 1’den görüldüğü gibi, ferromanyetik elemanların yüzeylerinden uzaklaştıkça gradyant hızla azalmaktadır. Genelde bu değişimler koordinat düzleminde üç boyutlu değişimlerdir. Ancak simetri bakımından mıknatıslanmış tek tel üzerindeki alan değişimi iki boyutlu ( $r, \theta$ ) olarak değerlendirilebilir [31]. Bu nedenle HGMS’lerde manyetik parçacıkların tutulması teorisinde de esasen “trajektory model” yaklaşımında iki boyutlu hareket denklemi incelenmektedir [3,4,7,13,14]. Bazı durumlarda bu modelin analitik çözümleri elde edildiği halde [13,14,21], bir çok durumlarda bu denklemlerin ancak nümerik çözümleri elde edilebilir [4,21,37,38]. Oysa mıknatıslanmış ve teğetlenmiş ferromanyetik kürelerin oluşturduğu alan gradyanı baskın olarak kürelerin teğet noktaları etrafında olup, esasen radyal yönde değişmektedir. Bu nedenle parçacıkların manyetik ayrıştırılmasının mıknatıslanmış ve teğetlenmiş ferromanyetik küreler etrafındaki gradyantlı alanda incelenmesi hem teorik hem de pratik bakımdan daha avantajlı görülmektedir.



**Şekil 1.** Mıknatıslanmış ferromanyetik malzemelerin etrafında manyetik alan gradyantın değişimleri.

- a) Teklenmiş ferromanyetik silindir ( $\theta=0$ ),      b) Teğetlenmiş iki küre.

## 2.1. Mıknatıslanmış Ferromanyetik Granüllü Yataklarda HGMS Difüzyon Denklemi (HGMS Diffusion Equation in Magnetized Ferromagnetic Granular Beds)

Genelde difüzyon problemleri en basit halde Fucks denkleminin [39] kararlı durumu için çözülmektedir [24-27]. Bazı durumlarda bu denklemin numerik ve kararsız (non steady state) çözümleri de elde edilebilmektedir. Zaman ve konum bakımından difüzyon denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [24-27].

$$\frac{\partial C(r_a, t)}{\partial t} = \nabla(D\nabla C) - \nabla[VC(r_a, t)] \quad 3$$

Burada  $C(r_a, t)$  – parçacıkların  $t$  zaman anında,  $r_a$  - konumunda sahip oldukları konsantrasyon,  $D = \frac{k_B}{3\pi\eta\delta}$  - difüzyon katsayısı,  $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  – Boltzman sabiti,  $T$ -Mutlak sıcaklık,  $\eta$  – taşıyıcı ortamın dinamik viskozitesi,  $\mathbf{V}$ – parçacığın drift hızıdır.

$r_a = \frac{r}{a}$  – küre yarıçapına göre boyutlandırılmış radyal koordinattır. Parçacığın drift hızı, parçacığa etkileyen bütün kuvvetlerin (manyetik, drage sürüklenme katsayısı, iki kat elektrik, Van der Waals, Brownian vb.) dengesinden belirlenir. Difüzyon teorisinde tek parçacığa yönelik drift hızı aşağıdaki şekilde belirlenebilir [21-27]. Burada  $\mathbf{F}(r)$ ,  $r$  konumunda partikül üzerindeki toplam kuvvettir,  $u = \frac{1}{3\pi\mu\delta}$  ise partikülün hareket mobilitesidir. Bu formüllerde  $\mathbf{V} = u \cdot \mathbf{F}(r)$  olduğu da dikkate alınmaktadır [21-27].

Mikron ve submikron boyutlu parçacıklara etkileyen bu kuvvetlerden etkin olanları  $\mathbf{F}_m$  ve  $\mathbf{F}_D$  kuvvetleridir [5,21-27]. Mıknatıslanmış ve teğetlenmiş kürelerin teğet noktaları etrafında parçacığa etkileyen kuvvetin yaklaşık ifadesi ise literatürde aşağıdaki gibi verilmiştir [40].

$$F_m = \frac{\pi\delta^3}{4} \frac{\mu_0 k \cdot \mu^{1,38} H^2 (1-\phi)}{ar_a} \quad 4$$

Burada  $\mu$ -matris elemanının (kürenin) manyetik geçirgenliği,  $\phi$ - kürelerin teğet noktaları etrafında tutularak biriken parçacıkların konsantrasyonudur ve genelde  $\phi \ll 1$ 'dir. HGMS'lerde manyetik parçacıkların difüzyon teorisinde bu bölge "statik birikme" bölgesi olarak da tanımlanmaktadır [21-27],  $a$  ise kürelerin yarıçapıdır.

Denklem (1-4) dikkate alındığında ve [21-27]'da gösterilen yaklaşımlara benzer olarak yapılan basit matematiksel işlemlerden sonra mıknatıslanmış teğet kürelerin tutma bölgelerinde difüzyon denklemlerinin kararlı durum çözümü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C=C_0(r_a)^{G_0} \quad 5$$

Burada  $C_0$ - parçacıkların başlangıç anındaki ( $t=0$ ) konsantrasyonu ve  $G_0$  ise HGMS sisteminin geometrik, manyetik ve difüzyon karakteristiklerini değerlendirme katsayısıdır.

$$G_0 = \frac{-\pi\delta^3}{4} \frac{\mu_0 k \mu^{1,38} H^2}{k_B T} \quad 6$$

Denklem 5'den görüldüğü gibi kürelerin teğet noktasından uzaklaştıkça parçacıkların konsantrasyonu  $r_a$ 'nın dereceleri ile ters orantıda azalmaktadır. Öte yandan filtre parametresi  $G_0$  arttıkça  $C$  konsantrasyonunun azalma hızı da artar.

Taşıyıcı ortamın içerdikleri manyetik parçacıkların boyutları azaldıkça bu parçacıkların difüzyon olaylarının da arttığı bellidir [21,27,28]. Böyle ki, parçacıkların boyutlarının  $\delta \leq 10...20\mu\text{m}$  olduğunda HGMS sistemlerinde atalet, Van der Waals, iki kat elektrik tabakası vb kuvvetler ihmal edilebilir düzeyde olurlar ve parçacığın tutulma özelliği "trajektory model" e göre yapılabilir [1-3]. Ancak  $\delta < 1\mu\text{m}$  parçacıkların incelenmesinde ise artık Brownian hareketi baskın olmaktadır [21-27]. Öte yandan manyetik parçacık boyutları küçüldükçe onun manyetik özellikleri de hızla zayıflar. Tek domenli yapılarda bu değişim kritik boyutlara ulaşabilir (süper paramanyetik parçacıklar). Bu nedenle, HGMS manyetik difüzyon olaylarında manyetik parçacıkların kritik boyutlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir [21-27]. Mıknatıslanmış ve teğetlenmiş ferromanyetik kürelerin teğet noktaları etrafında parçacıkların difüzyon olaylarında parçacıkların kritik boyutları Denklem 4 ve Denklem 6'ya göre belirlenebilir ve aşağıdaki gibi olur.

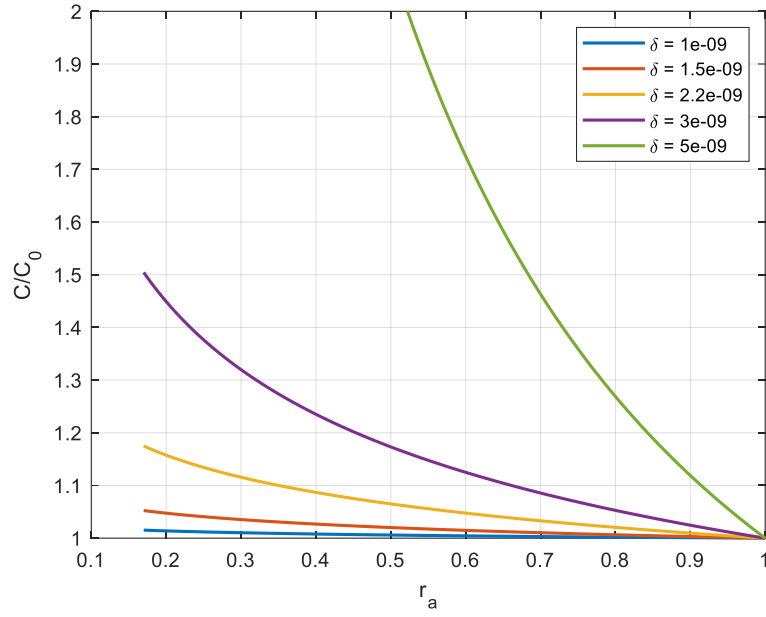
$$\delta = \left[ \frac{4k_B T \ln \frac{C}{C_0}}{\pi \mu_0 k \mu^{1,38} H^2 \ln \frac{1}{r_0}} \right]^{1/3} \quad 7$$

Denklem 7'den görüldüğü gibi, ısı difüzyonunun artmasıyla parçacıkların kritik boyutları arttığı halde, sistemin manyetik özellikleri arttıkça bu boyutlar daha düşük düzeylere doğru kaymaktadır. Fakat bu küçülmeler belli bir alt sınır seviyelerinden az olamaz. Gerçek HGMS sistemlerin sahip oldukları parametreler ışığında [21, 22] bu ilişkiler sonuç ve tartışma kısmında yorumlanmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

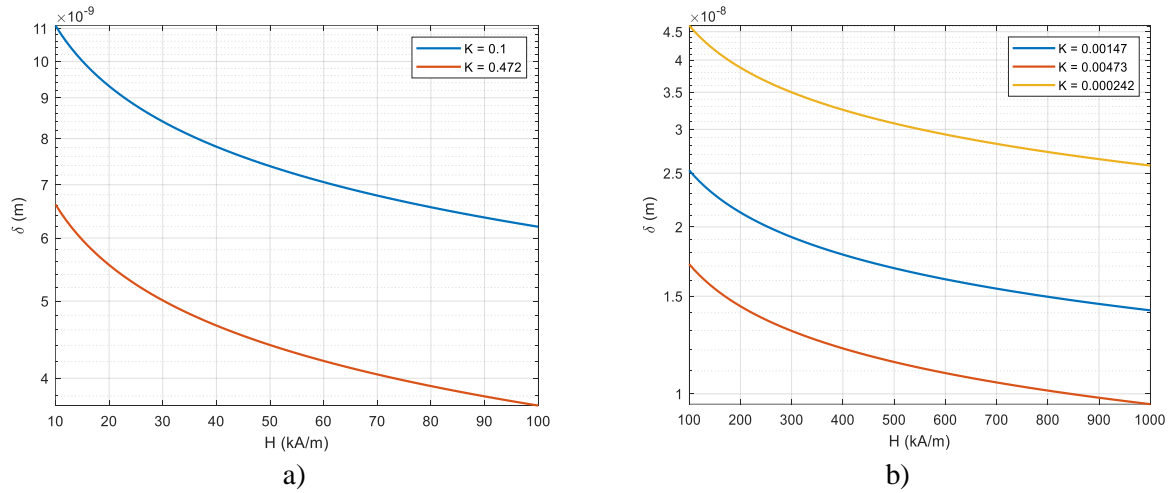
Mıknatıslanmış ve teğetlenmiş ferromanyetik kürelerin teğet noktaları etrafında submikron parçacıkların difüzyon olarak tutulması olayı Denklem 5'e göre değerlendirilmiştir. Kıyaslanmalar için literatürde [23-27] sunulmuş teorik ve deneysel incelemelerde kullanılan veriler kullanılmıştır. Manyetik (ferro ve para) özellikli parçacıklar olarak  $Fe_3O_4$  ( $k_p = 0,1$  ve  $k_p = 0,472$ ,  $H = 100\text{kA/m}$ ),  $Mn_2P_2O_7$  ( $k_p = 4,73 \cdot 10^{-3}$ ,  $H=800\text{kA/m}$ )  $\alpha$ -  $Fe_2O_3$  ( $k_p = 1,47 \cdot 10^{-3}$ ,  $H=800\text{kA/m}$ ),  $CuO$  ( $k_p = 2,42 \cdot 10^{-4}$ ,  $H=800\text{kA/m}$ ).

Bütün durumlar için  $T = 300\text{K}$  olarak kabul edilmiştir. Mıknatıslanmış kürelerin teğet noktaları etrafında parçacıkların konsantrasyonunun değişimlerinin logaritmik değişimine ( $e$ ,  $2e...5e$ ) karşılık gelen kritik parçacık boyutları hesaplanmıştır.



**Şekil 2.** Miknatislanmış kürelerin teğet noktaları etrafında parçacıkların konsantrasyonunun değişimi. (Veriler referans [23-25]'den alıntı yapılmıştır.)

Şekil 2'de manyetik submikron parçacıkların konsantrasyonunun kürelerin teğet noktalarından uzaklaştıkça değişim profilleri verilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, teğet noktalardan uzaklaştıkça parçacıkların konsantrasyonu hızla azalır ve kürelerin boyutları düzeyinde ( $r_a = 1$ ) neredeyse konsantrasyon sıfıra yaklaşmış olur. Bu durumda  $r_{a_0}$  alt limit değerleri  $r_{a_0} = 0.17$  [32] olarak değerlendirilebilir. Bu değer parçacıkların statik birikim [23-25] düzeyi olarak da kabul edilebilir.



**Şekil 3.** Miknatislanmış ferromanyetik kürelerin teğet noktaları etrafından tutulan sunmicron parçacıkların kritik boyutlarının manyetik alan şiddetine göre değişimleri a)  $Fe_3O_4$  parçacıkları, b)  $Mn_2P_2O_7$ ,  $CuO$  parçacıkları (Veriler referans [23-25]'den alıntı yapılmıştır.)

Şekil 3'de ise miknatislanmış kürelerin oluşturduğu gradientli manyetik alanda tutulan parçacıkların kritik boyutlarının manyetik alan şiddetine göre değişimleri gösterilmiştir. Bu ilişki Denklem 7'ye göre hesaplanmıştır. Dış manyetik alan şiddetinin artmasıyla tutulan parçacıkların kritik boyutları azalmaktadır. Fakat bu durumda parçacıkların tek domenli veya çok domenli olmaları önem arz etmektedir. Tutulan

parçacıkların kritik boyutlarının dış manyetik alana bağımlılık derecesi mıknatıslanmış ferromanyetik telin etrafındaki parçacıkların difüzyon olaylarından [23-25] farklıdır. Bu sonuç mıknatıslanmış kürelerin oluşturduğu gradyantlı alanın özelliklerinden ileri gelmektedir. Öte yandan mıknatıslanmış ferromanyetik tel etrafındaki difüzyon olaylarında [23-25] olduğu gibi mıknatıslanmış ve teğetleşmiş kürelerin gradyantlı alanlarında da tutulan parçacıkların kritik boyutlarının matris elemanının (kürelerin) boyutlarından bağımsız olduğu gözlenmiştir. Bu denklem 7'den de açıkça görülmektedir. Fakat mıknatıslanmış kürelerin teğet noktalarında ve etrafında manyetik alan kuvvet çizgilerinin geometrisi dikkate alındığında [1] bu hipotezin yeni ve daha kapsamlı deneysel sonuçlarla kanıtlanması gerekmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Mikron ve submikron parçacıkların mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş matris elemanlarında difüzyon denklemi incelenmiştir. Mıknatıslanmış kürelerin teğet noktaları etrafında oluşan yüksek gradyantlı manyetik alanda difüzyon denkleminin kararlı durumlar için analitik çözümleri elde edilmiştir. Elde edilen teorik formüller parçacıkların difüzyon olaylarına HGMS sisteminden geometrik, manyetik ve hidrodinamik etkilerini değerlendirmeye imkân sağlamaktadır.

Manyetik seperatörde tutulan parçacıkların kritik boyutları belirlenmiştir. Bu boyutlardan küçük parçacıkların mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerin tutma bölgelerinde (teğet noktaları etrafında) tutulmasının ve statik birikmelerinin (static buildup) düşük olasılıklı olduğu vurgulanmıştır. Parçacıkların tutulma bölgesindeki radyal yönde difüzyon konsantrasyonunun değişimi değerlendirilmiştir. Tutulan parçacıkların kritik boyutlarının manyetik alan şiddetine göre değişimi incelenmiştir. Manyetik alan şiddetinin artmasıyla parçacıkların kritik boyutlarının belli bir sınıra kadar azaldığı gözlenmiştir.

Dış manyetik alanın artmasıyla parçacıkların kritik boyutlarının azalması halinde matris elemanları olan kürelerin boyutlarından bağımsız oldukları gözlenmiştir. Fakat matris elemanlarının boyutları HGMS sisteminin diğer önemli parametrelerini (manyetik, hidrodinamik, ısı transferi vb) önemli derecede etkilediğine göre parçacıkların kritik boyutlarının matris elemanlarının boyutlarına bağımlı olup olmadığı yeni ve daha hassas deneysel incelemelerle kanıtlanmalıdır. Çünkü matris elemanlarının boyutları yalnız  $F_m$  manyetik kuvveti değil, matris yapısını ve gözenekli ortamların porozitesini de dolayısıyla  $F_D$  sürüklenme kuvvetini de etkilemektedir. Fakat bu ilişki sürüklenme kuvvetinin ( $F_D$ ) stokes yaklaşımında (Denklem 2) dikkate alınmamıştır. Bu yaklaşımları daha geniş ele almak için matris yapısının akışkan ortamların faz profiline etkisini de ayrıca dikkate almak gerekir [41,42].

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] V. V. Karmazin, V. I. Karmazin, Magnetic methods of beneficiation. Moscow: Nedra, 1987.
- [2] J. Svoboda, Magnetic Techniques for the Treatment of Materials. Dordrecht: Kluwer Academic, 2004.
- [3] R. Gerber, R. . Birss, High gradient magnetic separation. New York, Research Studies Press, 1983.
- [4] Bean C.P. Theory of magnetic filtration. Bull. Am. Phys. Soc. 16, (1971) 350-355.
- [5] J. H. P. Watson, Magnetic filtration, J. Appl. Phys., 44: 9, (1973) 4209–4213.
- [6] J. A. Obertteuffer, Magnetic separation: a review of principles, devices and applications IEEE Trans. Magn. 10: 2, (1974), 223-238.
- [7] F. J. Friedlaender, M. Takayasu, A study of the mechanism of particle build-up on single ferromagnetic wires and spheres. IEEE Trans. Magn. Mag: 18, (1982) 817-819.
- [8] C. De Latour, Magnetic Separation in. Water Pollution Control, IEEE Trans. Magn., 3: MAG 9, (1973) 314–316.

- [9] J. Hristov, Magnetic field assisted fluidization - a unified approach. Part 9. Mechanical processing with emphasis on separations, *Rev. Chem. Eng.*, 28:4–6, (2012) 243–308.
- [10] E. J. Furlani, E. P. Furlani, A model for predicting magnetic targeting of multifunctional particles in the microvasculature, *J. Magn. Mater.*, 312: 1, (2007) 187–193.
- [11] X. Zheng, Z. Xue, Y. Wang, G. Zhu, D. Lu, X. Li, Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review, 352, (2019) 159-169.
- [12] C. T. Yavuz, A. Prakash, J. T. Mayo, V.L. Golvin, magnetic separations: From still plants to biotechnology, *Chemical Engineering Science*, 64: 10, (2009) 2510-2521.
- [13] F. Friedlaender, M. Takayasu, A study of the mechanisms of particle buildup on single ferromagnetic wires and spheres, *IEEE Trans. Magn.*, 18: 3, (1982) 817–821.
- [14] R. Gerber Theory of particle capture in axial filters for high gradient magnetic separation, *J. Phys. Appl. Phys.*, 11, (1978) 2119-2129.
- [15] T. Abbasov, S. Herdem, M. Köksal, Particle capture in axial magnetic filters with power law flow model. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32, (1999) 1097-1103.
- [16] X. Zheng, Y. Wang, D. Lu, X. Li, Theoretical and experimental study on elliptic matrices in the transversal high gradient magnetic separation, *Minerals Engineering*, 111, (2017) 68-78.
- [17] X. Zheng, Y. Wang, D. Lu, X. Li, S. Li, H. Chu, Comparative study on the performance of circular and elliptic cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: Role of the applied magnetic induction, *Minerals Engineering*, 110, (2017) 12-19.
- [18] Y. Wang, D. Gao, X. Zheng, D. Lu, X. Li, Rapid determination of the magnetization state of elliptic cross-section matrices for high gradient magnetic separation, *Powder Technology*, 339, (2018) 139-148.
- [19] Y. Wang, Z. Xue, X. Zheng, D. Lu, X. Li, H. Chu, Study on favorable matrix aspect ratio for maximum particle capture in axial high gradient magnetic separation, *Minerals Engineering* 135, (2019) 48-54.
- [20] Z. Kheshti, S. Hassanajili, K. Azodi Ghajar, Study and Optimization of a High-Gradient Magnetic Separator Using Flat and Lattice Plates, *IEEE Transactions on Magnetics* 55:2, (2019) 1-8.
- [21] N. Rezlescu, V. Murariu, O. Rotariu, V. Badescu, Capture modelling for an axial high gradient magnetic separation filter with a bounded flow model, *Powder Technol.*, 83, (1995), 259-264
- [22] V. Badescu, O. Rotariu, V. Murariu, N. Rezlescu, Magnetic capture modelling for a transversal high gradient filter cell with bounded flow field, *Int. J. Appl. Electrom. Mech.*, 7, (1996) 57-67.
- [23] M. Takayasu, R. Gerber, F. J. Friedlaender, Magnetic separation of submicron particles, *IEEE Trans. Magn.*, 19:5, (1983) 2112-2114.
- [24] R. Gerber, Magnetic filtration of ultra-fine particles, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-20:5, (1984) 1159-1164.
- [25] R. Gerber, M. Takayasu, F. J. Friedlaender, Generalization of HGMS theory: The capture of ultra-fine particles, *IEEE Trans. Magn.* 19: 5, (1983) 2115-2117.
- [26] D. Fletcher, Fine Particle High Gradient Magnetic Entrapment, *IEEE Trans. Magn.*, 27: 4, (1991) 3655-3677.
- [27] E. Blums, A. Yu. Chukrov, Separation processes in polydisperse magnetic fluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 122, (1993) 110-114.

- [28] E. Blums, A. Yu. Chukrov, Some problems of mass transfer in magnetic colloids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 85, (1990) 210-215.
- [29] E. Blums, J. Plavins, A. Chukhrov, High-gradient magnetic separation of magnetic colloids and suspensions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 39, (1983) 147-151.
- [30] K. Hounkumnuard, M. Natenapit, Diffusive capture of magnetic particles by an assemblage of random cylindrical collectors, *Sep. Sci. Technol.* 43, (2008) 3448–3460.
- [31] T. Abbasov, M. Koksall, S. Herdem, Theory of High-Gradient Magnetic Filter Performance, *IEEE Transactions On Magnetics*, 35:4, (1999) 2128-2132.
- [32] Polygradient magnetic separators, by Ed. N. F. Measnikov, Moscow: Nedra, 1973.
- [33] A. Safonyk, A. Bomba, Mathematical modeling process of liquid filtration taking into account reverse influence of process characteristics on medium characteristics, *Int. J. Appl. Math. Res.*, 4:1 (2015) 1-7
- [34] C. Magnet, M. Akouala, P. Kuzhir, G. Bossis, A. Zubarev, N. M. Wereley, Closed-loop magnetic separation of nanoparticles on a packed bed of spheres, *J. Appl. Phys.*, 117:17, (2015) 117-119
- [35] M. F. Haque, S. Araj, C. Moyer, Experimental studies in magnetic separation of ultrafine hematite, *IEEE Trans. Magn.*, 24:6, (1988) 2413–2415.
- [36] C. Moyer, M. Natenapit, S. Araj, Filtration of submicron particles by spheres in HGMS, *J. Magn. Magn. Mater.*, 61:3, (1986) 271–277.
- [37] Y. I. Akoto, Mathematical modelling of high-gradient magnetic separation devices, *IEEE Trans. Magn.* 13: 5, (1977), 1486-1489.
- [38] J. H. P. Watson, Approximate solutions of the magnetic separator equations. *IEEE Trans. Magn.* 14: 4, (1978), 240-245.
- [39] N. Fuchs, *Z. Physik, Über die Stabilität und Aufladung der Aerosole*, *Zeitschrift für Physik*, 89, (1934) 736-743.
- [40] T. Abbasov, K. Ceylan, Filter Performance and Velocity Distribution Relation in Magnetic Filtration of Non-Newtonian Liquids, *Separation Science and Technology* 33: 7, (1998) 2177-2189.
- [41] T. Abbasov, A. Sarimeseli Altunbas, Determination of the particle capture radius in magnetic filters with velocity distribution profile in pores, *Separation Science and Technology* 37: 9, (2002) 2037-2053.
- [42] T. Abbasov, *Elektromanyetik Filtreleme İşlemleri Teori, Uygulama ve Konstrüksiyon*, Şeçkin, Ankara, 2002.



## Theoretical Study of $\text{CCl}_3$ Adsorption on $\text{C}_{20}$ Fullerene

 Ferhat DEMİRAY 

Bolu Abant İzzet Baysal University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 14280, Bolu/TURKEY

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 28/11/2019

Revision 30/11/2019

Accepted: 04/02/2020

#### Highlights

- Functionalization of Fullerene
- Semiconductor Materials.

#### Keywords

 Density Functional Theory  
 $\text{C}_{20}$  Fullerene  
 $\text{CCl}_3$   
 Molecular Structures

In this study, structural and electronic properties of  $\text{CCl}_3$  doped fullerene ( $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$ ) were obtained by using Density Functional Theory. When the GapHL value obtained for the  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecule was compared with the GapHL value obtained for the  $\text{CCl}_3$  molecule, we observed a decrease in the GapHL value for the  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecule. Figure A shows the optimized  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecular structure obtained by using the GGA approximation and the density of states for this structure.

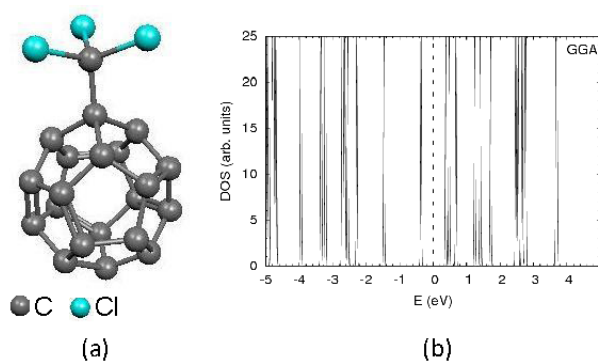


Figure A. (a) Optimized  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecular structure, (b) Density of states for  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecule.

**Purpose:** The aim of this study is to investigate the structural and electronic properties of the new  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecule obtained by  $\text{CCl}_3$  adsorption on the outer surface of  $\text{C}_{20}$  fullerene.

**Theory and Methods:** Geometry optimization, total energy, and electronic structure calculations were carried out in SIESTA code using the density functional theory (DFT) within the local density approximation (LDA) and the generalized gradient approximation (GGA). No symmetry constraints were imposed during the conjugate gradient structure optimizations, continued until all force components are less than  $0.01 \text{ eV}/\text{Å}$ .

**Results:** In optimized  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  structure, bond lengths between C - Cl atoms increased with respect to bond lengths in  $\text{CCl}_3$  molecular structure. In this calculations, adsorption energy was obtained as  $-4.17 \text{ eV}$  and  $-3.41 \text{ eV}$  for LDA and GGA, respectively. GapHL values in the molecular structure obtained by combining  $\text{CCl}_3$  and fullerene were obtained as  $0.57$  and  $0.73 \text{ eV}$  for LDA and GGA, respectively.

**Conclusion:** The results of the study showed that the  $\text{C}_{20}\text{CCl}_3$  molecule can be evaluated as a semiconductor material for both LDA and GGA approach according to GapHL values.



## C<sub>20</sub> Fullerene CCl<sub>3</sub> Adsorpsiyonunun Teorik Olarak İncelenmesi

Ferhat DEMİRAY

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 14280,Bolu/TÜRKİYE

### Öz

Bu çalışmada, Yoğunluk Fonksiyonel Teori (DFT) kullanılarak, C<sub>20</sub> fullerene CCl<sub>3</sub> (karbon triklorür) katılanması ile elde edilen C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> molekülünün yapısal ve elektronik özellikleri incelendi. Yapılan hesaplamalarda adsorpsiyon enerjileri LDA ve GGA için sırası ile -4.17 eV ve -3.41 eV olarak elde edilmiştir. Optimize edilmiş C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> yapıda C – Cl atomları arasındaki bağ uzunluklarının CCl<sub>3</sub> moleküler yapıdaki bağ uzunluklarına göre arttığı gözlemlenmiştir. CCl<sub>3</sub> molekülünün fullerende bağlandığı karbon atomunun, fulleren yapı içinde bağ yaptığı diğer karbon atomları ile arasındaki bağ uzunluklarının da arttığı hesaplanmıştır. CCl<sub>3</sub> ve fullerenin birleşmesi ile elde edilen moleküler yapıda GapHL değerleri LDA ve GGA için sırası ile 0.57 ve 0.73 eV olarak elde edilmiştir. C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> molekülü GapHL değerlerine göre hem LDA hemde GGA yaklaşımı için yarıiletken malzeme olarak değerlendirilebilir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 28/11/2019  
Düzeltilme: 30/11/2019  
Kabul: 04/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Yoğunluk Fonksiyonel Teori  
C<sub>20</sub> Fulleren  
CCl<sub>3</sub>  
Moleküler Yapılar

### Keywords

Density Functional Theory  
C<sub>20</sub> Fulleren  
CCl<sub>3</sub>  
Molecular Structures

### Theoretical Study of CCl<sub>3</sub> Adsorption on C<sub>20</sub> Fullerene

#### Abstract

In this study, structural and electronic properties of CCl<sub>3</sub> (carbon trichloride) doped fullerene (C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub>) were obtained by using Density Functional Theory. In this calculations, adsorption energy was obtained as -4.17 eV and -3.41eV for LDA and GGA, respectively. In optimized C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> structure, bond lengths between C - Cl atoms increased with respect to bond lengths in CCl<sub>3</sub> molecular structure. It has been calculated that the bond lengths between the carbon atom which the CCl<sub>3</sub> molecule is attached in the fullerene and the other carbon atoms which it is bonded are also increased. GapHL values in the molecular structure obtained by combining CCl<sub>3</sub> and fullerene were obtained as 0.57 and 0.73 eV for LDA and GGA, respectively. The C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> molecule can be evaluated as a semiconductor material for both LDA and GGA approach according to GapHL values.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler ile birlikte fullerenler araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Fullerenler karbon elementinin nano-allotroplarındandır ve çok sayıda karbon atomunun bir araya gelmesi ile oluşan küresel yapılardır. Bütün fulleren moleküllerinde karbon atomları çift sayıda yer almaktadır. Karbon atomları fullerenlerde beşgen, altıgen ve yedigen halkalar olarak yer alırlar. İlk keşfedilen fulleren C<sub>60</sub> molekülüdür [1,2]. C<sub>60</sub> molekülü on iki tane beşgen ve yirmi tane altıgendenden oluşur ve bilinen en yaygın fulleren formudur. C<sub>60</sub>' dan başka çok sayıda fulleren molekülü bulunmaktadır. Bilinen en büyük fulleren yapı C<sub>540</sub> molekülüdür.

Fullerenler ilgi çekici özelliklerinden dolayı birçok araştırmanın konusu olmuştur. Hidrojen depolama [3,4], biyolojik çalışmalar [5 - 7], kimya [8 - 10] ve ilgili diğer alanların yanı sıra fullerenlerin işlevselleştirilmeleri üzerine [11 - 16] birçok araştırma yapılmıştır. Bunun yanı sıra nanoölçekli cihazlarda temel elemanlar olarak umut verici yapılardır ve fulleren temelli cihaz örnekleri deneysel ve teorik olarak çalışılmıştır [17, 18].

Fulleren ailesinin en küçük üyesi C<sub>20</sub> olarak bilinir. C<sub>20</sub> molekülünün halka, kase ve kafes (ring, bowl ve cage) olmak üzere üç farklı izomeri bulunmaktadır. Deneysel çalışma yapılmadan önce bu yapılardan

hangisinin daha kararlı olduğuna dair teorik çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalarda kullanılan metoda bağlı olarak, halka yapının [19 - 21] veya kafes yapının [22 - 25] daha kararlı olduğunu gösteren çalışmalar literatürde bulunmaktadır. C<sub>20</sub> fullerenin üç farklı izomerinin gaz fazındaki sentezi ve karakterizasyonu ilk olarak Prinzbach ve arkadaşları tarafından deneysel olarak 2000 yılında gerçekleştirilmiştir [26]. Bu molekülün farklı izomerlerinin karakterizasyonu anlamak için yapılan teorik çalışmalar da bulunmaktadır. [27 - 30].

C<sub>60</sub> molekülüne CCl<sub>2</sub> (karbon diklorür) [31 - 33], C<sub>70</sub> molekülüne CCl<sub>2</sub> [34] eklenmesi ve fulleren katyonlarının işlevselleştirilmesi üzerine literatürde çalışmalar bulunmaktadır [35 - 37]. Bildiğimiz kadarıyla C<sub>20</sub> fullerenin izomeri olan kafes yapısına, CCl<sub>3</sub> molekülünün katılanması üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmadaki öncelikli amacımız ileride yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara bir öngörü sağlamaktır. Yaptığımız bu teorik çalışmada, fulleren C<sub>20</sub>' nin CCl<sub>3</sub> (karbon triklorür) molekülü katılanması ile elde edilecek yeni C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> molekülünün yapısal ve elektronik özelliklerinde meydana gelecek değişiklikler incelendi.

## 2. TEORİK HESAPLAMA YÖNTEMİ (THEORETICAL CALCULATION METHOD)

Geometri optimizasyonları, toplam enerji ve elektronik yapı hesaplamaları yerel yoğunluk yaklaşımı (LDA) ve genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı (GGA) kullanılarak SIESTA [38] kodunda belirtildiği gibi Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) [39,40] temel alınarak gerçekleştirildi. Değiş-tokuş-korelasyon enerji fonksiyoneli için LDA ve GGA yaklaşımında sırası ile Perdew-Zunger parametrisasyonu [41] ve Perdew–Burke–Ehrenzof (PBE) parametrisasyonu [42] kullanıldı. Baz seti için ise polarize orbitaller ile genişletilmiş çift- $\zeta$  orbitalleri kullanıldı. Valans elektronlarının davranışı, Kleinman-Bylander [43] tamamen ayrılabilir biçimlerinde kısmi kor düzeltmeleri ile Troullier-Martins norm korunumlu psödo potansiyel [44] kullanılarak tanımlandı. Optimize geometriler elde edilirken bir simetri kısıtlaması kullanılmadı ve her bir atom üzerindeki tüm kuvvet bileşenleri 0.01 eV/Å'dan küçük olana kadar eşlenik gradyent algoritması kullanılarak gerçekleştirildi.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

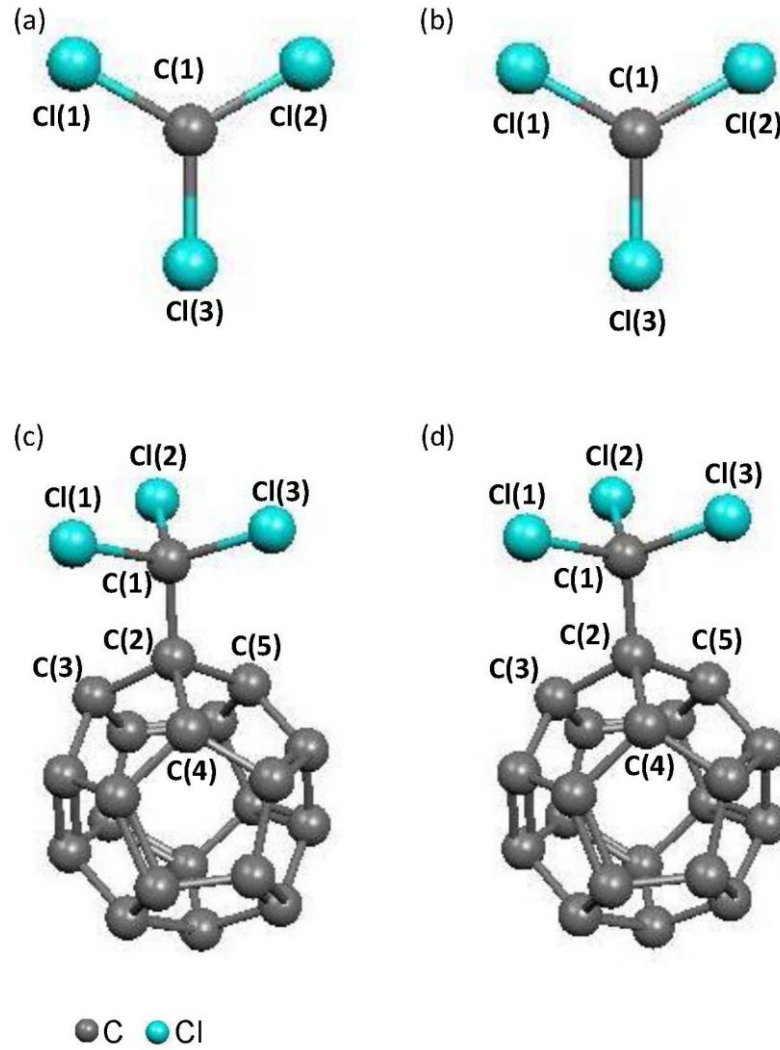
### 3.1. Yapısal Özellikler (Structural Properties)

Optimize edilmiş moleküler yapıların adsorpsiyon (soğrulma) enerjileri,

$$E_{ads} = E(C_{20}CCl_3) - E(C_{20}) - E(CCl_3) \quad 1$$

formülü kullanılarak hesaplandı. Bu formüldeki; E(C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub>), elde edilen yeni moleküler yapı olan C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub>' ün toplam enerjisi, E(C<sub>20</sub>), saf fullerenin toplam enerjisi ve E(CCl<sub>3</sub>), CCl<sub>3</sub> molekülünün toplam enerjisini ifade etmektedir. Yapılan hesaplamalarda adsorpsiyon enerjisi, GGA ve LDA için sırası ile -3.40 eV ve -4.17 eV olarak hesaplanmıştır. Soğrulma enerjisinin negatif değeri bize soğrulmanın ekzotermik olduğunu göstermektedir.

Optimize edilmiş moleküler yapılar Şekil 1.' de gösterilmektedir. Şekil 1(a), (b)' de sırası ile LDA ve GGA yaklaşımları kullanılarak elde edilen CCl<sub>3</sub> molekülü verilmektedir. CCl<sub>3</sub> molekülünde C – Cl bağ uzunlukları LDA için 1.70 Å ve GGA için de 1.72 Å olarak hesaplanmıştır. Şekil 1(a), (b)' de görüldüğü gibi CCl<sub>3</sub> molekülü düzlemseldir ve Cl – C – Cl atomları arasındaki bağ açıları hem LDA hem de GGA için yaklaşık 120<sup>0</sup> değerindedir. Karbon triklorür molekülünün fullerene katılanması ile elde edilen C<sub>20</sub>CCl<sub>3</sub> yapıda C – Cl bağ uzunlukları artmaktadır ve LDA ve GGA için sırasıyla 1.77 Å ve 1.79 Å olarak hesaplandı. Cl – C(1) – Cl arasındaki bağ açıları LDA için ortalama 110.4<sup>0</sup> ve GGA için 109.9<sup>0</sup> olarak elde edilmiştir ki bu değer C(1) atomunun sp<sup>3</sup> hibritleşmesi yaptığını göstermektedir ve C(1) ve Cl atomlarından oluşan yapı üçgen piramit şeklindedir. C(1) – C(2) – C(a) (C(a) = C(3), C(4), C(5) ile işaretlenmiş karbon atomları) arasındaki açı da ortalama LDA ve GGA için sırasıyla 117.3<sup>0</sup> ve 117.5<sup>0</sup> olarak elde edilmiştir. Tablo 1.' de verilen karbon atomları arasındaki bağ uzunlukları ve Şekil 1.' de görülebileceği gibi C(2) atomu ile C(3), C(4) ve C(5) atomları arasında oluşan üçgen piramit yapıdan dolayı, C(2) atomunun da sp<sup>3</sup> hibritleşmesi yaptığı görülmektedir.



**Şekil 1.** Optimize edilmiş molekül yapıları (a)  $CCl_3$ , (c)  $C_{20}CCl_3$ , LDA ile (b)  $CCl_3$ , (d)  $C_{20}CCl_3$  GGA ile optimize edilmiş moleküler yapılar. C atomları gri ve Cl atomları mavi renkte gösterilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda  $C_{20}CCl_3$  molekülü için elde edilen seçilmiş bağ uzunlukları Tablo 1.' de verilmektedir. Katkılama yapılmamış fullerende C(2) atomunun diğer karbon atomları ile yaptığı bağ uzunlukları C(2) – C(3), C(2) – C(4), C(2) – C(5) LDA ve GGA yaklaşımında sırası ile 1.46, 1.46, 1.45 Å ve 1.50, 1.45, 1.45 Å olarak elde edilmiştir. Bu bağ uzunluklarının arttığı Tablo 1.' den görülmektedir.

**Tablo 1.**  $C_{20}CCl_3$  molekülü için seçilmiş hesaplanan bağ uzunlukları. Bağ uzunlukları Angstrom (Å) cinsinden verilmiştir.

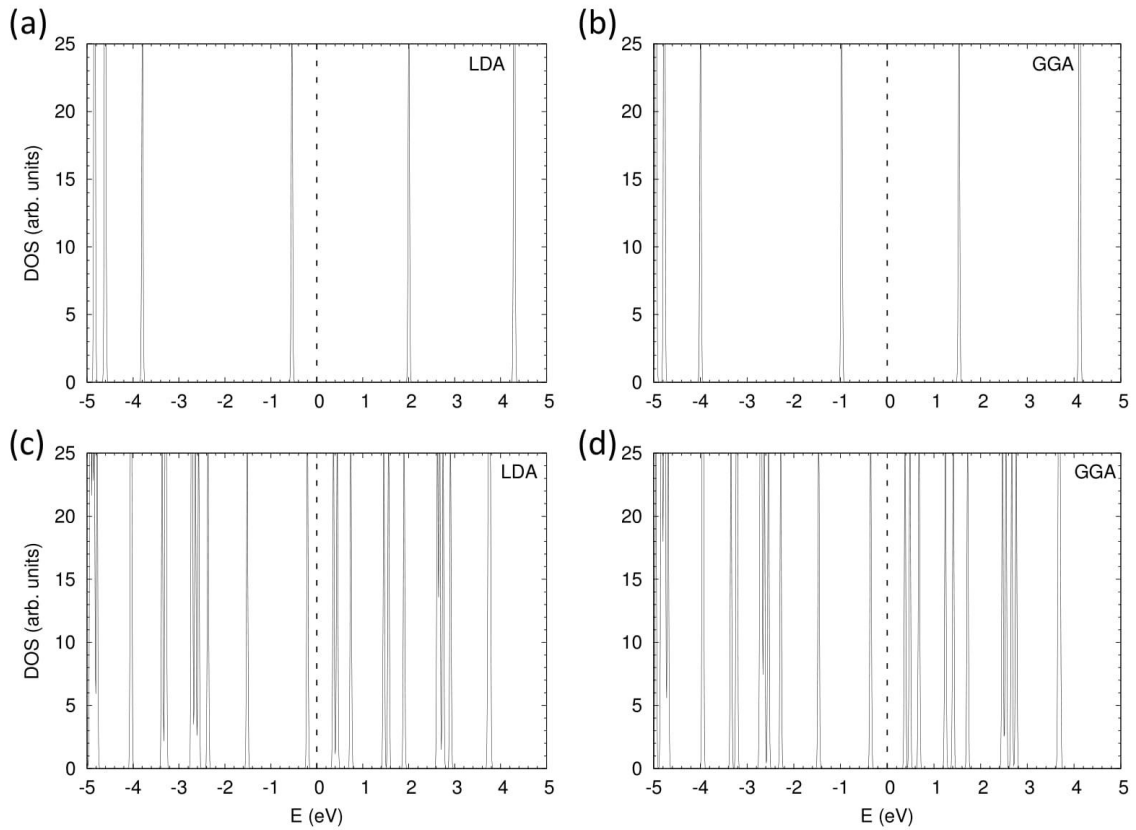
		C(1)-C(2)	C(2)-C(3)	C(2)-C(4)	C(2)-C(5)	C(1)-Cl
Bu çalışma	LDA	1.52	1.55	1.54	1.54	1.77
	GGA	1.54	1.56	1.56	1.57	1.79
Teorik <sup>a</sup>	{R-C <sub>60</sub> } <sup>+</sup>	1.578	1.529	1.507	1.529	
Teorik <sup>b</sup>	{R-C <sub>20</sub> H <sub>10</sub> } <sup>+</sup>	1.618	1.488	1.492	1.492	
Deney <sup>c</sup>	C <sub>20</sub> H <sub>10</sub> R <sup>+</sup>	1.613(7)	1.499(7)	1.491(7)	1.519(7)	

<sup>a</sup> Rogachev ve ark. [35], <sup>b</sup> Rogachev ve ark. [36] <sup>c</sup> Zabula ve ark. [37]

Tablo 1.' den görülebileceği gibi elde edilen bağ uzunlukları,  $C_{20}$  fullerenin izomeri olan kase yapı için daha önce yapılan deneysel ve teorik çalışmanın yanı sıra  $C_{60}$  fullerene katyonları üzerine yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde.

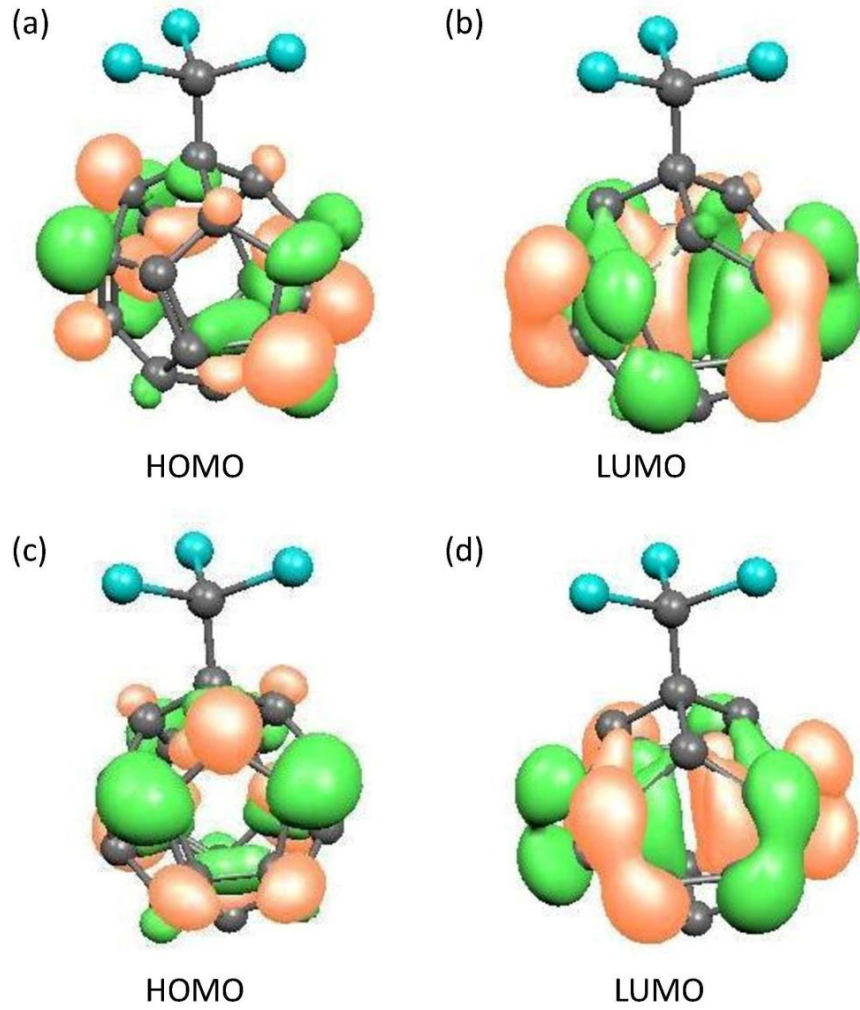
### 3.2. Elektronik Özellikler (Electronic Properties)

Optimize edilmiş moleküler yapılar için durum yoğunlukları Şekil 2.' de gösterilmektedir. Burada enerjiler kesikli çizgi ile gösterilen Fermi enerji seviyesine ( $E_F$ ) göre. Moleküllerin elektronik yapılarını belirlemek için, dolu moleküler orbitallerin en yüksek enerjili olanı (HOMO) ile boş moleküler orbitallerin en düşük enerjili olanı (LUMO) arasındaki fark alınarak, optimize edilmiş yapıların enerji aralığı HOMO – LUMO gap (GapHL) hesaplandı.



**Şekil 2.** Optimize edilmiş (a)  $CCl_3$ , (c)  $C_{20}CCl_3$ , LDA için (b)  $CCl_3$ , (d)  $C_{20}CCl_3$  GGA için durum yoğunlukları (DOS). Enerjiler kesikli çizgi ile gösterilen Fermi enerji seviyesine ( $E_F$ ) göre.

Şekil 2.(a) ve (b)' den görüldüğü gibi karbon triklorür için elde edilen GapHL değerleri GGA ve LDA için sırasıyla 2.51 ve 2.54 eV değerindedir.  $CCl_3$  molekülünün fullerene katılanması ile elde edilen  $C_{20}CCl_3$  yapı için durum yoğunlukları Şekil 2.(c) ve (d)' de gösterilmektedir ve GapHL değerleri azalmaktadır. GapHL değerleri GGA ve LDA için sırası ile 0.73 ve 0.57 eV hesaplanmıştır. Elde edilen bu GapHL değerlerine göre  $C_{20}CCl_3$  molekülü hem LDA hemde GGA yaklaşımı için yarıiletken malzeme olarak değerlendirilebilir. Elde ettiğimiz GapHL değerini karşılaştırabileceğimiz herhangi bir deneysel yada teorik veriye literatürde rastlanmamıştır.



**Şekil 3.** (a), (b) LDA, (c), (d) GGA yaklaşımları için  $C_{20}CCl_3$  yapının moleküler sınır orbitalleri.

Şekil 3.' de  $C_{20}CCl_3$  moleküler yapı için üç boyutlu eş değer yüzeyler olarak HOMO – LUMO çizimleri gösterilmektedir. Burada dalga fonksiyonundaki farklı renkler farklı fazları göstermektedir. Şekil 3.' den görülebileceği gibi her iki yaklaşım için LUMO seviyesi  $CCl_3$  hariç fullerenin her tarafında kendini göstermekle beraber C(2) atomunun bağ yaptığı diğer karbon atomları ile fazla karışmamıştır. HOMO seviyesi ise  $CCl_3$  hariç fullerenin her tarafında kendini göstermektedir.

#### 4. ÖZET VE SONUÇ (SUMMARY and CONCLUSION)

Yoğunluk Fonksiyonel Teori (DFT) kullanılarak,  $C_{20}$  fullerene  $CCl_3$  (karbon triklorür) katkılanması ile elde edilen yeni moleküler yapının yapısal ve elektronik özellikleri incelendi. Elde edilen sonuçlara göre adsorpsiyon enerjileri LDA ve GGA için sırası ile -4.17 eV ve -3.41 eV olarak hesaplandı. Optimize edilmiş  $CCl_3$  moleküler yapıdaki C – Cl atomları arasındaki bağ uzunluklarının  $C_{20}CCl_3$  yapıda arttığı hesaplanmıştır.  $CCl_3$  molekülünün fullerende bağlandığı karbon atomunun, fulleren yapı içinde bağ yaptığı diğer karbon atomları ile arasındaki bağ uzunluklarının da arttığı hesaplanmıştır.  $CCl_3$  moleküler yapıda LDA ve GGA için 2.54 ve 2.51 eV GapHL değerine sahiptir ki yalıtkan malzeme olarak değerlendirilebilir.  $C_{20}CCl_3$  moleküler yapıda GapHL değerleri LDA ve GGA için sırası ile 0.57 ve 0.73 eV olarak elde edilmiştir.  $C_{20}CCl_3$  molekülü GapHL değerlerine göre hem LDA hemde GGA yaklaşımı için yarıiletken malzeme olarak değerlendirilebilir.  $C_{20}CCl_3$  molekülü için elde edilen sonuçların, ileride yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara yol göstermesi beklenebilir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Smalley R.E., 'C<sub>60</sub>: Buckminster fullerene' Nature **318**, 162 – 163, (1985).
- [2] Kratschmer W., Lamb L. D., Fostiropoulos K., Huffman D. R., 'Solid C<sub>60</sub>: a new form of carbon' Nature **347**, 354 - 358, (1990).
- [3] Olga V. Pupysheva O. V., Farajian A. A., Boris I. Y., 'Fullerene Nanocage Capacity for Hydrogen Storage' Nano Lett. **8**, 767 – 774, (2008).
- [4] Yoon M., Yang S., Hicke C., Wang E., Geohegan D., Zhang Z., 'Calcium as the Superior Coating Metal in Functionalization of Carbon Fullerenes for High-Capacity Hydrogen Storage' Phys. Rev. Lett. **100**, 206806, (2008).
- [5] Bosi S., Da Ros T., Spalluto G., Prato M., 'Fullerene derivatives: an attractive tool for biological applications' Eur. J. Med. Chem. **38**, 913 – 923,(2003).
- [6] Andreev I., Petrukhina A., Garmanova A., Babakhin A., Andreev S., Romanova V., Troshin P., Troshina O., DuBuske L., 'Penetration of fullerene C<sub>60</sub> derivatives through biological membranes' Fuller Nanotub Carbon Nanostruct. **16**, 89 – 102, (2008).
- [7] Tabata Y., Ikada Y., 'Biological functions of fullerene' Pure Appl Chem. **71**, 2047–53, (1999).
- [8] Lynch B.J., Zhao Y., Truhlar D.G. , 'Effectiveness of Diffuse Basis Functions for Calculating Relative Energies by Density Functional Theory' J. Phys. Chem. A. **107**, 1384 – 1388, (2003).
- [9] Boese A.D., Martin J.M.L., Handy N.C., 'The role of the basis set: Assessing density functional theory' J.Chem. Phys. **119**, 3005, (2003).
- [10] Grimme S., Steinmetz M., Korth M., 'How to Compute Isomerization Energies of Organic Molecules with Quantum Chemical Methods' J. Org. Chem. **72**, 2118 – 2126, (2007).
- [11] Tachikawa H., Iyama T., Abe S., 'DFT study on the interaction of Fullerene (C<sub>60</sub>) with hydroxyl radical (OH)' Phys. Proc. **14**, 139 – 142, (2011).
- [12] Ren X. Y., Jiang C. Y., Wang J., Liu Z. Y., 'Endohedral complex of fullerene C<sub>60</sub> with tetrahedrane, C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>@C<sub>60</sub>' J. Mol. Graph. Model **27**, 558–562, (2008).
- [13] Pan X. M., Fu Z., Hong B., Zhao L., Qui Y. Q., Su Z. M., Wang R. S., 'Theoretical studies of the relative stabilities and electronic properties on B endohedral and exohedral fullerenes' Synthetic Met. **152**, 325 – 328, (2005).
- [14] Marcos P. A., Alonso J. A., López M. J., 'Simulating the thermal behavior and fragmentation mechanisms of exohedral and substitutional silicon-doped C<sub>60</sub>' J. Chem. Phys. **123**, 204323, (2005).
- [15] Guha S., Nakamoto K., 'Electronic structures and spectral properties of endohedral fullerenes' Coordin. Chem. Rev. **249**, 1111 – 1132 (2005).
- [16] Popov A. A., Yang S., Dunsch L., 'Endohedral Fullerenes' Chem. Rev. **113**, 5989 – 6113, (2013).
- [17] Zhang C., Sun W., Cao Z., 'Most stable structure of fullerene [20] and its novel activity toward addition of alkene: A theoretical study' J. Chem. Phys. **126**, 144306, (2007).
- [18] Zeng C., Wang H., Wang B., Yang J., Hou J. G., 'Negative differential resistance device involving two C<sub>60</sub> molecules' Appl.Phys.Lett. **77**, 3595 – 3597, (2000).
- [19] Brabec C. J., Anderson E. B., Davidson B. N., Kajihara S. A., Zhang Q., Bernholc J., Tomanek D., 'Precursors to C<sub>60</sub> fullerene formation' Phys. Rev. B. **46**, 7326–7328, (1992).



- [20] Wang Z., Day P., Pachter R., 'Ab initio study of C<sub>20</sub> isomers: Geometry and vibrational frequencies' Chem. Phys. Lett. **248**, 121–126, (1996).
- [21] Taylor P. R., Bylaska E., Weare J. H., Kawai R., 'C<sub>20</sub>: Fullerene, bowl or ring? New results from coupled - cluster calculations' Chem. Phys. Lett. **235**, 558–563, (1995).
- [22] Raghavachari K., Strout D. L., Odom G. K., Scuseria G. E., Pople J. A., Johnson B. G., Gill P. M. W., 'Isomers of C<sub>20</sub>: Dramatic effect of gradient corrections in density functional theory' Chem. Phys. Lett. **214**, 357–361, (1993).
- [23] Feyereisen M., Gutowski M., Simons J., 'Relative stabilities of fullerene, cumulene, and polyacetylene structures for C<sub>n</sub>: n = 18- 60' The J. of Chem. Phy. **96**, 2926–2932, (1992).
- [24] Grossman J. C., Mitas L., Raghavachari K., 'Structure and stability of molecular carbon: Importance of electron correlation' Phys. Rev. Lett. **75**, 3870–3873, (1995).
- [25] Sokolova S., Lüchow A., Anderson J. B., 'Energetics of carbon clusters C<sub>20</sub> from all-electron quantum Monte Carlo calculations' Chem. Phys. Lett. **323**, 229–233, (2000).
- [26] Prinzbach H., Weiler A., Landenberger P., Wahl F., Worth J., Scott L.T., Gelmont M., Olevano D., v. Issendorff B., 'Gas-phase production and photoelectron spectroscopy of the smallest fullerene, C<sub>20</sub>' Nature **407**, 60 – 63, (2000).
- [27] Castro A., Marques M. A. L., Alonso J. A., Bertsch G. F., Yabana K., Rubio A., 'Can optical spectroscopy directly elucidate the ground state of C<sub>20</sub>?' J. Chem. Phys. **116**, 1930 – 1933, (2002).
- [28] Gianturco F. A., Kashenock G. Y., Lucchese R. R., Sanna N., 'Low-energy resonant structures in electron scattering from C<sub>20</sub> fullerene' J. Chem. Phys. **116**, 2811, (2002).
- [29] Saito M., Miyamoto Y., 'Vibration and vibronic coupling of C<sub>20</sub> isomers: Ring, bowl, and cage clusters' Phys. Rev. B. **65**, 165434, (2002).
- [30] Romero A. H., Sebastiani D., Ramirez R., Kiwi M., 'Is NMR the tool to characterize the structure of C<sub>20</sub> isomers?' Chem. Phys. Lett. **366**, 134 – 140, (2002).
- [31] Tsuda M., Ishida T., Nogami T., Kurono S., Ohashi M., 'C<sub>61</sub>Cl<sub>2</sub>. Synthesis and characterization of dichlorocarbene adducts of C<sub>60</sub>' Tetrahedron Lett. **34**, 6911 – 6912, (1993).
- [32] Nogami T., Tsuda M., Ishida T., Kurono S., Ohashi M., 'Addition Reactions of Benzyne, Dienes, Dichlorocarbene, and Oxygen to C<sub>60</sub>' Fullerene Sci. Techn. **1**, 275 – 285, (1993).
- [33] Ishida T., Furudate T., Nogami T., Kubota M., Hirano T., Ohashi M., 'Synthesis and Mass Spectral Analysis of C<sub>60</sub> - Dihalocarbene Adducts' Fullerene Sci. Techn. **3**, 399, (1995).
- [34] Apenova M. G., Akhmetov V.A., Belov N.M., Goryunkov A.A., Ioffe I.N., Lukonina N. S., Markov V. Y., Sidorov L. N., 'Aklali – Metal Trichloroacetates for Dichloromethylenation of Fullerenes: Nucleophilic Addition - Substitution Route' Chem. Asian. J. **9**, 915 – 923, (2014).
- [35] Rogachev A. Y., Filatov A. S., Petrukhina M. A., 'Functionalized Fullerene Cations {R-C<sub>60</sub>}<sup>+</sup> From Theoretical Point of View' Phys. Chem. Chem. Phys. **14**, 10935, (2012).
- [36] Rogachev A. Y., Filatov A. S., Zabula A. V., Petrukhina M. A., 'Functionalized corannulene cations: a detailed theoretical survey' Phys. Chem. Chem. Phys. **14**, 3554 – 3567, (2012).
- [37] Zabula A. V., Spisak S. N., Filatov A. S., Rogachev A. Y. Petrukhina M. A., 'A Strain-Releasing Trap for Highly Reactive Electrophiles: Structural Characterization of Bowl-Shaped Arenium Carbocations' Angew. Chem. Int. Ed. **50**, 2971–2974, (2011).



- [38] Soler J. M., Artacho E., Gale J. D., García A., Junquera J., Ordejón P., Sánchez-Portal D., *'The SIESTA method for ab initio order-N materials simulation'* J. Phys. Condens. Matter **14**, 2745 – 2749, (2002).
- [39] Hohenberg P., Kohn W., *'Inhomogeneous electron gas'* Phys. Rev. **136**, B864 – 871, (1964).
- [40] Kohn W., Sham L. J., *'Self-consistent equations including exchange and correlation effects'* Phys. Rev. **140**, A1133 – 1138, (1965).
- [41] Perdew J. P., Zunger A., *'Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems'* Phys. Rev. B **23**, 5048 – 5079, (1981).
- [42] Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M., *'Generalized gradient approximation made simple'* Phys. Rev. Lett. **77**, 3865 – 3868, (1996).
- [43] Kleinman L., Bylander D. M., *'Efficacious form for model pseudopotentials'* Phys. Rev. Lett. **48**, 1425 – 1428, (1982).
- [44] Troullier N., Martins J. L., *'Efficient pseudopotentials for plane-wave calculations'* Phys. Rev. B **43**, 1993 – 2006, (1991 ).

## The Effects of Zn, Cu and Mg Elements on Ageing, Microstructure and Hardness in Al Alloys Produced by P/M Method

 Sinan AKSÖZ<sup>1</sup>  · Hakan ADA<sup>2</sup>  · Emre İNCE<sup>3</sup>  · Serkan ÖZSOY<sup>4</sup>  · Yavuz KAPLAN<sup>5,\*</sup> 
<sup>1</sup>Pamukkale University Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Denizli

<sup>2,3,4</sup>Kastamonu University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kastamonu

<sup>5</sup>Pamukkale University Faculty of Technology, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Denizli

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 17/12/2019

Revision 29/01/2020

Accepted: 08/02/2020

#### Highlights

- Powder Metallurgy.
- Ageing.
- Solution Treating

#### Keywords

Powder Metallurgy

Ageing

Solution Treating

Al-Zn-Cu-Mg Alloy

In this study, two different compositions contain pure Al, Zn, Cu and Mg were produced by powder metallurgy. The powders were pressed under 800 MPa and sintered in purity argon atmosphere at 600°C after pressing process. Solution heat treatment were applied to sintered samples at 480°C and then rapid quenching was performed. For quenched samples; Ageing process was carried out at 120°C for 3h periods totally 12 hours. As a result, the ageing process leads to increased hardness due to the homogeneously dispersed secondary precipitates that form internally in the microstructure.

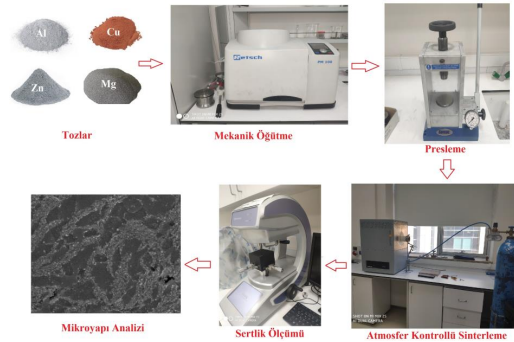


Figure A. Circuit schema of the production process

**Purpose:** The purpose of this study is investigation on effect of alloy elements on microstructure and hardness properties for Al alloy.

**Theory and Methods:** The grinding process of the powders was carried out in Alcohol for 120 minutes. The powders were pressed under 800 MPa and sintered in an atmosphere-controlled furnace (high purity argon atmosphere) at 600°C after pressing process. Solution treating was carried out at 480°C for 2 hours. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), Element Distribution Spectrometry (EDS) and Mapping (MAP) was used for microstructure analysis of the samples.

**Results:** It is observed that the hardness values increase significantly after the ageing heat treatments for both alloys. In addition, after the solution process, while the hardness values of the alloy 1 was 130 HV, the hardness value of the alloy 2 increased up to 146 HV. The reason of this is Cu content that plays vital role in hardness of Al alloy.

**Conclusion:** Ternary Al alloy was produced by PM in the different compositions. The effects of the alloying elements on the hardness and microstructure were examined. The study shows that the hardness increases in the alloy 2 due to the homogeneously dispersed Cu and secondary phases (such as Al<sub>2</sub>Cu) formed after heat treatments.



## T/M Yöntemi ile Üretilen Al Alaşımlarında Zn, Cu ve Mg Elementlerinin, Yaşlanma, Mikroyapı ve Sertliğe Etkileri

Sinan AKSÖZ<sup>1</sup>  Hakan ADA<sup>2</sup>  Emre İNCE<sup>3</sup>  Serkan ÖZSOY<sup>4</sup>  Yavuz KAPLAN<sup>5</sup> \* 

<sup>1</sup>Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Denizli

<sup>2,3,4</sup>Kastamonu Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu

<sup>5</sup>Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Denizli

### Öz

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle saf haldeki Al, Zn, Cu ve Mg tozlarından 2 farklı kompozisyonda ürünler elde edilmiştir. Tozların alaşım işlemi mekanik öğütme ile gerçekleştirilmiştir. Alaşımlandırma sonrası numuneler 800 MPa basınç altında preslenmiş ve 600 °C'de yüksek saflıktaki argon atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelere 480 °C'de çözündürme ve sonrasında hızlı su verme işlemi uygulanmıştır. Su verilen numunelere ise; 120 °C yaşlandırma sıcaklığında, 3'er saat arayla toplamda 12 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Numunelerde yaşlanma ve sinterlemenin etkilerini incelemek için FESEM, Element Dağılım Spektrometresi, Haritalama (MAP) ve sertlikteki etkileri incelemek için de mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonucunda yaşlanma sonrası sertlikte artış meydana gelmiş ve sertlikteki bu artışın mikroyapıda içten oluşumlu şekilde meydana gelen ve homojen dağılmış ikincil çökeltiler sayesinde olduğu gözlemlenmiştir.

### The Effects of Zn, Cu and Mg Elements on Ageing, Microstructure and Hardness in Al Alloys Produced by P/M Method

#### Abstract

In this study, two different compositions contain pure Al, Zn, Cu and Mg were produced by powder metallurgy. Alloying process of powders was carried out by mechanical grinding. The powders were pressed under 800 MPa and sintered in high purity argon atmosphere at 600°C after pressing process. Solution heat treatment were applied to sintered samples at 480°C and then rapid quenching was performed. For quenched samples; Ageing process was carried out at 120°C for 3h periods totally 12h. FESEM, Element Dispersion Spectrometry, Mapping (MAP) and microhardness measurement were performed on samples to investigate the effects of ageing and sintering. As a result, the ageing process leads to increased hardness due to the homogeneously dispersed secondary precipitates that form internally in the microstructure.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 17/12/2019  
Düzeltilme: 29/01/2020  
Kabul: 08/02/2020

#### Anahtar Kelimeler

Toz Metalürjisi  
Yaşlandırma  
Çözeltiyeye Alma  
Al-Zn-Cu-Mg Alaşımı

#### Keywords

Powder Metallurgy  
Ageing  
Solution Treating  
Al-Zn-Cu-Mg Alloy

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hafif ve yüksek mukavemetli olması sebebiyle son yıllarda, Alüminyum (Al) ve alaşımları üzerine yapılan çalışmalar ciddi bir artış göstermektedir [1-3]. Bu artıştaki en büyük etkenlerin başında ise; Al ve alaşımlarının kullanım alanlarının sahip oldukları düşük yoğunluk, diğer alaşımlara nazaran kolay şekil verilebilirlik ve uygulanan ısı işlemler sayesinde yüksek sertlik değerleri kazandırılabilmesidir. Ayrıca Al ve alaşımlarının mekanik özelliklerinin, Toz Metalürjisi (T/M) gibi yeni üretim prosesleriyle geliştirilmesi ve kullanım bulması ile mekanik özelliklerde önemli artışlar sağlanabilmiştir [1-5]. Birçok Al alaşımı düşük yoğunluk sebebiyle geniş bir uygulama alanı bulmakta olup, Mg ilavesi yapılarak, hafiflikle beraber, iyileştirilmiş korozyon direncine de sahip olarak, çok daha avantajlı bir malzeme haline gelmektedir [6]. Ayrıca bu alaşımların sahip oldukları iyi ıslatabilirlik özellikleri ile içyapıda olumlu sonuçlar sağlanabilmektedir [7]. Klasikleşmesine rağmen Al 7075 alaşımı, günümüzde halen havacılık sektörü ve uzay sanayinde, sahip olduğu eşsiz korozyon direnci ve dayanımı sayesinde çeşitli tasarımlarda uygulama

alanı bulan malzemelerin başında gelmektedir. Bu özellikleri sayesinde; hem Ar-Ge çalışmalarının odak noktasında yer almakta, hem de ticari alışımlar içerisindeki yerini korumaktadır. Al 7075 alaşımının böylesi bir konumda olmasında, malzemenin yaşlandırılabilirliği özelliği sayesinde mikroyapıda ve mekanik özelliklerde sağlanan gelişme ve iyileştirmelerin olduğu söylenebilir [8-10]. Sahip oldukları geliştirilebilir bu özellikler sayesinde; bu alışımlar üzerinde hâlihazırda çalışmaları devam edeceği aşikârdır [11].

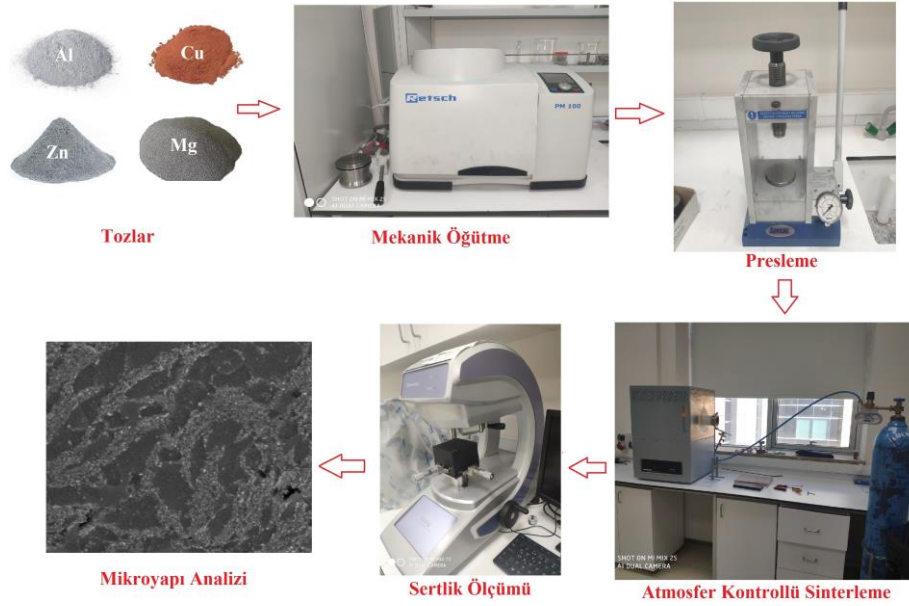
Yıldırım ve ark. mekanik öğütme süresinin karbon nanotüp takviyeli Al matrisli kompozitlerin mikroyapı, sertlik ve kuru kayma aşınma davranışları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda öğütme süresinin artmasıyla partikül boyutlarının arttığını ve 120dk öğütme süresiyle en yüksek sertlik, en düşük ağırlık kaybının yaşandığını bildirmişlerdir [12]. Huang ve ark. partikül takviyeli Al 7056/Zr-Al-Ni-Cu metalik cam kompozitlerini farklı basınçlar altında spark plazma sinterleme yöntemiyle üretmişler ve ürettikleri kompozitlerin mekanik ve arayüzey karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yüklemeye basıncındaki artışın camsı matris ve Al alaşımlı takviyenin birbirine daha sıkı yapışmasına neden olduğunu ve arayüzeydeki oksit tabakasını tahrip ettiğini, bunun da iki fazlı arayüzeyin bağlanma mukavemetinde etkili bir artış sağladığını bildirmişlerdir [13]. Yang ve ark. farklı oranlarda Zn içeren TiB<sub>2</sub>/Al-Zn-Mg-Cu kompozitleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmiştir. Ayrıca yaşlanma sırasında çökeltilerin evrimini modellemek için KWN modeli tarafından genişletilen boyut sınıfı modeli kullanılmışlardır. Deneyler sonucunda alaşıma daha fazla Zn içeriğinin eklenmesinin ekstrüzyon sırasında oluşan arafazların fraksiyonunu arttırdığını ve yaşlanma sonrasında çökeltme tiplerini değiştirmediklerini bildirmişlerdir [14].

Martin ve arkadaşları ise, yaptıkları çalışmada T/M yöntemi kullanılmış Al-Zn-Mg-Cu alaşımına (Alumix 431 VP) farklı oranlarda Mg tozlarının ilavesinin sonrası oluşan yapının mikroyapı, faz ve sertlik etkileri incelemişlerdir. Çalışma hazır alüminyum yapısına ilave edilen Mg içeriği üzerine yapılmış olup, diğer alaşım elementlerinin etkisi incelenmemiştir [15]. Bu çalışmada; T/M yöntemi ile elementel olarak farklı oranlara sahip Al, Cu, Zn, Mg tozları, mekanik olarak 120 dakika öğütme işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında ise presleme ve sinterleme ile numuneler elde edilerek numunelere uygulanan yaşlandırma ısı işlemi, yapısal ve mekanik özelliklerde meydana getirdiği değişiklikler detaylı olarak incelenmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Çalışmada kullanılan Al tozları 50 µm, Cu tozları 70 µm, Mg tozları 40 µm ve Zn tozları ise 80 µm ortalama boyut dağılımına sahip olup, tozlar genel itibari ile 100 µm altındaki tozlar kullanılmıştır. Tozlar yüksek saflıkta olup, öğütme işlemi Alkol içerisinde Retsch PM 100 marka cihazda 120 dakika öğütme süresinde gerçekleştirilmiştir. Öğütme sonrası tozlar alkolden arındırılmış ve tozlarda herhangi bir kirlilikle karşılaşmamıştır. Toz bilye doluluk oranı ise 1/10 olup, çalışma sonrası elde edilen tozlar incelendiğinde istenilen öğütme şeklinin elde edildiği görülmüştür. Öğütme sonrası tozlar hidrolik preste 800 MPa presleme basıncı ve oda sıcaklığında presleme işlemine tabi tutulmuştur.

Ham mukavemete kavuşan numuneler (presleme sonrası mukavemet), sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi için Protherm marka sinterleme fırını kullanılmış olup, sinterleme işlemi 600 °C'de 120 dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Sinterleme süresi ön çalışmalar sonrası yoğunluk verileri mukayese edilerek tespit edilmiş olup, sinterleme sonrasında numuneler 480 °C'de 2 saat çözündürme işlemine tabi tutularak homojen bir çözündürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözündürülen numunelere, 120 °C yaşlandırma sıcaklığında 3'er saat süre ile toplamda 12 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Mikrosertlik işlemleri için Hardway marka DV-1AT-4.3 model cihaz kullanılmıştır. Sertlik deneyleri için her bir numuneden 5'er adet sertlik verisi alınarak, bu verilerin ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik grafikleri oluşturulurken hata barları oluşturulmuştur. Karıştırma, Öğütme, Sinterleme ve Yaşlandırma işlemleri Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği cihazların fotoğrafları ve deney akış şeması Şekil 1.'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Deneylerde kullanılan cihazlar ve deney akış şeması

Çalışmada kullanılan 2 farklı kompozisyon Tablo 1’de verilmiştir. Yapıda geleneksel Al 7075 malzemesinden farklı olarak (Zn:5.4, Cu:1.42, Mg:2.42) [16], yapıdaki element farklılıklarının mikroyapı ve yaşlanmaya olana etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

**Tablo 1.** Üretilen Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (%).

Numuneler	Al	Zn	Cu	Mg
1. Kompozisyon	86	10	2	2
2. Kompozisyon	89	2	5	4

Üretilen numunelerin mikroyapı analizinde Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), FESEM üzerine yer alan Element Dağılım Spektrometresi (EDS) ve Haritalama (MAP) analizlerinde ise ZEISS marka (SUPRA 40 VP model) cihaz kullanılmıştır. Mikroyapı analizlerinde Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarları ile İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarlarından faydalanılmıştır.

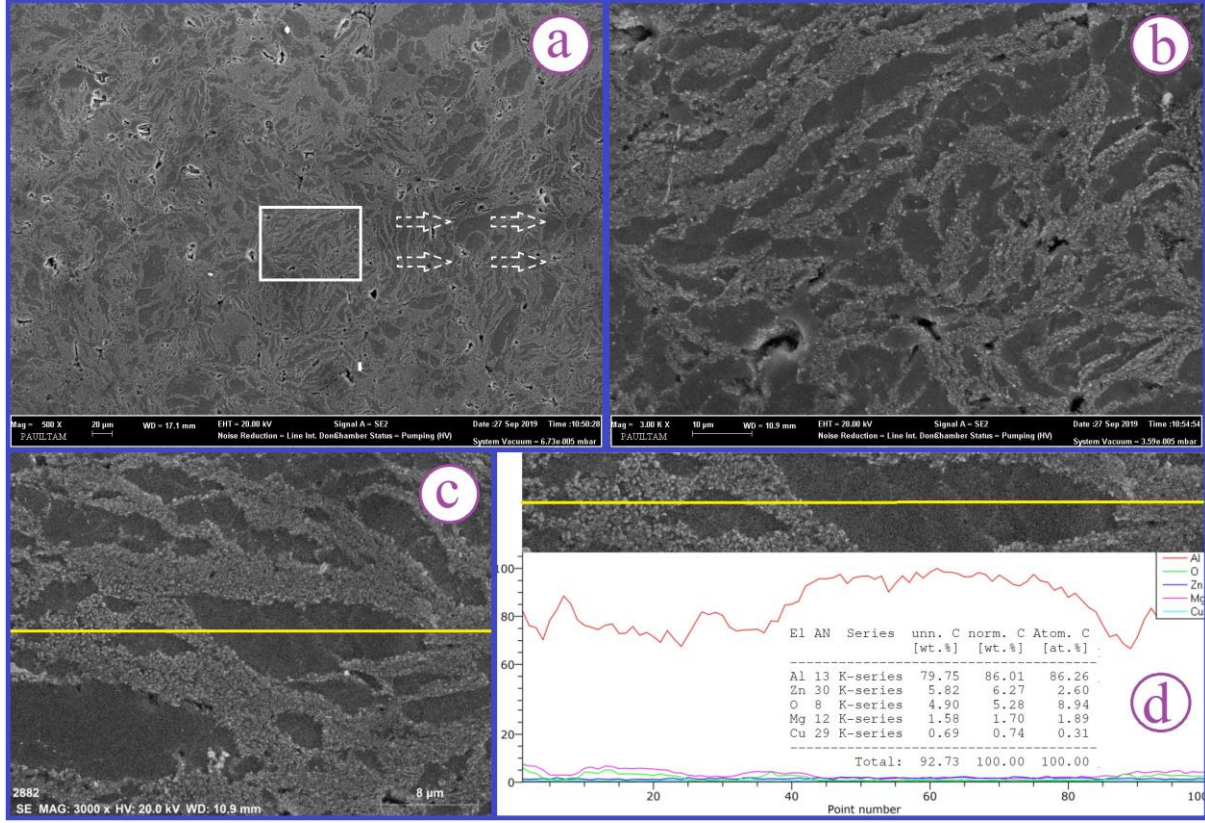
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1 Mikroyapı Analizi

Şekil 2’de 1. Kompozisyon oranına sahip alaşım sisteminin sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma ısıl işlemi sonrası FESEM görüntüleri (Şekil 2.a, 2.b) ile FESEM görüntüsü üzerinden alınmış çizgisel EDS analizi ve element dağılım oranları (Şekil 2.c, 2.d) yer almaktadır. Şekil 2.a ve 2.b’de farklı büyütme oranlarına sahip FESEM mikroyapıları görülmektedir. Bu görüntüler incelendiğinde, mekanik öğütme sonrası oluşan deforme olmuş tozların, sinterleme sonrası yeniden kristalleşerek, yeni taneleri oluşturmuştur. Şekil 2.b detaylı olarak incelendiğinde; oluşan bu yeni taneler görülebilmektedir. Oluşan yeniden kristalleşme ile çok daha homojen dağılımlı ve mekanik özellikleri iyileşmiş bir yapı elde edilebilecektir. Şekil 2.c’de EDS analizi için alınmış bir FESEM görüntüsü yer almakta olup, sarı çizgi bölgesi bu hat üzerinden analiz yapıldığını göstermektedir. Şekil 2.d’de ise; bu hattan elde edilen elementlerin şiddetleri ve oranları yer almaktadır. Şekil 2.d incelendiğinde; mikroyapıda sırasıyla, Al, Zn, O, Mg ve Cu elementlerinin yer aldığı görülmektedir. Bu yapıların ise ağırlıkça Al ve Zn fazına ait olduğu görülmektedir. Yapıda oluşan O’in ise, mekanik öğütme esnasında meydana gelen oksitlenmeden kaynaklandığı bilinmektedir [17]. 1. Kompozisyon ile oluşturulan bu alaşım sisteminin genel bir içerik

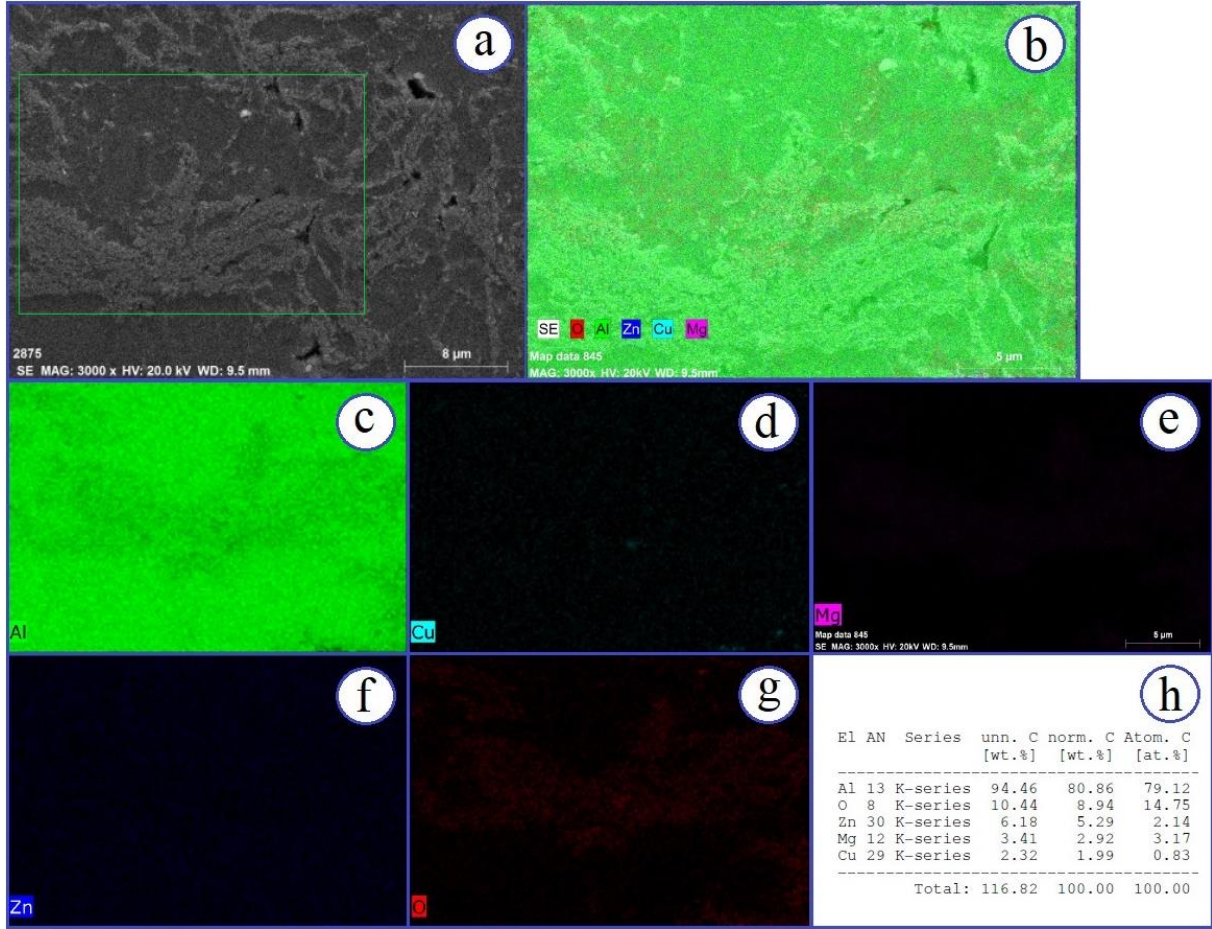


analizi yapıldığında, yapıda olması muhtemel içeriklerin yer aldığı görülmektedir (Tablo 1). Bu sonuç bize alaşım sistemi ile oluşturulmak istenen ticari alaşımda aktif rol oynayan alaşım elementlerinin varlığını gösterir niteliktedir [18].



Şekil 2. 1. Kompozisyon ile oluşturulmuş yapının sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma sonrası, a) FESEM (X500), b) FESEM (X3000), c) Çizgi EDS FESEM ve d) EDS kompozisyon dağılımları ve içerikleri

Şekil 2.b ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve elementlerin dağılım ve konumlarının daha detaylı analizi için Şekil 3'te yer alan HARİTA işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te 1. Kompozisyon oranına sahip alaşım sisteminin sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma ısıl işlemi sonrası FESEM görüntüsü (Şekil 3.a) yer almaktadır. Şekil 3.b'de FESEM görüntüsü üzerinden alınmış elementlerin genel haritası ve Şekil 3.c-g'de genel harita üzerinden alınmış her bir elementin ayrı ayrı haritaları yer almaktadır. Şekil 3.h'de ise element dağılım oranları yer almaktadır. HARİTA sonuçları yorumlandığında, yapının her bölgesinde homojen bir Al dağılımının yer aldığı görülebilmektedir (Şekil 3.c). Tane sınırlarında ise O içeriğinin dağıldığı ve yapıda öğütme sonrası oluşan çok küçük boyutlu taneler sayesinde mukavemetlendirme mekanizmasının içeriden oluşacak şekilde gerçekleştirilebileceği ve böylece çok daha mukavemetli bir yapının oluşabileceği bilinmektedir. Bu duruma ise; kararlı yapıda oluşmuş O çökeltilerinin tane sınırlarında konuşlanması ve yaşlanmada oluşan aşırı yaşlandırmanın bariyer etkisi oluşturması ile sağlanabilmektedir [19]. MA işlemi sonrası ise; yapıda dağılan ince yapı ve homojen dağılımlı oksit ve diğer alaşımlar sayesinde; çok daha yüksek mukavemetlendirme işlemi gerçekleştirilebilecek, böylece aşırı yaşlanma işlemi oluşacak büyük  $\theta'$  fazlarının oluşumu engellenebilecektir [20, 21]. Element dağılım oranları incelendiğinde (Şekil 3.h), çalışma ile oluşturulmak istenen kompozisyon içeriğindeki Al, Zn, Cu ve Mg'nin, yapıda istenilen oranlarda dağıtılabildiği görülebilmektedir.



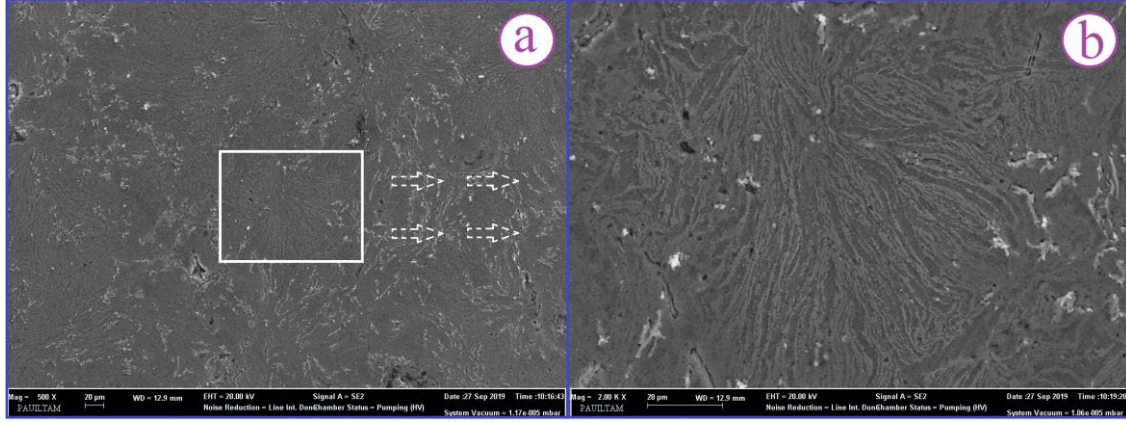
**Şekil 3.** 1. Kompozisyon ile oluşturulmuş yapının sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma sonrası, a) FESEM (Bölgesel HARİTA), b) Genel elementlerin HARİTA görüntüsü c-g) Her elementin HARİTA görüntüsü h) Elementlerin yüzde miktarları

Şekil 4'te 2. Kompozisyon oranına sahip numunenin sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma ısıl işlemleri sonrasında farklı büyütme ölçeklerindeki FESEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 4.b, Şekil 4.a görüntüsü üzerinden alınmış bir detay görüntü olup, bu görüntü oluşan mekanik öğütme sonrası oluşan katmanlaşmış tanelerin oluşumunu [2, 22] ve sinterleme ile oluşturdukları karakteristik mikroyapıyı göstermektedir. Görüntüde, çok ince dağılıma sahip mikroyapının sinterleme ile birlikte yeni bir form oluşturarak (yeniden kristalleşerek), lamelli bir form aldığı görülebilmektedir [23]. Bu mikroyapıyı detaylı olarak analiz etmek için; Şekil 5.a'da FESEM görüntüsü alınmış, Şekil 5.b'de ise FESEM görüntüsü üzerinden EDS verileri analiz edilmiştir. Şekil 5.b'de yapının genel element dağılımı incelendiğinde; yapıda olması muhtemel Al (ana faz), Mg, Cu ve Zn (alaşım elementleri) elementleri ve MA işlemi sonrası oluştuğu düşünülen O içerikleri yer almaktadır [17].

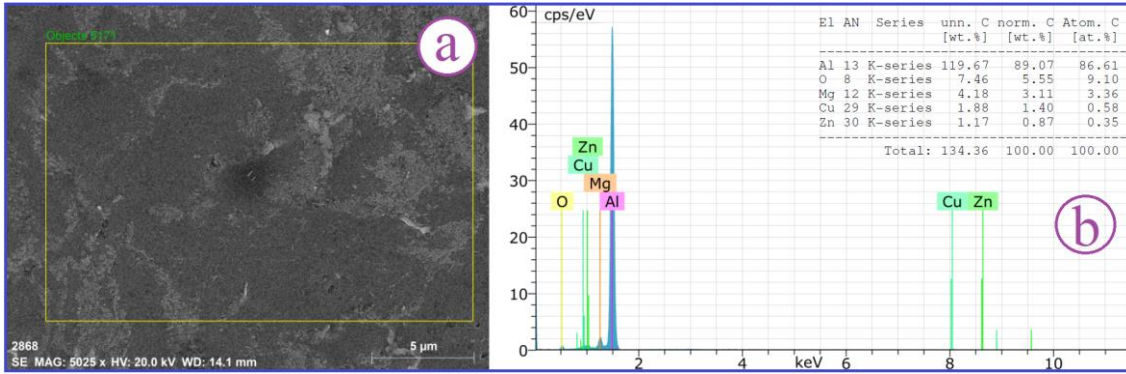
Şekil 6'da 2. Kompozisyon oranına sahip alaşımın, presleme, sinterleme, çözündürme ve sonrasında 3 saat yaşlandırma ısıl işlemi sonrası FESEM görüntüsü (Şekil 6.a) ve FESEM görüntüsü üzerinden alınmış çizgi analizi ve element dağılım oranları yer almaktadır. Şekil 6 detaylı incelendiğinde; öğütme işlemi neticesinde oluşan katmanlı yapının varlığı görülmektedir. Bu katmanlı yapının element şiddetleri incelendiğinde; kırmızı çizgi Al ana matris yapısını göstermekte olup, bölgesel olarak inişli çıkışlı bir salınım göstermektedir. Oluşan bu inişli çıkışlı yapının; tane sınırlarında yönlenmiş olan alaşım elementlerinin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle öğütme esnasında yapıda yer alan alaşım elementlerinin sahip oldukları kafes yapıları ve sertlikleri neticesinde, deformasyona uğrama oranları da farklılıklar göstermektedir. Bu da bu fazların yapı içerisinde lokal olarak belirli bölgelerde yoğunlaşmasına etki etmektedir. Ayrıca, sinterleme esnasında alaşım elementlerinin sahip oldukları farklı ergime dereceleri ve difüzyon katsayıları, elementlerin lokal olarak yönlenmesi sonucunu ortaya çıkarmıştır. Özellikle Mg olmak üzere, diğer elementlerin piklerinin bölgesel olarak homojen dağılımı,



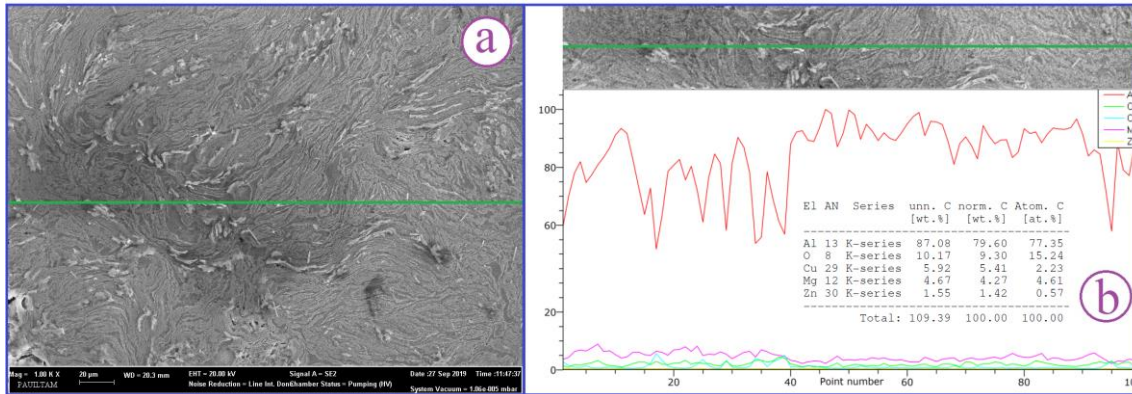
oluşturulmak istenen homojen dağılımın genel itibarı ile tane sınırlarında yönlendiği durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu durum malzemenin mekanik özelliklerine, normal üretim yöntemlerine göre (döküm vb.) daha iyi sonuçlar kazandırılabilceğini göstermektedir. Mekanik özelliklerin iyileşmesinde, yapıda oluşması muhtemel ve mekanik özellikleri olumlu etkileyen içeriden oluşturulmuş  $Al_2Cu$  [24],  $Al_2(Zn,Cu)_3Mg$  [15],  $MgZn_2$  [25] gibi ikincil fazların katkı sağlandığı bilinmektedir.



Şekil 4. 2. Kompozisyona ait numunenin sinterleme, çözeltiye alma ve 12 saat yaşlandırma işlemleri sonrası FESEM görüntüleri a) X500 büyütme, b) X 2000 Büyütme



Şekil 5. 2. Kompozisyona sahip alaşımın sinterleme sonrası a) FESEM görüntüsü, b) EDS analizi şiddetleri ve element dağılım oranları

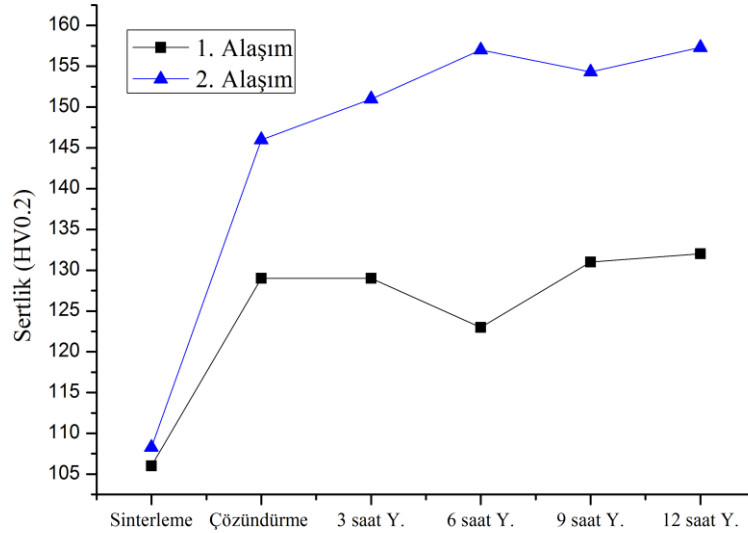


Şekil 6. 2. Kompozisyona sahip alaşımın sinterleme, çözüldürme ve 3 saat yaşlandırma işlemi sonrası a) FESEM görüntüsü, b) çizgisel EDS analizi ve element dağılım oranları



### 3.2 Mikrosertlik Deneyleri

Şekil 7’de T/M yöntemiyle üretilmiş iki Al alaşımının sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin sertliklerinin birbirine yakın sırasıyla 106 HV ve 108 HV olarak ölçülmüştür. Şekil 7 incelendiğinde iki alaşımda da çözündürme ve sonrası uygulanan yaşlandırma ısıl işlemleri ile sertlik değerlerinin dikkat çekici bir şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca 1. alaşımın çözündürme işlemi sonrası sertlik değerleri yaklaşık 130 HV civarındayken, 2. alaşımın sertlik değeri 146 HV’ye kadar yükselmiştir. Buna 2. alaşıma ilave edilen Cu oranının %5 olması ve Cu’nun tane mukavetlendirme mekanizmasında aktif rol oynaması neticesinde  $Al_2Cu$  gibi ikincil çökeltiler oluşturmasının sebep olduğu düşünülmektedir [26]. Ayrıca uygulanan ısıl işlemler sonrası yaşlandırma işlemleri, mikroyapıda yer alan Al, Zn, Mg ve Cu gibi alaşım elementlerinin çekirdeklenme mukavemetinde etken rol oynadığı bilinmektedir [27]. Bu alaşımlar için oluşması muhtemel fazlar ise;  $Al_2(Zn,Cu)_3Mg$  [15],  $MgZn_2$  [28],  $Mg(ZnCuAl)_2$  [29] ve  $Al_2Cu$  [5] gibi çekirdeklenme fazları olup, bu fazlar sertlik artışında tane sınırlarında çökerek etken rol oynamaktadır [30]. Her iki alaşımda da gerçekleşen sertlik artışları, malzemeye uygulanan sinterleme sonrası çözündürmenin ve yaşlandırmanın uygun şekilde yapıldığını göstermektedir. Yaşlandırma işlemiyle 1. alaşımın sertlik değerlerinde, 2. alaşımın sertliği kadar yüksek bir artışın olmayışı (2. Alaşımda sertlik 157 HV’ye kadar yükselmiştir), sertlik değerlerinde alaşım elementlerinin önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında; 2. Alaşımda yer alan Cu’nun, yaşlandırma ısıl işleminde sertlikte daha etken rol oynadığı söylenebilir.



Şekil 7. Alaşımların sinterleme, çözündürme ve 120 °C’de farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak sertlik değişimleri

### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

2 farklı kompozisyon ile Al (ana matris), Zn, Cu ve Mg elementleri ile oluşturulan kompozisyonlardan alınan görüntü ve sertlik ölçümleri neticesinde çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Çalışmada T/M yönteminin kullanılması ile istenilen bileşimde ve oranda denge koşulları oluşturulabilmiştir. Böylece yapıda alaşım elementi ilavesinin etkileri görülmüştür. Ayrıca yapıda tüm alaşım elementlerinin homojen bir şekilde dağılımı sağlanabilmiştir.
- Sinterleme ve yaşlandırma ısıl işlemleri sonrası numune yüzeylerinin FESEM görüntülerinde, numunelere uygulanan mekanik öğütme neticesinde meydana gelen katmanlı yapıların varlığı görülmüştür.
- Yapıya uygulanan mekanik öğütme sayesinde, EDS sonuçlarında alaşım elementlerinin homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. EDS analizlerinde homojen dağılmış elementlerin oluşması muhtemel  $Al_2(Zn,Cu)_3Mg$ ,  $MgZn_2$ ,  $Mg(ZnCuAl)_2$  ve  $Al_2Cu$  gibi ikincil fazların homojen dağılmasını sağlamıştır.

- Sertlik sonuçları incelendiğinde, çözündürme sonrası 2 alaşım sisteminde de sertlik artışı görülürken, yaşlandırma sonrası en yüksek sertlik verilerinin 2. alaşıma ait kompozisyonda olduğu görülmüştür.
- Çalışma 2. alaşımdaki sertlik artışını yapıda homojen dağılmış Cu ve ısıtma işlemleri sonrası oluşan ikincil fazların (Al<sub>2</sub>Cu gibi) sağladığını göstermektedir. Bu fazlar tane sınırlarında çökelmiş ve sertliği olumlu etkilemiş ve yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinde önemli bir etken olabileceği görülmüştür.
- Bu çalışmaya öneri olarak, alaşım element oranlarında yapılacak değişikliklerin tribolojik özelliklere etkisinin incelenmesi için aşınma deneyleri yapılması önerilmektedir. Böylece elementlerin aşınma davranışı üzerindeki etkisi doğrudan görülebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Tan E., Aksöz S., Kaplan Y., Can H., Dışpınar D. (2019). Improvement in Metallurgical Properties of Gravity Die Cast 2024-T6 Aluminum Alloy via Cryogenic Process. In: Tiryakioğlu M., Griffiths W., Jolly M. (eds) Shape Casting. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham,
- [2] Aksöz S., Özdemir A.T., Bostan B. Alloyed AA2014 Alüminium Powders Synthesized with carbon and determined properties. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27(109-115), (2012).
- [3] Aksöz S., Bostan B. Effects of the AA2014/B4C MMCs production with casting and post casting sintering operations on wear behaviors, Journal of Boron, 3(132-137), (2018).
- [4] Aksöz S., Bostan B. Effect of ageing and cryo-ageing treatments on microstructure and hardness properties of AA2014-SiC MMCs, Transactions of the Indian Institute of Metals, 71(2035-2042), (2018).
- [5] Aksöz S., Özdemir A.T., Çalin R., Altınok Z. and Bostan B. Effects of sintering, ageing and cryogenic treatments on structural and mechanical properties of AA2014-B4C composite. J. of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (4) 831-839, (2013).
- [6] Tan E., Kaplan Y., Ada H. and Aksöz S., (2019). Production of the AA2196-TiB<sub>2</sub> MMCs via PM Technology, Chesonis C. (eds), Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series, Springer, Cham. 153-157
- [7] Contreras A., Angeles-Chávez C., Flores O., Perez R. Structural, morphological and interfacial characterization of Al-Mg/TiC composites”, Materials Characterization, 58(685–693), (2007).
- [8] Panigrahi S.K., Jayaganthan R. Development of ultrafine grained high strength age hardenable Al 7075 alloy by cryorolling. Materials and Design, 32: 3150-3160, (2011).
- [9] Li J.F., Peng Z.W., Li C.X., Jia Z.Q., Chen W.J., Zheng Z.Q. Mechanical properties, corrosion behaviors, and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatment”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 18(775-762), (2008).
- [10] J Harrison T., R Crawford B., Janardhana M., Clark G. Differing microstructural properties of 7075-T6sheet and 7075-T651extrudedaluminium alloy. Procedia Engineering, 10(3117–3121), (2011).
- [11] Taşkesen A., Aksöz S., Özdemir A.T. The effect of cryogenic treatment on ageing behaviour of B4C reinforced 7075 aluminium composites, Kovove Mater., 55(57-67), (2017).
- [12] Yildirim M., Özyürek D., Gürü M. Effect of milling time on dry sliding wear behaviors of carbon nanotubes reinforced Al matrix composites. Journal of nanoscience and nanotechnology, 20(2633-2638), (2020).
- [13] Huang L., Tan W., Li S., Li Y. Effect of loading pressure on mechanical properties and interface characteristics of 7056 Al alloy particle reinforced Zr-Al-Ni-Cu bulk metallic glass matrix composite prepared by spark plasma sintering. Journal of Alloys and Compounds, 816, 152605. (2020).

- [14] Yang Q., Shen Y., Liu J., Wang L., Chen Z., Wang M.L., Wang H.W. Microstructure and mechanical response of TiB<sub>2</sub>/Al–Zn–Mg–Cu composites with more addition of Zn. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, 152584. (2020).
- [15] Martín J.M., Gómez-Acebo T., Castro F. Sintering behaviour and mechanical properties of PM Al–Zn–Mg–Cu alloy containing elemental Mg additions. *Powder Metallurgy*, 45(173-180), (2002).
- [16] Baradeswaran A., Perumal A.E., Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites, *Composites: Part B*, 54(146–152), (2013).
- [17] Suryanarayana C., Mechanical alloying and milling”, *Progress in Materials Science* 46(1-184), (2001).
- [18] Baradeswaran A., Elaya Perumal A., “Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/graphite hybrid composites”, *Composites: Part B*, 56(464–471), (2014).
- [19] Barbour J.C., Knapp J.A., Follstaedt D.M., Myers S.M., (1998). Process for The Synthesis of Nanophase Dispersion Strengthened Aluminum Alloy, United States Patent, Patent Number: 5,849,373, Date of Patent: Dec. 15,
- [20] Heck F.W., Ramsey N.J., Donachie S.J., Windsor N., Merrick H.F., Suffern N.Y. (1986). DISPERSION STRENGTHENED LOW DENSITY MA-AL. United States Patent, Patent Number: 4,594,222, Date of Patent: Jun. 10,
- [21] Hoyt J.J. On the coarsening of precipitates located on grain boundaries and dislocations. *Acta Metallurgica et Materialia*, 39(2091-2098), (1991).
- [22] Enayati M.H., Salehi M., Formation mechanism of Fe<sub>3</sub>Al and FeAl intermetallic compounds during mechanical alloying, *Journal of Materials Science*, 40(3933–3938), (2005).
- [23] Bououdina M., Guo Z.X. Comparative study of mechanical alloying of (Mg<sub>1</sub>Al) and (Mg<sub>1</sub>Al<sub>1</sub>Ni) mixtures for hydrogen storage” *Journal of Alloys and Compounds*, 336(222–231), (2002).
- [24] Hsu C.J., Kao P.W., Ho N.J. Ultrafine-grained Al–Al<sub>2</sub>Cu composite produced in situ by friction stir processing. *Scripta Materialia* 53(341–345), (2005).
- [25] Lumley R.N., Schaffer G.B. Precipitation induced densification in a sintered Al–Zn–Mg–Cu alloy. *Scripta Materialia* 55(207–210), (2006).
- [26] Yıldırım M., Özyürek D., Gürü M. The Effects of Precipitate Size on the Hardness and Wear Behaviors of Aged 7075 Aluminum Alloys Produced by Powder Metallurgy Route. *Arab J Sci Eng*, 41(4273–4281), (2016).
- [27] Özyürek D., Yılmaz, R., Kibar, E. The effect of retrogression parameters in RRA treatment on tensile of 7075 aluminium alloys. *J. Fac. Eng. Archit. Gaz. Univ.* 27(193–203), (2012).
- [28] Isadere A.D., Aremo, B., Adeoye, M.O., Olawale, O.J., Shittu, M.D. Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy. *Mater. Res.* 16(190–194), (2013).
- [29] Reda Y., Karim, R.A., Elmahallawi, I. Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging. *Mater. Sci. Eng. A* 485(468–475), (2008).
- [30] Fakioglu A.; Özyürek, D.; Yılmaz, R., Effects of different heat treatment conditions on fatigue behavior of AA7075 alloy. *High Temp. Mater. Process.* 32(345–351), (2012).

## Experimental Efficiency Comparison of Worm Gear Mechanism and Newly Designed Ball Worm Gear Mechanism

 Sait KOÇAK<sup>1\*</sup>  Yavuz KAPLAN<sup>2</sup>  Ali Tekin GÜNER<sup>3</sup> 
<sup>1</sup>Pamukkale University Faculty of Technology, Mechatronics Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>2</sup>Pamukkale University, Faculty of Technology, Mechanical Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>3</sup>Pamukkale University, Faculty of Technology, Biomedical Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 28/11/2019

Revision 27/01/2020

Accepted: 08/02/2020

#### Highlights

- Worm gear mechanism
- Ball worm gear
- Gear Efficiency

#### Keywords

 Worm Gear  
 Ball Worm Gear  
 Gear Efficiency  
 Gear Box

In this study, the efficiencies of the newly designed ball worm gear mechanism and the traditional worm gear mechanism are compared experimentally within the test apparatus capacity and under same conditions. Results showed that, the efficiency of both mechanisms increases with increasing brake torque and under constant speed and brake torque, the ball worm gear mechanism showed higher efficiency than the worm gear mechanism.

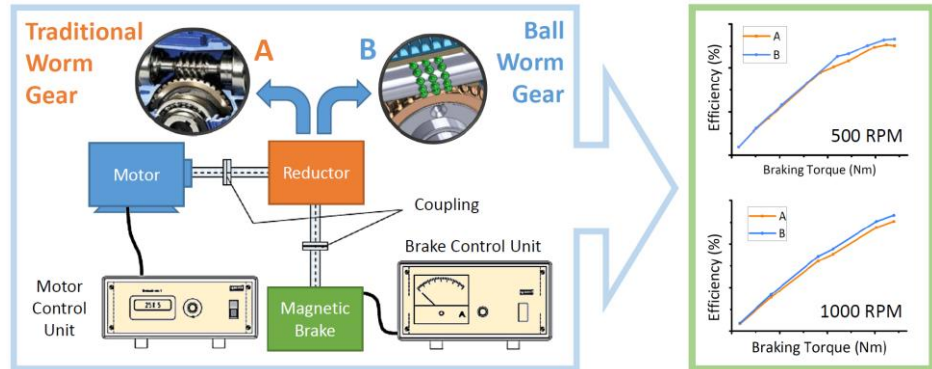


Figure A. Experimental setup and results

**Purpose:** The main purpose of this study is to make a comparison of the newly designed ball worm gear mechanism and conventional worm gear mechanism experimentally.

**Theory and Methods:** In conventional worm gear mechanism, movement is transmitted by sliding. This makes the mechanism less efficient. Rolling friction is lower than sliding friction, therefore, a new mechanism is designed and manufactured that, the contacts between the teeth are provided by balls. Then, the efficiency of the mechanisms with the same dimensional features and lubrication condition was compared with the gear efficiency determination test apparatus.

**Results:** The results have shown that the efficiency of both mechanisms increases with increasing brake torque at a constant speed and the ball worm gear mechanism showed higher efficiency than the conventional worm gear mechanism under constant speed and brake torque.

**Conclusion:** It seems that the newly designed ball worm gear mechanism has higher efficiency than the old type worm gear mechanism due to the sliding friction between the teeth in the old mechanism and the rolling and sliding friction in the new mechanism. Thanks to the rolling friction of the new mechanism, it is expected to eliminate the disadvantages of the worm gear mechanisms.

This study was carried out within the load capacity of the testing apparatus. Future studies focused on determining the maximum load capacity and efficiency at this load, working life and design parameters of the ball worm gear mechanisms could possibly give more useful information.



## Sonsuz Vida Mekanizması ile Yeni Tasarlanan Bilyeli Sonsuz Vida Mekanizmasının Verimlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması

Sait KOÇAK<sup>1\*</sup> Yavuz KAPLAN<sup>2</sup> Ali Tekin GÜNER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>2</sup>Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

<sup>3</sup>Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

### Öz

Sonsuz vida mekanizmaları çok küçük hacimlerde çok yüksek çevrim oranlarında güç iletebilen mekanizmalardır. Ancak diğer dişli çark mekanizmaları ile kıyaslandıklarında çok düşük verimlere sahiptirler. Ayrıca hareket dişler üzerinden kayarak iletiildiği için aşınma ve ısınma problemleri vardır. Diğer taraftan aşınma sebebiyle karşılık dişlisinin imalatında kullanılan bronz pahalı bir malzemedir. Sonsuz vida mekanizmalarının dezavantajlarını ortadan kaldırmak için sonsuz vida ile karşılık dişlisi arasındaki teması bilye tanelerinin sağladığı çeşitli tasarımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada aynı boy ve çevrim oranlarına sahip ve aynı yağlama koşullarında sonsuz vida redüktör ile yeni tasarlanan bilyeli sonsuz vida redüktörün verimleri, dişli verimliliği belirleme deney düzeneğinde deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda sabit devirde frenleme momentinin artmasıyla her iki mekanizmanın da verimlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sabit devir ve frenleme momenti altında bilyeli sonsuz vida mekanizması geleneksel sonsuz vida mekanizmasına göre daha yüksek verim sergilemiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 28/11/2019  
Düzeltilme: 27/01/2020  
Kabul: 08/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Sonsuz Vida Mekanizması  
Bilyeli Sonsuz Vida  
Mekanizması  
Dişli Verimliliği  
Dişli Kutusu

### Keywords

Worm Gear Mechanism  
Ball Worm Gear  
Mechanism  
Gear Efficiency  
Gear Box

## Experimental Efficiency Comparison of Worm Gear Mechanism and Newly Designed Ball Worm Gear Mechanism

### Abstract

Worm gear mechanism transmits power in very small volumes at very high gear ratios. However, their efficiency is very low compared with other gear mechanisms. They have also wear and overheating problems because of force transmission with sliding. On the other hand, bronze is an expensive material used in the manufacture of the worm wheel due to wear. Various designs, that provides the contact between the worm gear and the worm wheel by balls have been developed to eliminate the disadvantages of worm gear mechanisms. In this study, the efficiency of the conventional worm gear mechanism and newly designed ball worm gear mechanism which have the same gear ratio and same center distance have been compared experimentally under the same lubrication conditions. Results showed that the efficiency of both mechanisms increases with increasing brake torque at a constant speed. In addition, under constant speed and brake torque, the ball worm gear mechanism showed higher efficiency than the worm gear mechanism.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sonsuz vidalı redüktörler, birbirine dik eksenlerde hareket ve kuvvet iletebilen dişli çark mekanizmalarıdır. Diğer dişli çark gruplarından oluşan redüktörlere göre daha yüksek çevrim oranlarına sahiptirler. Diğer redüktörlerle birkaç kademede elde edilecek olan çevrim oranları sonsuz vida mekanizması sayesinde tek kademede elde edilebilmektedir. Böylelikle daha az yer tutan, daha hafif ve daha ucuz konstrüksiyonlar tasarlanabilmektedir [1,2].

Sonsuz vida mekanizmalarında kuvvet kayma ile iletilir. Bu durum genellikle bronzdan yapılan karşılık dişlisinin çabuk aşınmasına ve mekanizmanın yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkmasına sebebiyet vermektedir [3,4]. Ayrıca kuvvetin kayma ile iletilmesi sonsuz vida mekanizmasının diğer dişli çark mekanizmalarına göre daha düşük verimli olmalarına neden olmaktadır.

Sonsuz vida mekanizmalarının dezavantajları olan düşük verim, çabuk aşınma, yüksek maliyet ve yüksek çalışma sıcaklığı problemlerini ortadan kaldırmak için yeni mekanizmalar geliştirilmeye çalışılmıştır. Yeni tasarlanan mekanizmalarda bilyeli millerden esinlenilmiştir. Bilyeli millerde vida ve somun arasındaki teması bilye taneleri sağlamaktadır. Böylelikle vida ve somun arasındaki sürtünme kuvvetleri düşülmektedir.

Wahlberg ve arkadaşları “Ball-bearing worm gear” isimindeki mekanizmayı 1945 yılında [5], Sedgwick ve ark. “Recirculating ball worm drive” isimindeki ilk mekanizmayı 1968 yılında [6], Tong “Self-Retaining Recirculating Ball-Worm and Gear Device” isimindeki mekanizmayı 2004 yılında tasarlamışlar ve patent almışlardır [7]. Stoianovici ve ark. “Ball- Worm Transmission” ismini verdikleri mekanizmayı 2006 yılında tasarlamışlardır [8]. Tasarlanan mekanizmalarda sonsuz vida ve karşılık dişlisi arasındaki teması bilye taneleri sağlamaktadır. Bilye taneleri bilyeli vidalardaki gibi bir hat boyunca yuvarlanma hareketi yapmaktadırlar. Yukarıdaki çalışmalarda farklı tasarım yöntemleri ile bilyelerin sirkülasyon hareketi yapmaları sağlanmıştır.

Koçak “Bilyeli sonsuz vida mekanizması” isimindeki mekanizmayı 2014 yılında tasarlamıştır. Tasarlanan mekanizmada bilye taneleri sonsuz vida üzerindeki yarım küre oyuklara yerleştirilmiştir. Böylelikle bilye taneleri sonsuz vida üzerinde yuvarlanarak kayma, karşılık dişlisi üzerinde yuvarlanarak ilerleme hareketi yapmaktadır [9,10].

Enerji üretiminin pahalılığı hayatımızın her alanında enerji tasarrufunu daha da önemli hale getirmektedir [11-14]. Günümüzde elektrik ve petrol kaynaklı yakıt sarfiyatının ciddi boyutta gider oluşturması, araştırmacıları dişli kutularının verimleri üzerinde araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Üstelik sadece elektrik ve yakıt giderleri değil aynı zamanda çevreci politikalarda bu araştırmaları gerekli kılmıştır. Literatürde diğer dişlilerden oluşan (örn. düz dişli, helis dişli vb.) redüktörlerin verimlerinin teorik [15-19] ve deneysel [19-21] olarak belirlenmesine yönelik birçok çalışma mevcuttur. Ancak sonsuz vida mekanizmasına alternatif olarak tasarlanan mekanizmaların verimlerinin saptanmasına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada Koçak tarafından tasarlanan bilyeli sonsuz vida mekanizması [9] ile piyasa şartlarında hazır bulunun sonsuz vida mekanizmasının verimleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel dişli verimliliği belirleme cihazı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. MALZEME ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Deneysel çalışmalarda eksenler arası mesafeleri ve çevrim oranları eşit olan sonsuz vida mekanizması ile bilyeli sonsuz vida mekanizması kullanılmıştır. Sonsuz vida ve bilyeli sonsuz vida mekanizmalarının boyutları Tablo 1’de verilmektedir.

**Tablo 1.** Mekanizmaların boyutsal özellikleri

Verilenler	Sonsuz Vida	Bilyeli Sonsuz Vida
Modül ( $m_{x1}$ ), Adım ( $p_a$ )	$m_{x1} = 4$ mm	$p_a = 13$ mm
Eksenler Arası Mesafe ( $a$ )	$a = 80$ mm	$a = 80$ mm
Diş Sayıları ( $z_1, z_2$ )	$z_1 = 1, z_2 = 30$	$z_1 = 1, z_2 = 30$

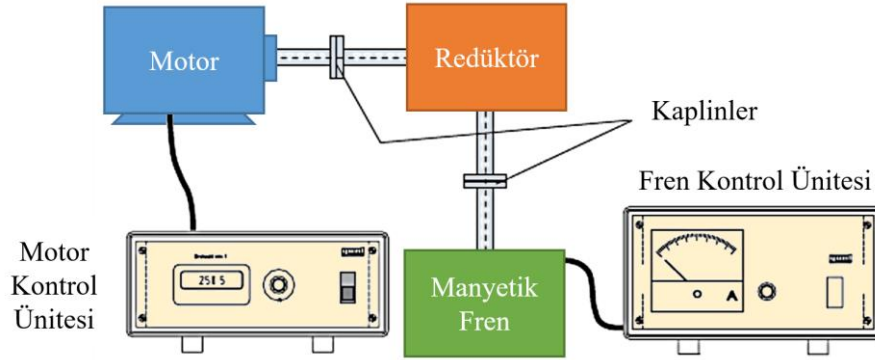
Sonsuz vida mekanizması olarak piyasa şartlarında hazır bulunan 80 gövde bir redüktör kullanılırken bilyeli sonsuz vida mekanizması özel olarak imal edilmiştir. Sonsuz vida ve karşılık dişlisinin malzemeleri Tablo 2’de verilmektedir.

**Tablo 2.** Mekanizmada kullanılan elemanların malzemeleri

Elemanlar	Sonsuz Vida Mekanizması	Bilyeli Sonsuz Vida Mekanizması
Sonsuz Vida	Sementasyon Çeliği (SAE 8620)	Sementasyon Çeliği (SAE 8620)
Karşılık Dişlisi	Bronz Alaşımı (Gz12SnCuNi)	Sementasyon Çeliği (SAE 8620)
Bilye	-	Rulman Çeliği (SAE 52100)

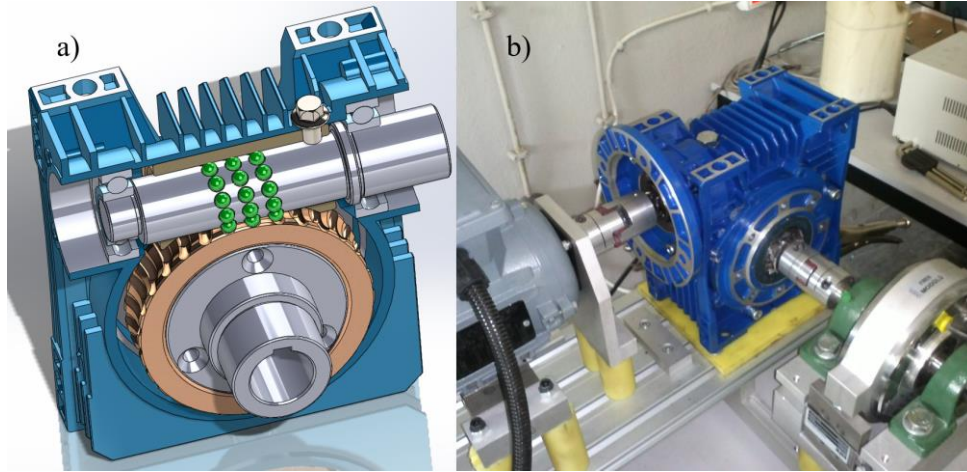


Deneyler dişli verimliliği belirleme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin çalışma prensibi; dişli çark mekanizmalarının verimini kuvvet, moment ve mil dönüş hızı gibi teorik büyüklüklere dayanarak belirlenmesine yöneliktir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1’ de verilmektedir. Deney düzeneğinde elektrik motoru, motor kontrol ünitesindeki hız potansiyometresi aracılığıyla farklı devir sayılarında döndürülmesi sağlanır. Dişli çark mekanizmasının çıkış ucuna yükleme işini simüle etmek için tozlu tip manyetik fren mekanizması yerleştirilmiştir. Fren sistemine yerleştirilen hassas kuvvet sensörü aracılığıyla çıkış momenti hesaplanabilmektedir. Giriş momenti ise tahrik motorunun altına yerleştirilen kuvvet sensörü aracılığıyla hesaplanmaktadır. Tahrik motorunun devri sisteme yerleştirilen devir sensörü aracılığıyla hesaplanmaktadır.



**Şekil 1.** Dişli verimliliği belirleme deney düzeneği

Bilyeli sonsuz vida mekanizması sonsuz vida mekanizması ile aynı redüktör gövdesi içine yerleştirilmiştir. Redüktör gövdesinin iç kısımlarında gerekli boşaltmalar yapılmıştır. Bilyeli sonsuz vida mekanizmasının tasarım ve boyutlandırılması ile ilgili detaylar bir önceki çalışmada verilmiştir [9]. Tasarlanan bilyeli sonsuz vida mekanizmasının kesit görünümü ve imal edilen mekanizmanın deney düzeneğine bağlanmış hali Şekil 2’de gösterilmektedir. Her iki mekanizmanın yağlanmasında da sentetik VG 220 yağ kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Bilyeli sonsuz vida, a) tasarımının kesit görünümü ve b) deney düzeneğine bağlanmış hali

Redüktörlerin verim analizinde girişte verilen mekanik güç ile çıkışta alınan mekanik gücün karşılaştırılması yapılmaktadır. Deney düzeneğinden elde edilen veriler aşağıda verilen denklemler aracılığı ile hesaplanarak giriş-çıkış mekanik güçleri elde edilmekte ve verim hesaplanmaktadır.

Reaksiyon (giriş) momenti:

$$M_1 = F_1 \cdot l_1 (Nm)$$



Giriş açısal hızı:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} (\text{rad/s}) \quad 2$$

Giriş gücü:

$$P_1 = M_1 \cdot \omega_1 (W) \quad 3$$

Çıkış açısal hızı:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} \rightarrow \omega_2 = \frac{\omega_1}{i} (\text{rad/s}) \quad 4$$

Frenleme (çıkış) Momenti:

$$M_2 = F_2 \cdot l_2 (Nm) \quad 5$$

Çıkış gücü:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 (W) \quad 6$$

Verim:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} (\%) \quad 7$$

Sonsuz vida mekanizması ile bilyeli sonsuz vida mekanizmasının verimleri farklı devir ve farklı frenleme momentleri için elde edilmiştir. Redüktörlerin verim analizinde; 500 min<sup>-1</sup> ve 1000 min<sup>-1</sup> sabit dönme hızlarında reaksiyon kuvvetini 1'er Newton artıracak şekilde fren kuvveti artırılmış ve sabit devirde farklı fren yüklerindeki verimler hesaplanmıştır. Hesaplamalar denklem (1)'den denklem (7)'ye kadar olan bağlantılar aracılığı ile yapılmıştır.

80 gövde sonsuz vida redüktörün 500 min<sup>-1</sup> da deneysel verim analizi Tablo 3'de 1000 min<sup>-1</sup> de verim analizi Tablo 4'de verilmektedir.

**Tablo 3.** 80 gövde sonsuz vida redüktörün 500 min<sup>-1</sup> de verim analizi

Reaksiyon Kuvveti (N)	MMK* (m)	Reaksiyon Torku (Nm)	$\omega_1$ (Rad/s)	Fren Kuvveti (N)	FMK* (m)	Fren Torku (Nm)	Giriş Gücü (P <sub>1</sub> )	Çıkış Gücü (P <sub>2</sub> )	Verim (%)
10	0,075	0,750	52,3	5	0,085	0,42	39,225	0,739	1,9
11	0,075	0,825	52,3	16	0,085	1,36	43,147	2,366	5,5
12	0,075	0,900	52,3	27	0,085	2,29	47,070	3,993	8,5
13	0,075	0,975	52,3	65	0,085	5,52	50,992	9,613	18,9
14	0,075	1,050	52,3	75	0,085	6,37	54,915	11,092	20,2
15	0,075	1,125	52,3	86	0,085	7,31	58,837	12,719	21,6
16	0,075	1,200	52,3	105	0,085	8,92	62,760	15,529	24,7
17	0,075	1,275	52,3	114	0,085	9,69	66,682	16,860	25,3
18	0,075	1,350	52,3	120	0,085	10,2	70,605	17,748	25,1

MMK: Motor tork kolu

FMK: Fren tork kolu

**Tablo 4.** 80 gövde sonsuz vida redüktörün 1000 min<sup>-1</sup> de verim analizi

Reaksiyon Kuvveti (N)	MMK* (m)	Reaksiyon Torku (Nm)	$\square_1$ (Rad/s)	Fren Kuvveti (N)	FMK* (m)	Fren Torku (Nm)	Giriş Gücü (P <sub>1</sub> )	Çıkış Gücü (P <sub>2</sub> )	Verim (%)
13	0,075	0,975	104,71	6	0,085	0,51	102,092	1,779	1,7
14	0,075	1,050	104,71	29	0,085	2,465	109,945	8,603	7,8
15	0,075	1,125	104,71	64	0,085	5,44	117,799	18,985	16,1
16	0,075	1,200	104,71	75	0,085	6,375	125,652	22,249	17,7
17	0,075	1,275	104,71	107	0,085	9,095	133,505	31,742	23,8
18	0,075	1,350	104,71	120	0,085	10,2	141,358	35,598	25,2

Deneyler esnasında frenleme kuvveti manyetik fren bölümünde yer alan yük hücresi tarafından, reaksiyon kuvveti ise motor tarafında yer alan yük hücresi tarafından sürekli olarak ölçülmüştür. Manyetik frenin akımı kademe kademe reaksiyon kuvvetini birer Newton artıracak şekilde yükseltilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'deki veriler incelendiğinde sonsuz vida mekanizması için frenleme kuvveti arttıkça verimlerde artış meydana gelmiştir. Devrin değişmesiyle verimde ciddi manada bir değişiklik meydana gelmemiştir.

80 gövde bilyeli sonsuz vida redüktörün 500 min<sup>-1</sup> da deneysel verim analizi Tablo 5'de 1000 min<sup>-1</sup> de verim analizi Tablo 6'da verilmektedir.

**Tablo 5.** 80 gövde bilyeli sonsuz vida redüktörün 500 min<sup>-1</sup> de verim analizi

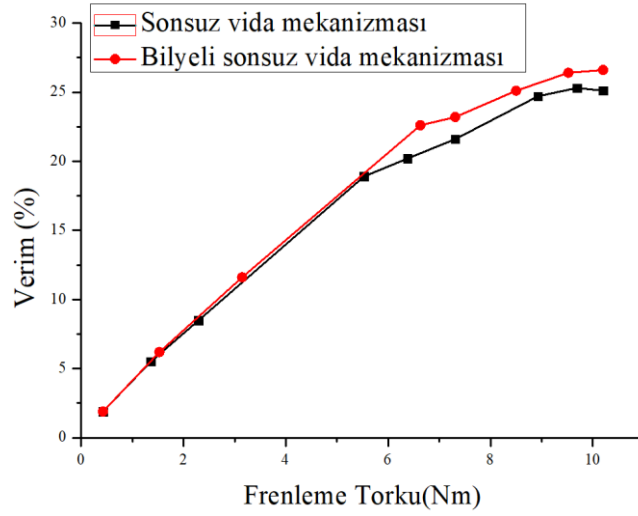
Reaksiyon Kuvveti (N)	MMK* (m)	Reaksiyon Torku (Nm)	$\square_1$ (Rad/s)	Fren Kuvveti (N)	FMK* (m)	Fren Torku (Nm)	Giriş Gücü (P <sub>1</sub> )	Çıkış Gücü (P <sub>2</sub> )	Verim (%)
10	0,075	0,750	52,3	5	0,085	0,425	39,225	0,739	1,9
11	0,075	0,825	52,3	18	0,085	1,53	43,147	2,662	6,2
12	0,075	0,900	52,3	37	0,085	3,145	47,070	5,472	11,6
13	0,075	0,975	52,3	78	0,085	6,63	50,992	11,536	22,6
14	0,075	1,050	52,3	86	0,085	7,31	54,915	12,719	23,2
15	0,075	1,125	52,3	100	0,085	8,5	58,837	14,790	25,1
16	0,075	1,200	52,3	112	0,085	9,52	62,760	16,565	26,4
17	0,075	1,275	52,3	120	0,085	10,2	66,682	17,748	26,6

**Tablo 6.** 80 gövde bilyeli sonsuz vida redüktörün 1000 min<sup>-1</sup> de verim analizi

Reaksiyon Kuvveti (N)	MMK* (m)	Reaksiyon Torku (Nm)	$\square_1$ (Rad/s)	Fren Kuvveti (N)	FMK* (m)	Fren Torku (Nm)	Giriş Gücü (P <sub>1</sub> )	Çıkış Gücü (P <sub>2</sub> )	Verim (%)
12	0,075	0,900	52,3	6	0,085	0,510	47,070	0,887	1,9
13	0,075	0,975	52,3	29	0,085	2,465	50,992	4,289	8,4
14	0,075	1,050	52,3	64	0,085	5,440	54,915	9,465	17,2
15	0,075	1,125	52,3	75	0,085	6,375	58,837	11,092	18,9
16	0,075	1,200	52,3	107	0,085	9,095	62,760	15,825	25,2
17	0,075	1,275	52,3	120	0,085	10,200	66,682	17,748	26,6

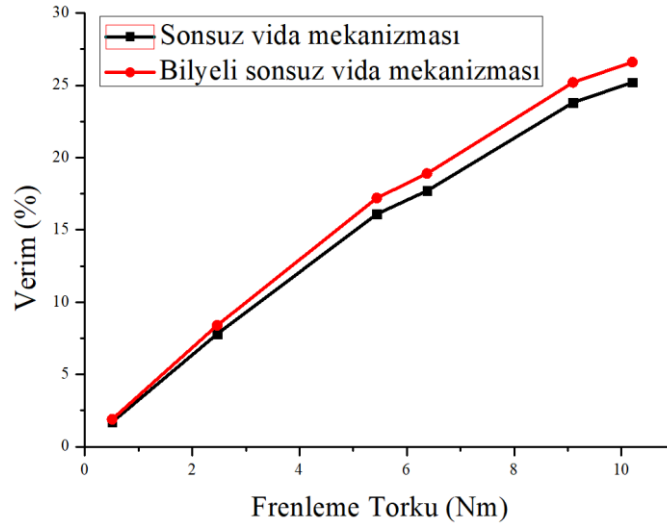
Tablo 5 ve Tablo 6'daki veriler incelendiğinde bilyeli sonsuz vida mekanizması için frenleme kuvveti arttıkça verimde artış meydana gelmiştir. Bilyeli sonsuz vida mekanizmasında da devrin değişmesiyle verimde ciddi manada bir değişiklik meydana gelmemiştir.

Her iki redüktörün de 500 min<sup>-1</sup> sabit devirde frenleme momentinin değişmesiyle verimlerinde meydana gelen değişiklik Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 500 min<sup>-1</sup> devirde verim karşılaştırılması

Redüktörlerin 1000 min<sup>-1</sup> sabit devirde frenleme momentinin değişmesiyle verimlerinde meydana gelen değişiklik Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. 1000 min<sup>-1</sup> devirde verim karşılaştırılması

Şekil 3 ve 4’deki grafikler incelendiğinde frenleme momentinin artmasıyla her iki mekanizmanın verimlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Hem 500 min<sup>-1</sup> hem de 1000 min<sup>-1</sup> devirde bilyeli sonsuz vida mekanizması sonsuz vida mekanizmasına nazaran daha yüksek verim sergilemiştir. Devir artışının mekanizmaların verimine olumlu ya da olumsuz bir etkisi olmamıştır.

Dişli verimliliği deney düzeneğinde yapılan verim analizlerinde eski tip sonsuz vida mekanizmasının verimi 500 – 1000 min<sup>-1</sup> sabit devir aralığında yaklaşık olarak % 25 civarında bulunmuştur. Bilyeli sonsuz vida mekanizmasının verim aralığı ise yaklaşık % 26,5 civarındadır. Normal şartlarda yapılan teorik hesaplarda 80 gövde sonsuz vida redüktörün verimi tam kapasitede % 80 civarındadır. Deney düzeneğindeki giriş ve çıkış momentlerinin küçük olması sonsuz vida redüktörün verimini düşük çıkarmıştır. Ancak deney düzeneğinin maksimum kapasitesinde (10,2 Nm frenleme momentinde) yapılan teorik hesaplarda 500 min<sup>-1</sup> sabit devri için verim % 24, 1000 sabit devri için ise % 22 çıkmıştır. Bu değerler yaklaşık % 1,5’ lik bir sapmayla deney düzeneğinin doğru sonuçları verdiğini göstermektedir. Bu

kriter referans alınarak deney düzeneği kapasitesindeki sonuçlar değerlendirilecek olursa; yeni tasarlanan bilyeli sonsuz vida mekanizması çeyrek kapasitede % 1,5' lik bir verim artışı meydana getirmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada piyasa şartlarında hazır bulunan sonsuz vida mekanizması ile yeni tasarlanan bilyeli sonsuz vida mekanizmasının verimleri deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Mekanizmaların eksenler arası mesafesi, çevrim oranları ve yağlama şartları aynıdır.

Elde edilen sonuçlar yeni tasarlanan bilyeli sonsuz vida mekanizmasının eski tip sonsuz vida mekanizmasına nazaran daha yüksek verime sahip olacağını göstermektedir. Bu durumun eski mekanizmada dişler arasında kayma sürtünmesinin yerini yeni mekanizmada yuvarlanma sürtünmesine bırakmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilyeli sonsuz vida mekanizmalarının sahip oldukları yuvarlanma sürtünmeleri sayesinde sonsuz vida mekanizmalarının dezavantajları olan yüksek çalışma sıcaklığı, düşük verim ve düşük çalışma ömrü problemlerini ortadan kaldırması beklenmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen faaliyetler deney düzeneğinin sahip olduğu yük kapasitelerinde gerçekleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda bilyeli sonsuz vida mekanizmalarının maksimum yük kapasitelerinin, bu kapasitedeki verimlerinin, çalışma ömürlerinin ve tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Mekanizmaların tam yükleme kapasitelerinde gerçekleştirilecek deneylerde daha yüksek verim farkları beklenmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (*Proje No: 2013FBE034*) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Şekercioğlu, T. (2013). *Makine Elemanları Hesap Şekillendirme* (3. Baskı). Denizli: Birsen Yayınevi.
- [2] Babalık, F. C. (2008). *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri* (3. Baskı). Ankara: Nobel Yayınevi.
- [3] Neupert, K. (1990). *Versuche zum Einfluß der Baugröße auf Wirkungsgrad und Flankentragfähigkeit von Schneckengetrieben unter Berücksichtigung der Schmierstoffviskosität*, FVA.
- [4] Predki, W. (1982). *Hertzische Drücke, Schmierspalthöhen und Wirkungsgrade von Schneckenrieben*, Bochum: Ruhr-Univ. Bochum, Inst. f. Konstruktionstechnik.
- [5] Wahlberg, E. C., Lampe, R. C. (1945). US Patent 2451998A.
- [6] Sedgwick, R. K. R., Hughes, J. J. (1968). US Patent 3468179A.
- [7] Tong, D. (2004). US Patent 20060156845A1.
- [8] Stoianovici D., Kavoussi L. (2006). *Ball-Worm Transmission*. USA Patent 7,051,610 (C03512).
- [9] Koçak, S. (2017). Innovative Design for A Ball Worm Gear Mechanism. *International Journal of Engineering Technologies*, 3(4), 230-234.
- [10] Koçak, S. (2014). *Bilyeli sonsuz vida mekanizması tasarımı ve üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 118-120.
- [11] Doğan, H., Yılankırkan, N. (2015). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli Ve Projeksiyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3 (1), 375-384.

- [12] Çanka Kılıç, F., Sert, M., Eyidoğan, M., Kaya, D., Özdemir, N. (2018). Endüstriyel Tav Fırınlarında Bir ORC Sistemi Uygulaması ile Enerji Tasarrufu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (1), 33-43. DOI: 10.29109.
- [13] Yaylaci, E., Yazici, İ. (2019). Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzenineğinin Gerçeklenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (1), 175-183. DOI: 10.29109/gujsc.468704
- [14] Çanka Kiliç, F. (2017). Endüstriyel Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyon Azalımı Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (2), 147-158.
- [15] Xu, H., Kahraman, A., Anderson, N. E., Maddock, D. G. (2007). Prediction of Mechanical Efficiency of Parallel-Axis Gear Pairs, *ASME J. Mech. Des.*, 129, pp. 58–68.
- [16] Michlin, Y., Myunster, V. (2002). Determination of Power Losses in Gear Transmissions with Rolling and Sliding Friction Incorporated. *Mech. Mach. Theory*, 37, pp. 167–174.
- [17] Anderson, N. E., and Loewenthal, S. H. (1982). Design of Spur Gears for Improved Efficiency. *ASME J. Mech. Des.*, 104, pp. 767–774.
- [18] Diab, Y., Ville, F., Velex, P. (2006). Prediction of Power Losses Due to Tooth Friction in Gears. *Tribol. Trans.*, 39-2, pp. 260–270.
- [19] Diab, Y., Ville, F., Houjoh, H., Sainsot, P., Velex, P. (2005). Experimental and Numerical Investigations on the Air-Pumping Phenomenon in High-Speed Spur and Helical Gears. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 219, 785–800.
- [20] Chase, D. (2005). The Development of an Efficiency Test Methodology for High-Speed Gearboxes, MS thesis, The Ohio State University, Columbus, OH
- [21] Britton, R. D., Elcoate, C. D., Alanou, M. P., Evans, H. P., Snidle, R. W. (2000). Effect of Surface Finish on Gear Tooth Friction. *Trans. ASME, J. Tribol.*, 122, 354–360.

## Experimental Investigation of Effects of Annealing Process on Formability and Microstructure of Al 2024-T3 Sheet Metal Material

İbrahim KARAAĞAÇ<sup>1</sup> , Mehmet Okan KABAKÇI<sup>2,\*</sup> , Mehmet Yasin DEMİREL<sup>3</sup> 

<sup>1,2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup> Graduate School of Natural And Applied Sciences, Gazi University, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 22/10/2019

Revision: 01/02/2020

Accepted: 08/02/2020

#### Highlights

- Precipitation formation
- Grain growth
- Mechanical properties

#### Keywords

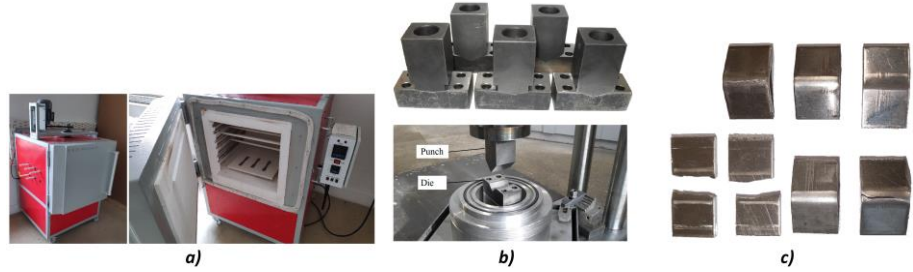
Al2024-T3

Annealing

Formability

Mechanical Properties

Microstructure



**Figure A.** Annealing furnace (a); Forming Dies (b); Forming Results (c)

**Purpose:** In this study, the effects of annealing parameters such as annealing temperature and time on Al2024-T3 material's microstructure and formability have been investigated experimentally. In addition to it was aimed to determine the annealing parameters that can be used for the most accurate forming process where forming defects such as cracks and breaks do not occur.

**Theory and Methods:** 2.5 mm of AL2024-T3 sheet material thick was used as test material. V-Bending test and tensile test specimens were prepared. The test specimens were annealed at different temperatures (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C) and times (6 min, 30 min, 60 min). Microstructural properties of annealed test specimens were investigated by the SEM method. Formability studies were carried out by using 15, 30, 45, 60, 75 degrees-bending dies which have different die angles.

**Results:** Forming defects such as scratches, cracks or breaks weren't seen on the annealed product. It was observed that the increase of annealing temperature caused an increase in the amount of precipitate in the material structure and the growth of grain boundaries. Besides, it has been observed that by increasing the annealing temperature, the number of precipitates in the microstructure of the material and the size of the precipitate increase.

**Conclusion:** It has been determined that the formability of Al2024-T3 were increased and the forming defects were decreased with increasing annealing temperature and time. It has seen that due to annealing process, the precipitation formations have occurred in the microstructure. On the other hand, it has been seen that the hardness and strength of material were decreased due to precipitate formations and grain growth.



## Tavlama İşleminin Al 2024-T3 Sac Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine ve Mikroyapıya Etkilerinin Deneysel Araştırılması

İbrahim KARAAĞAÇ<sup>1</sup> , Mehmet Okan KABAKÇI<sup>2,\*</sup> , Mehmet Yasin DEMİREL<sup>3</sup> 

<sup>1,2</sup> Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, farklı tavlama parametrelerinde gerçekleştirilen tavlama işleminin Al2024-T3 sac malzemesinin bükme ile şekillendirilebilirlik ve mikroyapısında meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Al2024-T3 sac malzemesine uygulanan tavlama işlemleri; Oda sıcaklığı – 100 °C – 200 °C – 300 °C – 400 °C tavlama sıcaklıklarında ve 6 dk – 30 dk – 60 dk tavlama sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemleri, 15° - 30° - 45° - 60° - 75°'lik farklı açılara sahip V bükme kalıplarında yapılmıştır. 15° açılı V bükme kalıbında bükülen tüm numunelerin tüm parametrelerde başarılı bir şekilde şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 60° ve 75° açılı V bükme kalıplarında ise sadece 400 °C – 30 dk ve 400 °C – 60 dk tavlama parametrelerinde ısıl işlem uygulanmış deney numunelerinin başarılı olarak şekillendirilebildiği tespit edilmiştir. Tavlama işlemi sonucunda malzemenin mikroyapısında çökelti oluşumları gözlemlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 22/10/2019  
Düzeltilme: 01/02/2020  
Kabul: 08/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Al2024-T3  
Tavlama  
Şekillendirilebilirlik  
Mekanik Özellikler  
Mikroyapı

### Experimental Investigation of Effects of Annealing Process on Formability and Material Properties of Al 2024-T3 Sheet Metal Material

### Keywords

Al2024-T3  
Annealing  
Formability  
Mechanical Properties  
Microstructure

### Abstract

In this study, the effects of annealing process that is performed in different annealing parameters on bending formability of Al2024-T3 sheet material were investigated. The effects of annealing process on microstructure were also investigated. Annealing processes were carried out at RT, 200, 300, and 400 °C annealing temperatures and for 6, 30 and 60 min annealing times. Forming processes were performed with 15° - 30° - 45° - 60° - 75° V bending dies. It was observed that all specimens bent in V bending die with 15° angle were successfully formed in all annealing parameters. Moreover, it has been observed that in only 400 °C - 30 min and 400 °C - 60 min annealed test specimens were formed successfully in V bending dies with 60° and 75° die angles. As a result of the annealing process, precipitation formations were observed in the microstructure of the material.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal yaşamın korunması ve çevreye salınan sera gazlarının olumsuz etkilerine ilişkin endişeler, taşımacılık endüstrisini ürettikleri araçların ağırlık miktarını azaltmaya yöneltmektedir. Bu gereklilik ise hafif metallere alüminyum ve magnezyumun yaygın kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Alüminyum 2024 alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi korozyon direnci ve kompozitlere kıyasla daha düşük maliyetlerinin bulunması gibi sebeplerden dolayı başta otomotiv, uzay-havacılık sanayi olmak üzere pek çok endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, sahip oldukları yüksek mukavemet ve düşük süneklik özelliklerinden dolayı Alüminyum 2024 alaşımlarının oda sıcaklığında şekillendirilebilirlikleri kısıtlıdır. Bu durum, şekillendirme operasyonlarında istenen geometrinin çatlama veya kırılma gibi şekillendirme kusurları meydana gelmeden elde edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Al2024 alaşımlarında şekillendirilebilirliği artırarak oluşan kusurların engellenmesi amacıyla şekillendirme işlemi öncesinde ya da şekillendirme operasyonu esnasında çeşitli ısıl işlem uygulamaları gerekli olabilmektedir [1-4]. Sıklıkla kullanılan bu ısıl işlem uygulamalarından bir tanesi de çözeltiye alma ısıl işlemidir. Çözeltiye



alma ısıl işlemi sırasıyla; fazların çözündüğü çözeltiliye alma, aşırı doymuş yapıların oluştuğu su verme ve oda sıcaklığında ya da denge solvüs eğrisinin altında kalan bir sıcaklıkta çözülmüş olan atomların çöktüğü yaşlandırma işlemlerinden meydana gelmektedir. T3 ısıl işlemi ise; literatürde çözeltiliye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma ile kararlı yapıya getirilmiş olarak tanımlanmaktadır [5-6]. Literatürde, şekillendirme operasyonları öncesinde uygulanan ısıl işlemler haricinde şekillendirme operasyonları sırasında şekillendirilebilirliği bir miktar daha arttırabilmek amacıyla indüksiyon ya da lazer uygulamalarıyla şekillendirilecek alanın bölgesel ısıtılması veya bütün parçanın ısıtılması; şekillendirme yapılacak kalıp setinin tamamının ya da sadece bir kalıp yarımının ısıtılması gibi çeşitli çalışmaların gerçekleştirildiği belirlenmiştir [7-16]. Moy v.d. [7] ısıl işlemin 2024-T3 alüminyum alaşımının dokusu, mikroyapısı ve şekillendirilebilirliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalar için kullanılan 1.27 mm ve 2.03 mm kalınlığındaki Al2024-T3 sac malzemelere 525 °C sıcaklıkta çözeltiliye alma ve 150 °C sıcaklıkta 2.5 saat, 2 gün ve 1 haftalık değişen sürelerde yaşlandırma sertleştirme uygulamışlardır. Tavlanan numunelere uyguladıkları çeşitli testler sonucunda; 150 °C sıcaklık ve 2 gün boyunca yaşlandırılan sac numunelerin mekanik özelliklerinde bir miktar azalmanın ve buna bağlı olarak da yüzde uzamanın % 4-6 oranında arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, bu yaşlandırma işlemlerinin sac malzemenin şekillendirilebilirliğini arttırdığını da gözlemlemişlerdir. Ortiz v.d. [8] Al2024 alaşımının da dahil olduğu çeşitli alüminyum malzemelerin çekme özelliklerine soğuk işlemin etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında, çeşitli temperlerde tavlama işlemi uygulamışlar ve daha sonrasında uzama sınırlarını görmek için malzemeleri plastik deformasyona maruz bırakmışlardır. Şekillendirme işlemi sonunda malzemelerin çekme dayanımları, sertlikleri, süneklikleri, tane boyutları ve iletkenlikleri gibi çeşitli özelliklerini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ise; malzemelere yüksek süneklik ve düşük dayanım kazandıran ısıl işlemlerin uygulanması ile gerçekleştirilecek şekillendirme işlemlerinin daha başarılı olacağını belirtmişlerdir. Khan v.d. [9] Al2024 alaşımının şekillendirilebilirliğine proses parametrelerinin etkilerini sonlu elemanlar analizleri ve deneysel çalışmalar ile incelemiştir. Çalışmalarında, öncelikle sonlu elemanlar analizleri ile malzemenin şekillendirilebilirliği için uygun parametreler belirlenmiş ve daha sonrasında konvansiyonel pres tezgahı kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda ise ara tavlamanın şekillendirilebilirliği %10 iyileştirdiğini, sünekliği %50-60 oranında arttırıp çekme dayanımını ise %50-60 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu alaşımın şekillendirme operasyonlarında tavlama (T-O) temper kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Dilmeç ve Arıkan [10] optimum çözeltili ısıl işlem koşullarını belirlemek için tavlama parametrelerinin AA2024 sac malzemesinin mekanik özelliklerine ve şekillendirilebilirliğine etkilerini inceledikleri bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. 175 mm çapında ve 1 mm kalınlığında ki deney numunelerini farklı sıcaklık (485 °C, 493 °C ve 505 °C), bekletme süresi (15 dk, 30 dk ve 45 dk) ve ısıtma oranı (250 °C/s, 750 °C/s ve 2500 °C/s) parametrelerinde tavlama işlemine tabii tutmuşlardır. Tüm tavlama koşullarında tavlama numunelerin çekme testleri ile mekanik özelliklerini ve limit dome testi ile şekillendirilebilirliklerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde varyans analiz metodu (ANOVA) ile en uygun tavlama parametrelerini belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda; ısıtma oranının bu çalışma için neredeyse hiçbir etkisinin olmadığını ancak tavlama sıcaklığının bu çalışma için en etkili parametre olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 493 °C ve 30 dk parametrelerinde çözeltili ısıl işlemi uygulanan AA2024 numunelerin en yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve şekillendirilebilirlik sınırına sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Reis v.d. [11] yapay yaşlandırma işleminin Al2024 alaşımının mekanik özelliklerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. 495 °C, 505 °C ve 515 °C sıcaklıkta çözeltiliye alınıp daha sonrasında su verilen numuneler 190 °C ve 208 °C sıcaklıkta yapay yaşlandırmaya bırakılmışlardır. Isıl işlemler ile yapısı düzenlenen sac malzemeler çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuşlardır. Yapılan testler sonucunda; 505 °C sıcaklıkta solüsyona alınıp 208 °C sıcaklıkta iki saat boyunca yaşlandırılan numunelerin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu, 515 °C sıcaklıkta solüsyona alınarak 208 °C sıcaklıkta iki saat süreyle yaşlandırılan numunelerin ise en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Fujda v.d. [12] çözeltiliye alma ısıl işleminde sıcaklığın Al2024 alaşımının mikro yapısal ve mekanik özelliklerine etkilerini metalografik çalışmalar, Vickers sertlik ölçüm testleri ve çekme testleriyle deneysel olarak incelemiştir. Yapılan ısıl işlem adımları; 500 °C – 570 °C arasında değişen sıcaklıklarda çözeltiliye alma, 2.5 saat vakumlama, su ile soğutma ve 300 saat boyunca doğal yaşlandırma şeklindedir. Yapılan ölçümler sonucunda, tavlama sıcaklığının arttırılmasıyla sac malzemenin sertliğinin düştüğünü ve mekanik dayanımının azaldığını, ek olarak şekillendirilebilirliğin arttığını gözlemlemişlerdir. Mohammadi v.d. [13] alüminyum 2024-T3 sac malzemesinin bölgesel olarak lazer kullanılarak ısıtılması ve lokal yumuşama sonrasında bükme ile şekillendirilebilirliğini, ısıtma

uygulanmadan şekillendirilen numuneler ile karşılaştırdıkları deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bükülecek deney numuneleri, Nd:YANG lazeriyle çeşitli ısıtma rotaları izlenerek bölgesel bir yumuşamaya maruz bırakılmıştır. Bölgesel yumuşamalar sonucunda büküm çizgisi etrafında biriken gerilmelerin azaldığı ve şekillendirilebilirliğin daha doğru ölçü tamlığında gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kullandıkları üç aşamalı bir lazer tarama stratejisiyle geri esnemeyi büküm radyüsünü değiştirmeden %43 oranında azalttıklarını belirtmişlerdir. Merklein v.d. [14] bölgesel olarak lazer ile ısıtılan alüminyum alaşımlarının özelliklerinin yeniden düzenlenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, deney numunelerine 5 saniyeden daha az tutma sürelerinde ve 400 °C sıcaklıklarda kısa süreli ısıtma işlemi uygulamışlardır. Isıtma uygulanmadan önce en fazla 30° büküm açısında çatlamadan şekillendirilebilen dikdörtgen kesitli bir profil parçanın bölgesel olarak ısıtıldıktan sonra %73 daha fazla şekillendirilebilirlik göstererek 52° büküm açısına ulaşabildiği ve malzemelerin mekanik özelliklerinde %80 oranına varan azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Chen v.d. [15] ısıtma işlemi uygulanabilen ve yüksek mukavemetli 2024 alüminyum alaşımlarına senkron soğutmalı sıcak şekillendirme yöntemi uygulamalarını ve bu işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca malzemelerin mekanik malzemenin mikroyapısında meydana gelen değişimleri de incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, şekillendirme sonrasında geri esnemeye neden olan artık gerilmelerin senkron soğutmalı sıcak şekillendirme yöntemiyle azaltılabildiği ve kalıptan çıkarılan ürünün boyutsal doğruluğunu olumlu etkilediğini gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan testler sonucunda akma dayanımının 317.5 MPa ve çekme dayanımının ise 476.1 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Maneo v.d. [16] hızlı ısıtmayla yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarından oluşan uçak parçalarının sıcak şekillendirilebilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 630 °C sıcaklıktaki fırında 30 saniye ısıtılarak 450 °C sıcaklığa ulaştırılan deney numuneleri fırından alınıp 5 saniye içerisinde deney düzeneğine yerleştirilmiş ve 400 °C sıcaklıkta şekillendirme işlemi gerçekleştirmiştir. Yapılan şekillendirme deneyleri sonucunda, ılık şekillendirme operasyonlarının soğuk şekillendirme operasyonlarına kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Fan v.d. [17] Al2024 alaşımı sac malzemenin farklı sıcaklıklardaki kalıp yarımlarında sıcak şekillendirilmesi sonucu mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri yaptıkları deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Çalışmada, 498 °C sıcaklıkta 30 dakika çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanan deney numuneleri soğumadan kalıba yerleştirilmiş ve şekillendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; üst kalıp yarımının soğuk olmasının etkili bir su verme işlemini gerçekleştirilebilmesini sağlayarak parçanın termal bozulmasını azalttığını ve alt kalıbın sıcak olmasının ısıtılmış olan sac malzemenin hızlı soğumasını engelleyerek daha iyi dayanım değerlerinin elde edilebilmesine imkan verdiğini gözlemlenmiştir. Ayrıca, şekillendirme işlemlerinin çözeltiye alma sıcaklığına yakın sıcaklıklardaki kalıplarda gerçekleştirilmesi ile şekillendirilebilirlik miktarının geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Literatürde, gerçekleştirilen çalışmalarda uygulanan yöntemlerin yüksek maliyetli ve uzun zaman alıcı süreçler gerektirdiği gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmaların daha çok Al2024 malzemeye uygulanan ısıtma işlemlerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimlere odaklandığı, şekillendirilebilirliğin sınırlı sayıda incelediği tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada, Al2024-T3 alüminyum sac malzemesine çeşitli sıcaklık ve bekletme süreleri parametrelerinden oluşan farklı tavlama işlemlerinin uygulanması sonucu malzemenin mikro yapısında meydana gelen değişimlerin ve V bükme ile şekillendirilebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçların endüstriyel alanda yapılan çalışmalar için kullanılabilecek bir yol gösterici olması amaçlanmıştır.

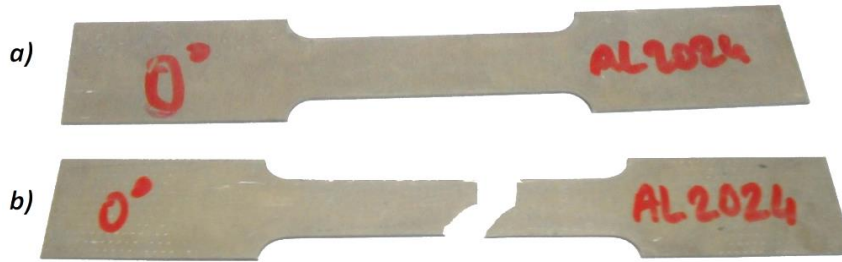
## 2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Tavlama işleminin mikro yapı ve şekillendirilebilirliğe etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada; çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma ile kararlı yapıya getirilmiş 2.5 mm kalınlığında Al2024-T3 alüminyum alaşım sac malzeme kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle endüstriden hazır temin edilmiş sac levha malzemenin kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için kimyasal spektrometre cihazıyla ölçümler yapılmıştır. Al2024-T3 malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Al2024-T3 sac malzemesinin kimyasal kompozisyonu (%wt)

Malzeme	% Al	% Cu	% Mn	% Zn	% Fe	% Ni	% Zr	% Pb	% Diğer
Al2024-T3	93,810	4,376	0,427	0,140	0,101	0,009	0,006	0,002	0,129

Kimyasal bileşimi belirlenen sac malzemelerden mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmak amacıyla 0° hadde yönünde ASTM-E8M standardında çekme test numuneleri tel erezyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Tel erezyon tezgahında kesilerek hazırlanan çekme test numunelerinin test öncesi ve sonrasına ait görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir.

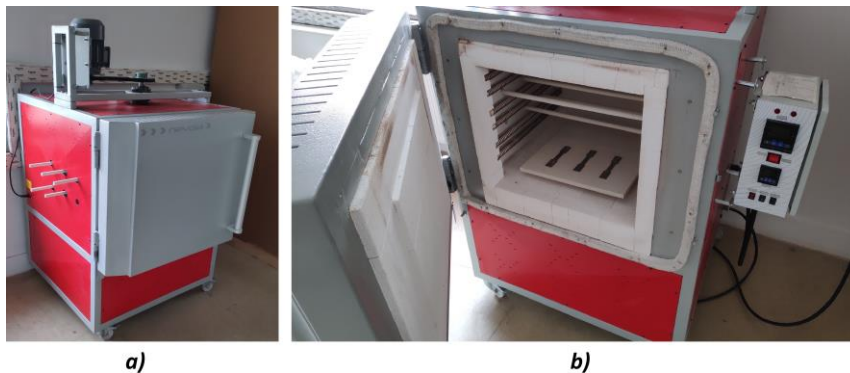


**Şekil 1.** Al2024-T3 sac malzemesi çekme test numuneleri (a) Çekme deneyi öncesi; (b) Çekme deneyi sonrası

Ayrıca, mikroyapı ve şekillendirilebilirlik incelemelerinde kullanılmak amacıyla 20 mm x 40 mm ölçülerinde ve 0° hadde yönündeki deney numuneleri giyotin makas kullanılarak hazırlanmıştır. Giyotin makas ile hazırlanan deney numuneleri ve tel erezyon tezgahında hazırlanan çekme test numuneleri PID kontrollü bir fırında birlikte tavlama işlemine tabii tutulmuşlardır.

## 2.1. Tavlama İşlemi ve Tavlama Parametreleri (Annealing Process and Annealing Parameters)

Çekme deneylerinde kullanılacak olan çekme testi numuneleri ile mikroyapı ve şekillendirilebilirlik deneylerinde kullanılacak deney numunelerine çeşitli tavlama sıcaklıklarında (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C) ve çeşitli tavlama sıcaklığında bekleme sürelerinde (6 dk., 30 dk., 60 dk.) tavlama işlemi uygulanmıştır. Literatürde, 1 inch (25.4 mm) parça kalınlığı için 1 saat süreyle tavlama sıcaklığında bekleme işlemi uygulandığı belirlenmiştir [18]. Yapılan bu deneysel çalışmada kullanılan sac malzemenin 2.5 mm kalınlığında olması nedeni ile tavlama sıcaklığında bekleme süresinin 6 dk. olması gerektiği belirlenmiştir. Tavlama sıcaklığında bekleme süresinin etkilerinin daha iyi gözlemlenmesi amacıyla 30 dk. ve 60 dk. tavlama süreleri de çalışmaya dahil edilmiştir. Tavlama işlemi; tavlama fırının bir saat içinde istenen sıcaklığa ulaşması, belirlenen tavlama sıcaklığında bekleme süresince herhangi bir sıcaklık değişimi olmaması ve fırın kapağı kapalı şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulması adımlarından meydana gelmektedir. Tavlama işleminin gerçekleştirildiği fırın ve fırın içindeki deney numunelerinin yerleşimi Şekil 2’de verilmiştir.



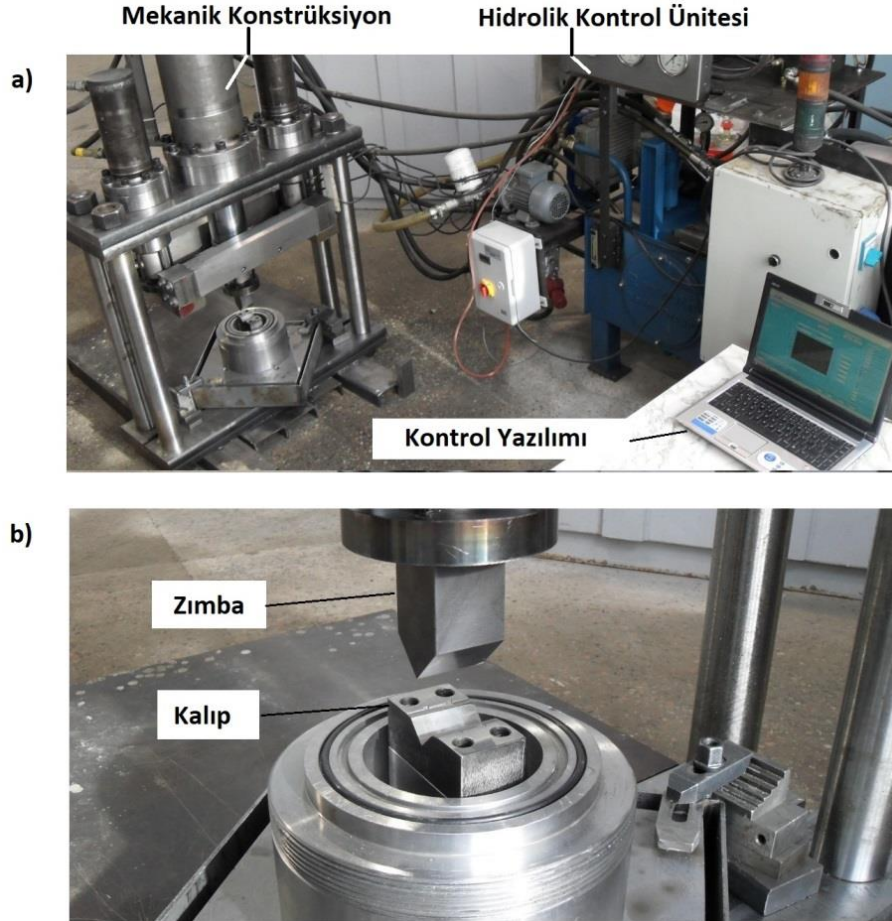
**Şekil 2.** Tavlama İşlemi Ortamı (a) Tavlama Fırını; (b) Malzemelerin Tavlama Fırınına Yerleşimi

## 2.2. Mikroyapı İncelemesi (Investigation of Microstructure)

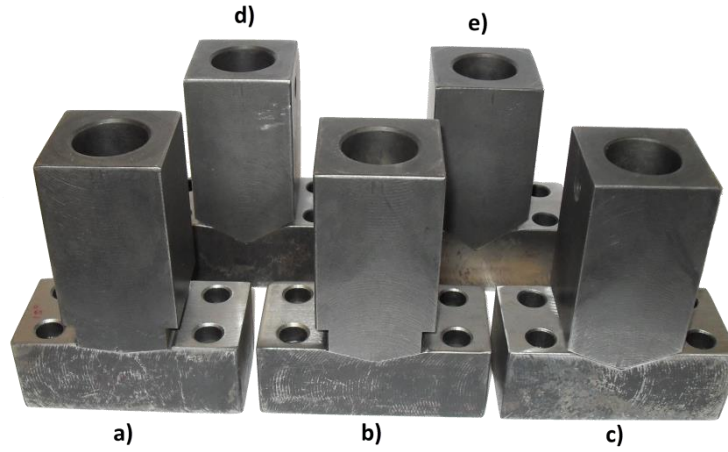
Tavlama prosesinin Al2024-T3 sac malzemesinin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemesi; zımparalama, parlatma, ultrasonik banyoda temizleme ve kimyasal bir karışım ile dağlanması aşamalarından oluşmaktadır. Yapılan mikroyapı incelemesi ön hazırlığında dağlayıcı olarak; %1 HF (Hidroflorik Asit), %1.5 HCl (Hidroklorik Asit), %2.5 HNO<sub>3</sub> (Nitrik Asit) ve %95 H<sub>2</sub>O'dan oluşan Keller Dağlayıcısı kullanılmıştır.

## 2.3. Şekillendirme Deney Seti ve Deney Parametreleri

Tavlanan deney numunelerinin şekillendirme işlemleri bilgisayar kontrollü bir deney düzeneğine bağlanan farklı açılı V bükme kalıplarında gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar kontrollü deney düzeneği ile şekillendirme işlemlerinin gerçekleştirildiği ortam Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekillendirme işlemleri 10 mm/sn sabit deformasyon hızında, uç radyüsü 0 (sıfır) olan zımbalar ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75° büküm açısına sahip kalıplar kullanılarak ütüleme işlemi uygulanmadan gerçekleştirilmiştir. Büküm işlemlerinde kullanılan kalıplar Şekil 4'te verilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında meydana gelen zamana bağlı kuvvet değişimleri, deney seti üzerine bağlı olan yük hücrelerinden elde edilen veriler ile anlık gözlemlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Yapılan çalışmada; deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlanan tekrarlanabilirliğinin doğrulanması amacıyla tüm deneyler en az iki defa tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.** Şekillendirme Ortamı Görünüşü (a) Şekillendirme Cihazı; (b) Kalıp – Zimba Setinin Detay Görünüşü



**Şekil 4.** Şekillendirme Kalıpları (a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°

### 3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA (EXPERIMENTAL INVESTIGATION and DISCUSSION)

Al2024-T3 alüminyum alaşımı sac levha malzemeden elde edilen deney numuneleri ve çekme testi numuneleri 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C tavlama sıcaklıklarında 6 dk, 30 dk, 60 dk tavlama sürelerinde elektronik kontrollü fırın kullanılarak tavlansmıştır. Çeşitli tavlama sıcaklıklarında ve tavlama sürelerinde ısıl işlem uygulanan numunelerin 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° açılı V bükme kalıplarında bükülmesi ile şekillendirilebilirlikleri ve tavlama parametrelerinin, numunelerin mikroyapısında meydana getirdiği değişimler de yorumlanmıştır. Yapılan bükme ile şekillendirme işlemleri sonucunda elde edilen şekillendirilebilirlik sonuçları da Şekil 5'te verilmiştir.

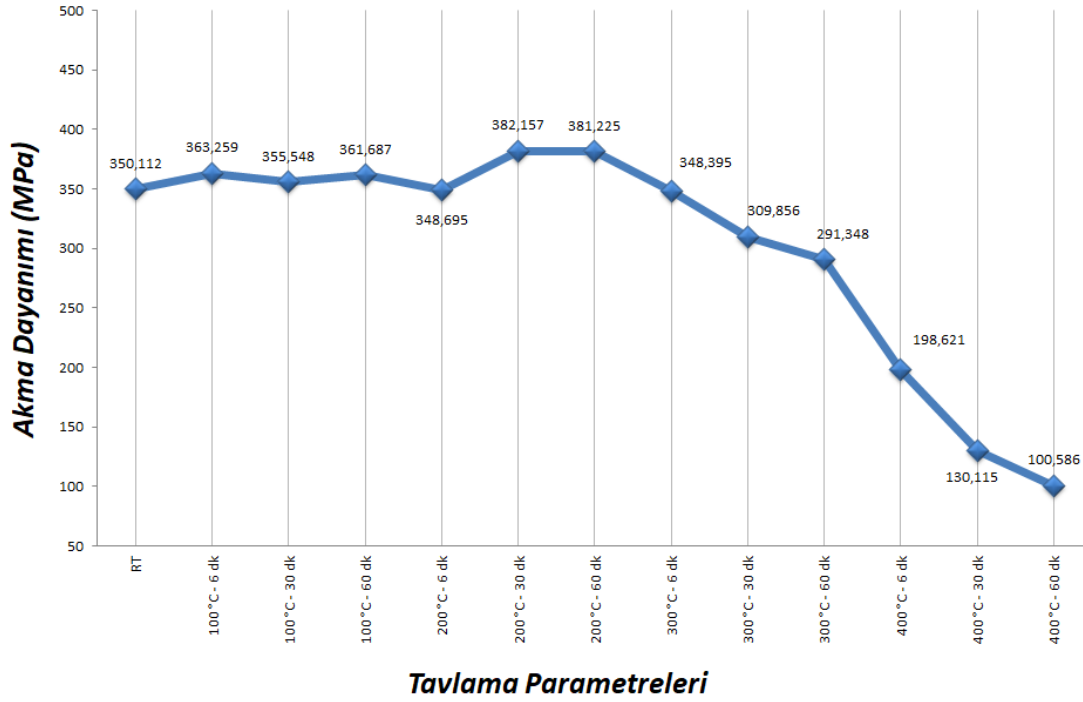
15° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri tüm tavlama parametreleri için başarılı sonuçlanmıştır. 30° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri ise 300 °C haricindeki tüm tavlama parametrelerinde başarılı sonuçlanırken; 300 °C sıcaklıkta tavlanan numunelerde çatlamlar meydana gelmiştir. Ancak, 45° büküm açısına sahip kalıp kullanılarak gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinde ise sadece 400 °C'de tavlanan numuneler için başarılı sonuç verirken diğer sıcaklıklarda tavlanan numunelerin çatladığı gözlemlenmiştir. 60° ve 75° büküm açılarında sahip kalıplar kullanılarak uygulanan şekillendirme çalışmalarında ise yalnızca 400 °C – 30dk. ve 400 °C – 60dk. tavlama parametreleri için şekillendirme kusuru meydana gelmeksizin gerçekleştirilebilmiştir. 30° ve 60° kalıp açılarında yapılan bükme işlemlerinde elde edilen sonuçların literatürde elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [22].



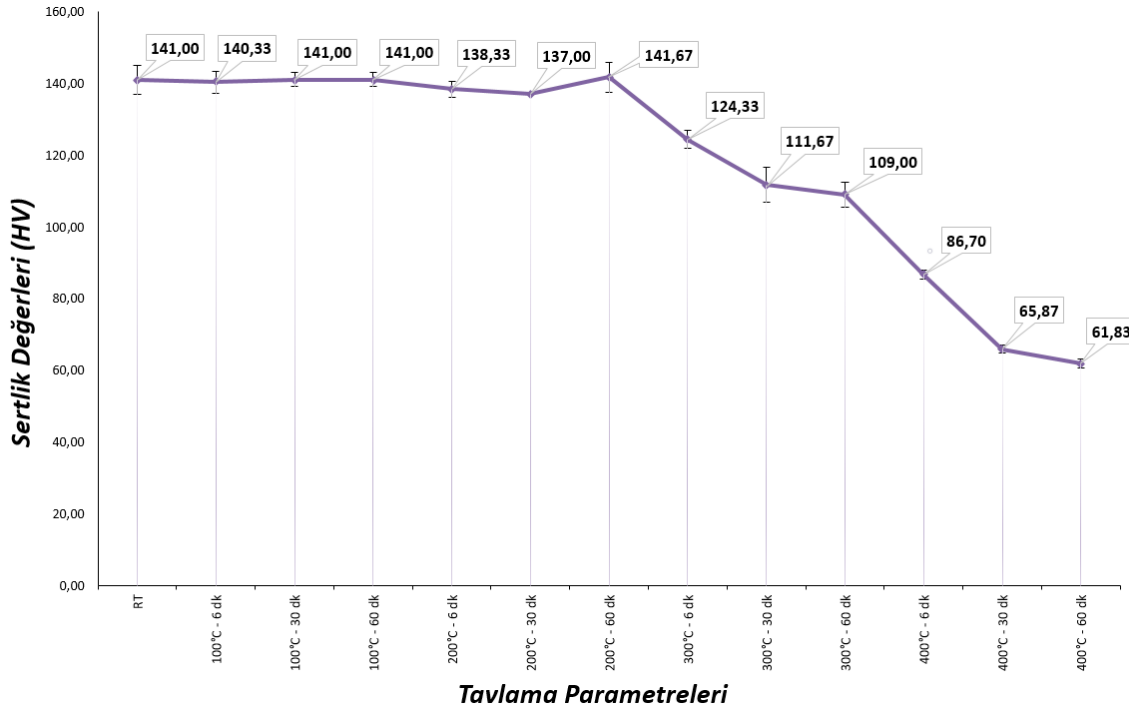
Kalıp Açısı	Tavlama Sıcaklığı	Tavlama Süresi	Sonuç	Kalıp Açısı	Tavlama Sıcaklığı	Tavlama Süresi	Sonuç		
15°	RT	-	Şekillendirildi	60°	RT	-	Şekillendirilemedi		
		100 °C	6			Şekillendirildi	100 °C	6	Şekillendirilemedi
			30			Şekillendirildi		30	Şekillendirilemedi
	60		Şekillendirildi		60	Şekillendirilemedi			
	200 °C	6	Şekillendirildi		200 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirildi		300 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi		400 °C	6	Şekillendirildi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					
30°	RT	-	Şekillendirildi	75°	RT	-	Şekillendirilemedi		
		100 °C	6			Şekillendirildi	100 °C	6	Şekillendirilemedi
			30			Şekillendirildi		30	Şekillendirilemedi
	60		Şekillendirildi		60	Şekillendirilemedi			
	200 °C	6	Şekillendirildi		200 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirildi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirilemedi		300 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi		400 °C	6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					
45°	RT	-	Şekillendirilemedi			-	Şekillendirildi		
		100 °C	6			Şekillendirilemedi		6	Şekillendirildi
			30			Şekillendirilemedi		30	Şekillendirildi
	60		Şekillendirilemedi		60	Şekillendirildi			
	200 °C	6	Şekillendirilemedi			6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	300 °C	6	Şekillendirilemedi			6	Şekillendirilemedi		
		30	Şekillendirilemedi			30	Şekillendirilemedi		
		60	Şekillendirilemedi			60	Şekillendirilemedi		
	400 °C	6	Şekillendirildi			6	Şekillendirildi		
		30	Şekillendirildi			30	Şekillendirildi		
60		Şekillendirildi	60	Şekillendirildi					

Şekil 5. Şekillendirme İşlemlerinden Elde Edilen Veriler

Tavlama deney numunelerinin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler sertlik ölçme ve çekme testi gibi mekanik testlerde de literatürde gözlemlenmiştir. Çekme test sonuçlarından tavlama işleminin mekanik özelliklerindeki değişimlere etkileri, çekme testi deneyleri sonucunda elde edilen akma dayanımı verileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca, sertlik ölçüm testleri sonucu elde edilen veriler Şekil 7'de gösterilmiştir [22]. Uygulanan tavlama işlemlerinde artan sıcaklığın ve tutma süresinin etkisi ile malzemenin tane sınırları ergimeye başlamaktadır. Bu duruma bağlı olarak malzemenin dayanım ve sertlik değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir [19-20]. Oda sıcaklığı durumunda 350 MPa akma dayanımına ve 141 HV sertlik değerine sahip olan numuneler de 200 °C – 60dk tavlama parametrelerine kadar anlamlı bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak bu tavlama parametresinden sonra akma dayanımında ve sertlik değerlerinde önemli azalmaların meydana geldiği belirlenmiştir. 400 °C – 60dk tavlama parametreleri uygulandığında ise akma dayanımının yaklaşık %71, sertlik değerinin ise yaklaşık %56 oranında azaldığı gözlemlenmiştir [22].



Şekil 6. Farklı parametrelerde tavllanmış Al2024-T3 malzemelerin akma dayanımları [22]



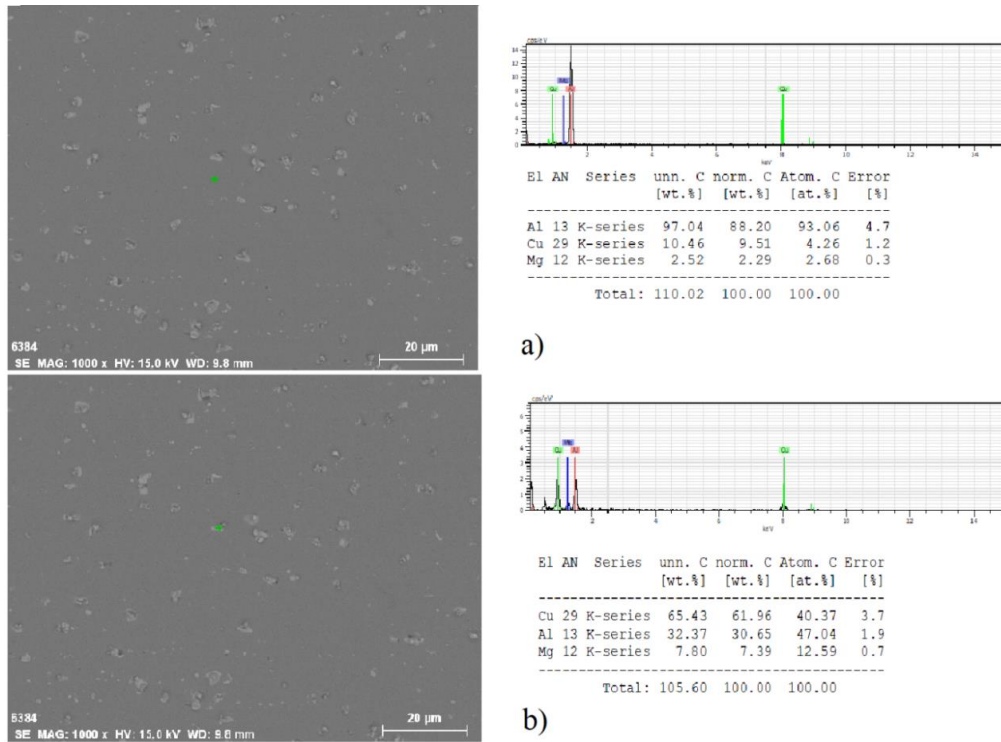
Şekil 7. Farklı parametrelerde tavllanmış Al2024-T3 malzemelerin sertlik değerleri [22]

Çeşitli tavlama sıcaklıklarında ve sürelerinde tavlanan deney numunelerinin mikroyapı özelliklerinde meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Yapılan mikroyapı incelemesi sonucunda, uygulanan tavlama sıcaklığı artışının malzeme yapısındaki çökelti miktarında artışa ve tane sınırlarının büyümesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, tavlama sıcaklığında bekletme süresinin artması ile de malzemenin iç yapısındaki çökeltilerin sayısının ve çökelti boyutlarının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılma işlemleri genel olarak; çökeltilerin çözündürülerek aşırı doymuş katı çözeltinin (Supersaturated Solid Solution:

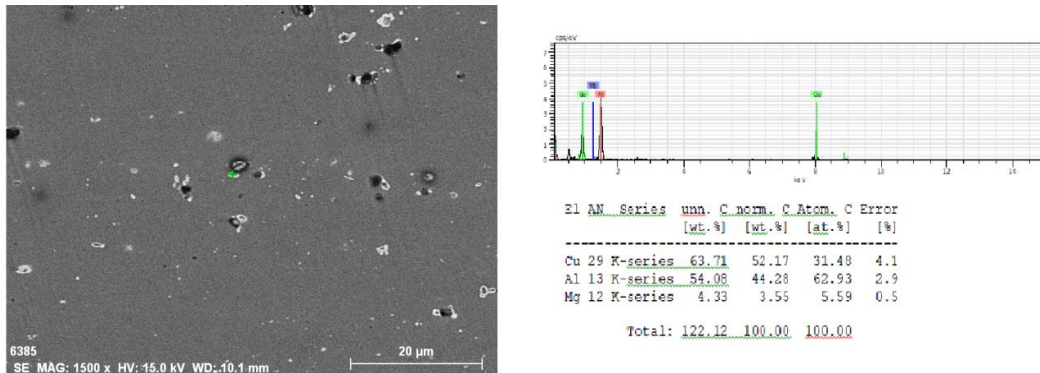


SSSS) oluşumu, Guiner-Preston bölgelerinin oluşumu, yarı kararlı yarıkararlı fazın oluşumu ve kararlı fazın oluşumu şeklinde tanımlanmaktadır. Bir Al-Cu-Mg alaşımı olan Al2024 için ise bu dizi SSSS  $\rightarrow$  GP  $\rightarrow$   $\theta'$   $\rightarrow$   $\theta'$  ( $CuAl_2$ ) şeklinde gösterilebilmektedir. Artan sıcaklık değerleriyle  $CuAl_2$  çözünürlüğü giderek artmaktadır ve alaşım aşırı yaşlandırıldığında yarıkararlı çökeltiler hızla büyüyerek kararlı ikincil fazlar oluşmaktadır [20]. Mikroyapıda meydana gelen bu değişiklikler malzemenin dayanım değerlerinde önemli oranda azalmaların oluşmasına neden olmuştur. SEM analizi ile elde edilen veriler Şekil 8 – 11 ile gösterilmiştir.

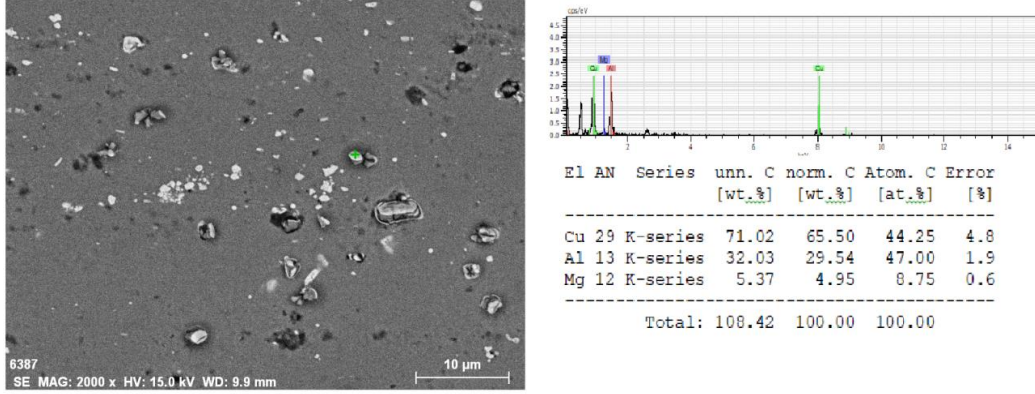
Artan sıcaklıkla birlikte oda sıcaklığında ana metalde %88,20 olan Al, %9,51 olan Cu ve %2,29 olan Mg miktarı, 200 °C'de %44,28 Al, %52,17 Cu ve %3,55 Mg; 300 °C'de %29,54 Al, %65,50 Cu ve % 4,95 Mg ve 400 °C'de %41,05 Al, %46,57 Cu ve %12,38 Mg olarak değişmiştir. Yapılan SEM görüntüleme analizleri sonucunda, tavlama sıcaklığının ve tavlama sıcaklığında bekletme süresinin artması ile birlikte malzeme yapısındaki tanelerin büyüdüğü ve tane sınırlarının genişlediği gözlemlenmiştir. Tane büyümesine bağlı olarak da mekanik özelliklerin azaldığı ve şekillendirilebilirliğin arttığı tespit edilmiştir.



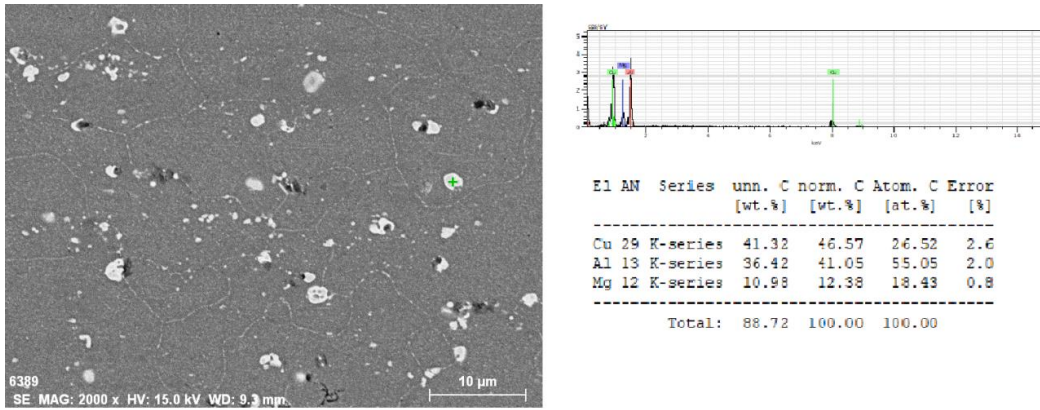
Şekil 8. Oda sıcaklığında mikroyapı incelemesi (a) Ana metal; (b) Tanecik/Çökelti



Şekil 9. 200 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi



Şekil 10. 300 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi



Şekil 11. 400 °C – 60 dk. tavlama parametrelerinde tanecik/çökelti incelemesi

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Al2024 – T3 sac malzemesinin çeşitli sıcaklıklarda tavllanması sonucu malzemenin şekillendirilebilirlik ve mikroyapı özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Çatlamlar ve kırılmalar gibi şekillendirme kusurlarının oluşmadığı en doğru şekillendirme işlemi için kullanılacak tavlama parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler aşağıda verilmiştir.





- I. Tavlama işlemi uygulanmamış oda sıcaklığında ve 100 – 200 °C’de tavlanan deney numunelerinin sadece 15° ve 30° büküm açısına sahip deney numunelerinde kırılma veya çatlama gibi herhangi bir şekillendirme kusuru meydana gelmeden şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ancak, tavlama sıcaklığının ve tavlama sıcaklığında bekleme süresinin artırılması ile malzemenin mikroyapısında meydana gelen çökelti oluşumları sayesinde alaşımın mekanik özelliklerinde belirgin azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 400 °C – 30 dk. ve 400 °C – 60 dk. parametrelerinde tavlanan numunelerin tüm şekillendirme açılarında herhangi bir şekillendirme kusuru oluşmaksızın şekillendirilebildiği ancak 400 °C – 6 dk parametrelerinde işlem gören numunelerin ise 60° ve 75° açılı kalıplarda başarılı olarak şekillendirilemediği gözlemlenmiştir.
- II. Tavlama sıcaklığının artması ve tavlama sıcaklığında bekleme süresinin artması ile malzemenin mikroyapısında ki çökeltilerin sayıca arttığı ve çökelti sınırlarının giderek genişlediği gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda malzemenin akma dayanımlarında ve sertliklerinde, özellikle 200 °C ve 60 dk. tavlama parametresinden sonra belirgin bir azalma olduğu yapılan mekanik testler ile belirlenmiştir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] J. Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex—shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55-80.
- [2] Vallellano, C., Morales, D., & Garcia-Lomas, F. J. (2008). A study to predict failure in biaxially stretched sheets of aluminum alloy 2024-T3. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(3), 303-310.
- [3] Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lin, J., & Dean, T. A. (2011). Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2648-2656.
- [4] Şimşek, T., & Akkurt, A. (2019). Lazer ile AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzeyinin Kaplanması ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(2), 263-278.
- [5] Handbook, A. S. M. (1991). Heat treating. ASM international, 4.
- [6] Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532.
- [7] Moy, C. K. S., Weiss, M., Xia, J., Sha, G., Ringer, S. P. (2012). Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A* 552, pp.48–60.
- [8] Ortiz, D., Abdelshehid, M., Dalton, R., Soltero, J., Clark, R., Hahn, M., ... & Stoyanov, P. (2007). Effect of cold work on the tensile properties of 6061, 2024, and 7075 Al alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(5), 515-520.
- [9] Irfan Mahmood Khan M. I., Umair Ismail, D. Noman, M. Zeeshan Siddiqui and M. Shahzad (2017). Effect of Process Parameters on Formability of Aluminum 2024. *Journal of Space Technology*, Vol 7, No 1.
- [10] Dilmeç, M., & Arıkan, H. (2014). Effect of Solution Heat Treatment Conditions on the Mechanical Properties and Formability for AA 2024 Alloy. *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 686, pp. 3-9). Trans Tech Publications Ltd.
- [11] Reis, D. A., Couto, A. A., Domingues Jr, N. I., Hirschmann, A. C., Zepka, S., & de Moura Neto, C. (2012). Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024. *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 326, pp. 193-198). Trans Tech Publications.
- [12] Fujda, M., Mišičko, R., Rusňáková, L., & Sojko, M. (2007). Effect of solution annealing temperature on structure and mechanical properties of EN AW 2024 aluminium alloy. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 17(1).
- [13] Mohammadi, A., Vanhove, H., Van Bael, A., & Duflou, J. R. (2012). Bending properties of locally laser heat treated AA2024-T3 aluminium alloy. *Physics Procedia*, 39, 257-264.
- [14] Merklein, M., Böhm, W., & Lechner, M. (2012). Tailoring material properties of aluminum by local laser heat treatment. *Physics Procedia*, 39, 232-239.
- [15] Chen, G., Chen, M., Wang, N., & Sun, J. (2016). Hot forming process with synchronous cooling for AA2024 aluminum alloy and its application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1-4), 133-139.
- [16] Maeno, T., Mori, K. I., & Yachi, R. (2017). Hot stamping of high-strength aluminium alloy aircraft parts using quick heating. *CIRP Annals*, 66(1), 269-272.

- [17] Fan, X., He, Z., Zheng, K., & Yuan, S. (2015). Strengthening behavior of Al–Cu–Mg alloy sheet in hot forming–quenching integrated process with cold–hot dies. *Materials & Design*, 83, 557-565.
- [18] LeMaster, R., Boggs, B., Bunn, J., Hubbard, C., & Watkins, T. (2007). Grinding induced changes in residual stresses of carburized gears. *Lateral*, 4(3), 42-47.
- [19] Demirel, M. Y., & Karaağaç, İ. (2019). 7075-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tavlama İşleminin Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*.
- [20] Dilmeç, M., Tınkır, M., & Arıkan, H. (2015). Al 2024 Alaşımının Çökelme Sertleşmesi İşlemi Koşullarının Şekillendirilebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 231-248.
- [21] Shan, D., & Zhen, L. (2012). Aging behavior and microstructure evolution in the processing of aluminum alloys. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes* (pp. 267-297). Woodhead Publishing.
- [22] Karaağaç, İ., Kabakci, M.O, & Demirel, M.Y. (2019). The Experimental Investigation of Annealing Parameters Effects on AL2024-T3 Materials' Formability and Mechanical Properties. *European Journal of Technique (EJT)*, 9(2), 338-346.

## Use of K-Means Clustering Algorithm for Lesion Segmentation in Dermoscopic Images

 Sümeyya İLKİN<sup>1,\*</sup>  Oktay AYTAR<sup>2</sup>  Tuğrul Hakan GENÇTÜRK<sup>3</sup>  Suhap ŞAHİN<sup>4</sup> 
<sup>1,3,4</sup> Kocaeli University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 41001, İzmit/KOCAELİ

<sup>2</sup> Bolu Abant İzzet Baysal University Faculty of Eng., Dept. of Electrical Electronics Eng., 14030, Gölköy/BOLU

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 26/09/2019

Revision: 08/02/2020

Accepted: 08/02/2020

#### Highlights

- Lesion Segmentation.
- Melanoma.
- K-means Clustering for melanoma segmentation.

#### Keywords

Medical Image Processing  
 Melanoma Skin Cancer  
 Lesion Segmentation  
 K-Means Clustering  
 Algorithm  
 Mean Shift Algorithm  
 Canny Edge Detection  
 Algorithm

In this study, the segmentation of lesion regions in skin images is performed with K-mean clustering algorithm in order to increase the accuracy of diagnosis made by doctors. The system is tested by selecting K center number 2 and 4 values. A melanoma data set has been used for testing. Peak Signal Noise Ratio (PSNR) and Correlation Coefficient (CC) metrics values has been obtained for analyzing of the study. The performance evaluation of the study has been done by using enhanced Canny edge detection and Mean shift algorithms.

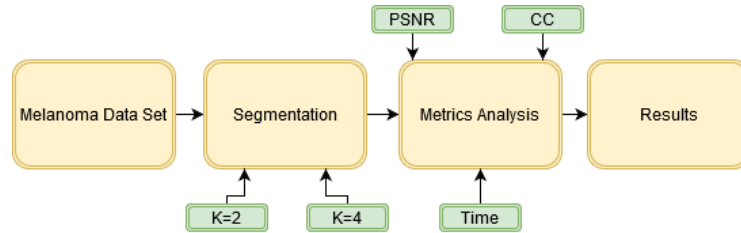


Figure A. Block diagram of the proposed study

**Purpose:** Melanoma diagnoses are mostly made by pathological visual evaluation of the skin. This evaluation is mostly subjective since it is based on the observations of the doctors. Therefore, computer-assisted systems are been using to increase the correct diagnosis rates in cases. In this study, lesion regions segmentation is performed. K-mean clustering algorithm is used for the segmentation process.

**Theory and Methods:** Lesion segmentation is performed by using K-mean clustering algorithm on images with melanoma type skin cancer lesions taken from a dataset. The system has been tested by selecting K center values 2 and 4 respectively and using all images separately.

**Results:** A data set consisting of 70 macroscopic melanoma skin cancer images is used for the test procedure. To measure the effectiveness of the system, it is analyzed using PSNR and CC metrics. The efficiency of this study is obtained by comparing it with the enhanced Canny edge detection algorithm and the mean shift algorithm. The proposed study gives the highest PSNR and correlation coefficient metric values when the K center value is selected 4. The experimental results are presented and compared in Section 3.

**Conclusion:** Melanoma skin cancer lesion segmentation is presented in this study. The aim of this study is to obtain lesion areas in order to increase the correct diagnosis rates. The lesion regions and non-lesion regions obtained in the study are clustered according to their color values. In the lesion segmentation process, the K-means clustering algorithm is used and the system is tested by selecting the K center numbers 2 and 4. The analysis of the obtained values is carried out using PSNR and CC metrics. At the same time, the operating times of the study are calculated. The performance of this study is evaluated by comparing Canny edge detection and Mean shift algorithm previously implemented by us. According to the metric results, it is observed that the segmentation performed by using the K-mean clustering algorithm which has selected center number equals to the 4 yielded more successful results.





## Dermoskopik Görüntülerde Lezyon Bölütleme İşlemlerinde K-ortalama Kümeleme Algoritmasının Kullanımı

Sümeyya İLKİN<sup>1,\*</sup> Oktay AYTAR<sup>2</sup> Tuğrul Hakan GENÇTÜRK<sup>3</sup> Suhap ŞAHİN<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Kocaeli University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 41001, İzmit/KOCAELİ

<sup>2</sup>Bolu Abant İzzet Baysal University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 14030, Gölköy/BOLU

### Öz

Melanom cilt kanserinin erken evrelerinde yapılan teşhisler, iyileşme prognozuna olan etkilerinden dolayı hayati önem taşımaktadır. Yapılan bu teşhisler büyük oranda cildin görsel değerlendirilmesiyle yapılmaktadır. Dolayısıyla, yapılan bu görsel değerlendirme sonucu konulan teşhis çoğunlukla doktorların uzmanlığına bağlı olduğu için, subjektif bir değerlendirme olmaktadır. Yapılan bu çalışmada, doktorlar tarafından konulan teşhislerdeki doğruluk oranlarını artırmak için cilt görüntülerindeki lezyon bölgelerinin bölütleme işlemi K-ortalama kümeleme algoritması ile yapılmaktadır. Algoritmada, K merkezi sayısı 2 ve 4 değerleri seçilerek sistem test edilmektedir. Test aşamasında özel bir melanom veri seti kullanılmıştır. Elde edilen değerlerin analiz işlemleri, Tepe Sinyali Gürültü Oranı (PSNR) ve Korelasyon Katsayısı (CC) metrikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmanın performansı, daha önce tarafımızca gerçekleştirilen Canny kenar belirleme ve ortalama kayma algoritmaları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan bölütleme işleminde, merkez sayısı 4 seçilen K-ortalama kümeleme algoritmasında en yüksek PSNR değeri 17,1591dB olarak tespit edilmiştir. Metrik sonuçlar incelendiğinde, K-ortalama kümeleme algoritmasında merkez sayısı 4 olarak seçildiğinde elde edilen sonuçların daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

### Use of K-Means Clustering Algorithm for Lesion Segmentation in Dermoscopic Images

### Abstract

The diagnosis of melanoma skin cancer in the early stages is of vital importance owing to the fact that their effects on the prognosis of recovery. The made of these diagnoses are mostly done with visual evaluation of the skin. Therefore, the stated diagnosis of as a result of visual evaluation of the skin is a subjective assessment that because it depends on the doctor's expertise. In this study, the segmentation of lesion regions in skin images is performed with K-mean clustering algorithm in order to increase the accuracy of diagnosis made by doctors. In the algorithm, the system is tested by selecting K center number 2 and 4 values. A special melanoma data set has been used during the testing. The analysis of the obtained values have been realized using Peak Signal Noise Ratio (PSNR) and Correlation Coefficient (CC) metrics. The performance of this study was evaluated by comparing Canny edge detection and Mean shift algorithm previously implemented by us. In this segmentation process, the selected center number is 4 in the K-average clustering algorithm and in this situation the highest PSNR value is 17,1591dB. According to the metric results, it was observed that the segmentation performed by using the K-mean clustering algorithm which has selected center number equals to the 4 yielded more successful results.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 26/09/2019  
Düzeltilme: 08/02/2020  
Kabul: 08/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Medikal Görüntü İşleme  
Melanom Cilt Kanseri  
Lezyon Bölütleme  
K-Ortalama Kümeleme Algoritması  
Ortalama Kayma Algoritması  
Canny Kenar Belirleme Algoritması

### Keywords

Medical Image Processing  
Melanoma Skin Cancer  
Lesion Segmentation  
K-Means Clustering Algorithm  
Mean Shift Algorithm  
Canny Edge Detection Algorithm

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Melanom, deriye rengini veren melanosit hücrelerde başlayan ve erken evrelerde teşhis edildiğinde tedavi şansı %70'lere ulaşan bir cilt kanseri türüdür. Son 30 yılda ülkemizde görülen melanom vakaları %237 oranında artmıştır [1, 2]. Melanom teşhisleri büyük oranda cildin patolojik görsel değerlendirilmesi ile yapılmaktadır. Fakat bu değerlendirme çoğunlukla doktorların gözlemlerine dayandığı için subjektif

olmaktadır. Günümüzde doktorlar cildin görsel değerlendirmesini dermatoskop adı verilen cihazları kullanarak yapmaktadırlar [3]. Çıplak gözle yapılan muayenelerde melanom vakalarında erken evre tanı şansı %60 iken, sayısal dermatoskop kullanılarak yapılan incelemelerde bu oran %90'lara çıkmaktadır [2]. Dolayısıyla vakalardaki doğru teşhis oranlarını artırmak için bilgisayar destekli sistemler kullanılmaya başlanmıştır ve cilt görüntülerindeki lezyon bölgelerinin bölütlenmesinde de sıklıkla kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kanser bölgelerinin bölütlenmesi alanında pek çok metot ve yöntem ile çalışıldığı gözlemlenmektedir. Alsmadi [4] bu çalışmada, çene tümörünü erken evrelerinde teşhis etmek için panoramik röntgen görüntülerindeki çene lezyonlarının bölütlenmesini gerçekleştirmiş olup, çene görüntüsünü bölütlere ayırmak ve çene lezyonlarının teşhisinde yardımcı olabilecek panoramik X-ışını görüntülerinde çene lezyon bölgesini tespit etmek için Melez Bulanık C-Ortalama ve Nötrosifik yaklaşımları kullanmıştır. Yapılan bu çalışmada, önerilen yaklaşımın performansını ve verimliliğini farklı açılardan değerlendirmek için alan hata metrikleri kullanılmış olup, doğruluk ve verimliliğini değerlendirmek için de özgüllük, duyarlılık ve benzerlik analizleri yapılmıştır. Önerilen yaklaşım, Hibrit Ateşböceği Algoritması ve Yapay Arı Kolonisi ile Bulanık C-Ortalama algoritması birlikte kullanılarak yapılan çalışmaların karşılaştırılması yapılmış ve FP (Yanlış Pozitif) oranı % 6.1, TP (Doğru Pozitif) oranı % 90, özgüllük oranı 0.9412, duyarlılık oranı 0.9592 ve benzerlik oranı 0.9471 olarak verilmiştir.

Li ve arkadaşları [5] bu çalışmada, BT görüntülerindeki karaciğer alanlarını otomatik bölütlemek için bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem üç adımdan oluşmaktadır. İlk adımında, temel bileşen analizine dayanarak istatistiksel bir şekil modeli oluşturulmuş ve giriş görüntüsü eğrilik anizotropik difüzyon filtrelemesi kullanılarak yumuşatılmıştır. İkinci aşamasında, ortalama şekil modeli, bir test görüntüsünde kaba bir pozisyon elde etmek için eşikleme ve öklid mesafesi dönüşümü kullanılarak hareket ettirilmiştir. Son olarak, karaciğer yüzeyini doğru bir şekilde tespit etmek için, giriş görüntülerinin ve başlangıç yüzeyinin özelliklerini ve karşılıklı ilişkilerini etkili bir şekilde bütünleştiren deforme olabilen bir grafik kesimi elde edilmiştir. Önerilen yöntemin, deney sonuçları ile karaciğer yüzeyinin tespiti için etkili ve başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Ahn ve arkadaşları [6], bu çalışmada dermoskopik görüntülerin doğal özelliklerinden yararlanmak için yeni bir otomatik saliency tabanlı cilt lezyonu bölütleme yöntemi önermişlerdir. Önerilen çalışmada, çevre bölgelerden gelen ince kontrast ayırmacılığının, görüntü arka planlarına karşı seyrek yapılanma hatalarının ölçülmesinin göze çarpma tespiti yoluyla aşılabileceği gösterilmiştir. Adaptif eşikleme, Chan bazlı seviye seti ve ekilen bölge yetiştiriciliği içeren lezyon bölütleme için belirlenmiş yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek sonuçlar verdiği ve en iyi genel ortalamaya (%91,66) ve en iyi maksimum (%97,52) / minimum (%39,18) hassasiyete sahip olduğu görülmüştür.

Abbas ve arkadaşları [7] tarafından yapılan bu çalışmada, dermoskopik görüntü kalitesinin artırılması için, bölütlemeye önce Spline ve BSpline metotları birleşiminin kullanılmasını önermişlerdir. Uygulanan bu metodun başarı oranını artırdığı ve 70 tane dermoskopik görüntü üzerinde yapılan çalışmada başarı oranının %97,21 olarak hesaplandığı belirtilmiştir.

Huang ve arkadaşları [8] tarafından yapılan bu çalışmada, meme ultrason görüntüleri için yeni bir otomatik bölütleme şeması önerilmiştir. İlk olarak, meme ultrason görüntüsündeki lekeleri azaltmak için toplam varyasyon modeli kullanılmış, ardından filtrelenmiş görüntüyü çok sayıda alt bölgeye ayırmak için bölgesel istatistiklerden yararlanan grafik tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Özellik çıkarımı, özellik seçimi ve sınıflandırma içeren tümör bölgelerini tanımak için bir nesne tanıma yöntemi kullanılmıştır. Son olarak, tümörler olarak bilinen bölgelerin konturlarını daraltmak için aktif bir kontur modeli kullanılmıştır. Ultrason görüntüleri için geliştirilmiş olan hibrit bir otomatik bölütleme yöntemiyle karşılaştırıldığında, önerilen yöntem daha iyi performans sağladığı görülmüştür.

Wantanajittikul ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmada; yanma yaralanmalarında meydana gelen yanıkların görüntülerinden yararlanılarak, ilk değerlendirmeyi yapma yeteneğine sahip otomatik bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin yanık görüntü bölütleme kısmında, yanık yara alanını sağlıklı deriden ayırmak için Cr-transformasyonu, Luv transformasyon ve bulanık c-ortalama kümeleme tekniği kullanılmış olup bölütleme hatalarını azaltmak için de matematiksel morfoloji uygulanmıştır. Yanık derecesinin tanımlanması ve özellik vektörlerini çıkarmak için h-dönüşümü ve doku analizi kullanılmış olup, yanık derecesini belirlemek için de destek vektör makinesi (SVM) uygulanmıştır. Elde edilen sınıflandırma



sonuçları, Bayes ve K'nin en yakın komşu sınıflandırıcıları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen bölütleme algoritmasının, renkli yanık görüntüleri için iyi sonuçlar verdiği deneysel sonuçlarda görülmüştür.

Haider ve arkadaşları [10] tarafından yapılan bu çalışmada; HSI renk uzayı, bölütleme, ölçütleme ve ANN-K ortalama kümeleme yöntemleri kullanılarak, cilt yaralarının iyileşip iyileşmediğini belirleyen bir algoritma gerçekleştirilmiştir. Önerilen çalışmanın başarı oranı da %89'dur.

Bu çalışmada, cilt görüntüleri üzerinde melanom lezyonlarının bölütleme işlemi K-ortalama kümeleme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kullanılan kümeleme algoritması için 2 farklı merkez değeri seçilerek elde edilen sonuçlar PSNR ve CC metrikleri kullanılarak analiz edilmektedir. Yapılan bu çalışma, ön çalışma niteliğinde olduğu için, analiz işlemlerinde kullanılan doğruluk ve verimlilik gibi değerler elde edilememiş olup, çalışmanın verimliliğini ölçmek için PSNR ve CC metrik değerleri kullanılmıştır. Aynı zamanda, algoritma çalışma süreleri de hesaplanmaktadır. Elde edilen değerler kullanılarak en efektif sonuçları veren merkez sayısı tespit edilmektedir.

Çalışmanın organizasyonu şu şekildedir; 2. bölümde, önerilen sistem ve bu çalışmada kullanılan yöntem anlatılmaktadır. 3.bölüm, elde edilen deneysel sonuçları ve analiz işlemlerini içermektedir. Son olarak 4.bölüm de ise sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

## 2. ÖNERİLEN SİSTEM (PROPOSED SYSTEM)

Bu çalışmada bir veri kümesinden alınan melanom tipte cilt kanserli lezyonların bulunduğu görüntüler üzerinde, lezyon bölütleme işlemi K-ortalama kümeleme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sistemin sözde kodu Şekil 1'de verilmektedir.

Başlat:	Görüntü aç
	Görüntü boyutunu değiştir
	Görüntü tipini np.float32 tipine dönüştür
	K-ortalama için merkez sayısı (küme sayısı) ata
	Ortalama değerleri kullanarak merkezleri oluştur
	Her bir merkez için yeni ortalama değeri ata
	Elde edilen merkezleri uint8 tipine dönüştür
	Görüntüyü merkezlerin renk değerlerini kullanarak düzleştir
	Bölütlenen görüntünün boyutunu değiştir
Bitir:	Yeni görüntüyü kaydet

**Şekil 1.** Sistem sözde kodu

Sözde kod incelendiğinde görüntü üzerinde bölütleme işlemine geçilmeden önce sistem çalışma süresinin azaltılması için yüksek çözünürlüklere sahip olan görüntülerde boyut küçültme işlemi yapılmaktadır.

### 2.1. K-ortalama Kümeleme Algoritması (K-Means Clustering Algorithm)

En çok tercih edilen kümeleme algoritmalarından biri olan K-ortalama kümeleme algoritması 1967 yılında J.B. MacQueen tarafından geliştirilmiştir [11]. Algoritmada kümeleme işlemi, girişte verilen merkez sayısına, n adet veri nesnesinden oluşan bir veri kümesini bölerek yapılmaktadır. Veri nesnesinde yer alan veriler sadece bir kümeye ait olmaktadır, küme kesişimine izin verilmemektedir [12].

Algoritmanın çalışma mantığı aşağıdaki gibidir [13];

- K merkez sayısını giriş parametresi olarak al
- Rastgele K adet merkez noktası seç
- Her veri ile rastgele belirlenen merkez noktaları arasındaki uzaklığı hesaplayarak veriyi merkez noktasına olan uzaklığı en az olacak şekilde bir kümeye ata
- Her küme için yeniden bir merkez noktası seç
- Yeni merkez noktalarına göre kümeleme işlemi yap
- Bu işleme kriter fonksiyonuna ulaşılan kadar devam et.

K-ortalama kümeleme algoritmasında kriter fonksiyonu olarak, karesel hata kriteri (the error sum of squares SSE) kullanılmaktadır. Algoritma sonucu oluşan kümelerden en düşük SSE değerine sahip kümeleme sonucunu veren kümeler, en iyi sonuç olarak kabul edilmektedir. SSE değeri Denklem 1 ile hesaplanmaktadır [14, 15].

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x=c_i} dist^2(m_i, x) \quad 1$$

Denklem 1’de  $m_i$  merkezleri,  $c_i$  ise i. merkezde bulunan nesnelerin kümesini göstermektedir. Nesnelerin buldukları kümenin merkez noktalarına olan uzaklıklarının karelerinin toplamı bu eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

### 3. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Çalışma kapsamında geliştirilen sistemin test işlemi için MED-NODE sisteminden alınmış 70 adet makroskopik melanom cilt kanseri görüntüsünden oluşan MED-NODE sisteminde kullanılmak üzere oluşturulan özel bir veri kümesi kullanılmıştır [16]. Kullanılan veri kümesi melanom alanları tespit edilmiş teşhisi konmuş görüntülerden oluşmaktadır. Dolayısıyla geliştirilen sistemle sadece lezyon alanlarının sayısal olarak elde edilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde K-ortalama kümeleme algoritmasında kullanılan K merkez değeri seçiminin neye dayandırılarak yapıldığına dair açıklama veya gerekçelere çok rastlanmamaktadır [17]. Yapılan seçimler genellikle subjektif olmakla birlikte, eğer küme sayısı belirli değil ise deneme yanılma metoduna sıklıkla dayandırılmaktadır [18]. Bu yüzden, kullanıcıların k merkez değerini çoğunlukla alandaki ve kullandıkları veri kümeleri üzerindeki deneyimlerine göre seçtiği gözlemlenmektedir [19]. Melanom alanlarının tespiti çalışmalarında kullanılan görüntülerde ağırlıklı olarak iki küme bulunmaktadır. Bu kümelerden arka plan olarak seçilen cilt kısmında ve ön plan olarak seçilen melanomlu alanlarda renk ağırlıkları birbirine yakın değerler vermektedir. Bu nedenle yapılan bu çalışma kapsamında, kullanılan K-ortalama kümeleme algoritmasında k merkez değerlerinin; alınan makroskopik görüntülerde sonuçları etkileyecek ve görüntü oluşturabilecek arka plan değerleri çok fazla olmadığı için, 2 ve 4 olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

K merkez değerleri sırasıyla 2 ve 4 seçilerek, tüm görüntüler ayrı ayrı kullanılarak sistem test edilmiştir. Sistemin etkinliğini ölçmek için, elde edilen değerler PSNR ve CC metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir. CC yöntemi, değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil etmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar -1 ile +1 arasındadır. Negatif değerler negatif ilişki, pozitif değerler pozitif bir ilişki, değerler 1 veya -1 olduğunda ise mükemmel bir ilişki olduğunu göstermektedir. CC, Denklem 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.


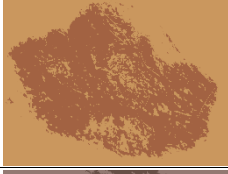

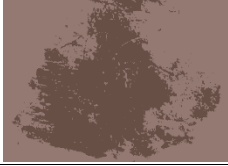
$$C = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad 2$$

Denklem 2’de  $cov(X, Y)$  işleme sokulan her iki görüntünün kovaryans değerini,  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  sırasıyla X ve Y görüntülerinin standart sapmasını ifade etmektedir [20]. PSNR metodu, bir sinyalin maksimum gücü ile karelerinin ortalamasının beklenen değeri arasındaki oranı vermektedir. PSNR oranının yüksek çıkması görüntünün bozulma gürültüsüne oranla daha güçlü olduğunu göstermektedir [21]. PSNR değeri Denklem 3 kullanılarak elde edilmektedir [3].


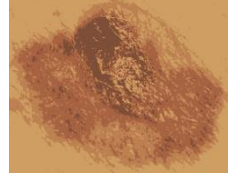


$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{MSE}{S^2} \quad 3$$

Denklem 3’de gösterilen  $S^2$ , görüntüde yer alan en büyük pikseli ifade etmektedir. Tablo 1’de K merkezi 2 kullanılarak elde edilen sonuçlardan en yüksek ve en düşük PSNR değerini veren görüntüler ve PSNR değerleri verilmektedir.

**Tablo 1.** K=2 için En Düşük ve En Yüksek PSNR Değerlerini Veren Sonuçlar

ID	Çözünürlük	PSNR (dB)	Orijinal	Sistem Çıktısı
65	1153 x 1509	7,7185		
25	641 x 337	16,5451		

**Tablo 2.** K=4 için En Düşük ve En Yüksek PSNR Değerlerini Veren Sonuçlar

ID	Çözünürlük	PSNR (dB)	Orijinal	Sistem Çıktısı
65	1153 x 1509	7,7291		
25	641 x 337	17,1591		

**Tablo 3.** K=2 ve K=4 Merkezlerinin CC, PSNR Metrik Sonuçları ve Algoritma Çalışma Süreleri

Merkez Sayısı	CC	PSNR (dB)	Süre (Sn.)
2	0,7503	16,5451	0,1543
	0,7568	16,4836	0,4209
	0,8526	15,9543	0,8066
	0,8412	15,8470	1,8881
4	0,8948	<b>17,1591</b>	1,0609
	0,8995	17,0413	1,0016
	0,9573	17,0173	0,8475
	0,8991	16,6146	0,9403

Tablo 2’de K merkezi 4 kullanılarak elde edilen sonuçlardan en yüksek ve en düşük PSNR değerini veren görüntüler ve PSNR değerleri verilmektedir. Tablo 1 ve 2 incelendiğinde, K merkez değeri ikiden dörde çıkarıldığında yüksek çözünürlüklü görüntülerde PSNR değerinin yavaş arttığı, düşük çözünürlüklü görüntülerde ise 0,61 dB gibi yüksek bir artış yaşadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 3’te ise K merkezi 2 ve 4 ile elde edilen sonuçlardan en yüksek PSNR değerine sahip 4 görüntünün PSNR, CC ve süre değerleri gösterilmektedir. Tablo 3 incelendiğinde yüksek PSNR değerini veren sonuçlar K merkez sayısı 4 seçildiğinde elde edilmektedir. Ayrıca CC değerlerinin de K merkez değeri arttırıldığında 1’e yaklaştığı tespit edilmektedir. Görüntünün çözünürlüğüne ve seçilen K merkez sayısına bağlı olarak

algoritma çalışma sürelerinin değiştiği gözlemlenmektedir. Fakat yüksek PSNR değerinin sistem başarımına olan katkısı düşünüldüğünde sistemin makroskopik cilt görüntüleri üzerinde lezyon bölütleme işlemlerinde K merkez değeri 4 seçilerek kullanılması gerektiği tespit edilmektedir.


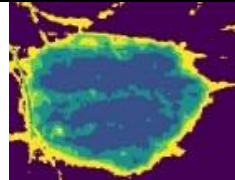



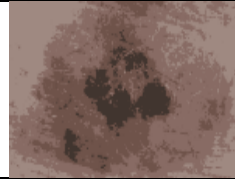
Yapılan bu çalışmanın verimliliği, daha önce tarafımızca yapılan iyileştirilmiş Canny kenar belirleme algoritması [22] ve ortalama kayma algoritması [23] ile karşılaştırılarak elde edilmiştir. Karşılaştırma yapılan bu üç algoritmada da aynı veri kümesi ve aynı metrikler kullanılmıştır. Tablo 3’ de gözlemlendiği gibi, K=4 değeri 2’den daha başarılı sonuçlar vermektedir. Dolayısıyla önceki çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar K merkez değeri 4 seçilerek yapılmıştır. Tablo 4’te, test aşamasında kullanılan bazı görüntülere ait işlem süresi, PSNR ve CC metrik değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.** Görüntülerin İşlem Süresi, PSNR ve CC Metrik Sonuçları






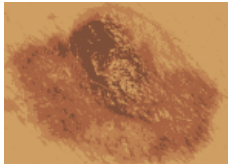
ID	Ortalama Kayma Alg.			İyileştirilmiş Canny Kenar Belirleme Alg.			Önerilen (K=4)		
	Süre (Sn.)	PSNR (dB)	CC	Süre (Sn.)	PSNR (dB)	CC	Süre (Sn.)	PSNR (dB)	CC
1	39.2	7.7	0.70	26.8	3.9	0.008	0.33	10.9	0.91
8	44.0	7.8	0.63	28.0	3.7	-0.023	0.43	<b>12.88</b>	<b>0.95</b>
57	15.4	7.4	0.14	17.1	3.5	0.018	<b>0.26</b>	8.99	0.89

Tablo 4 incelendiğinde, en başarılı sonuçların K merkez değeri 4 seçildiğinde elde edildiği ve aynı zamanda önerilen sistemin en yüksek PSNR değerine, sistem çalışma süresi ve korelasyon katsayısı bakımından da en efektif değerlere sahip olduğu görülmektedir. Tablo 5’te iyileştirilmiş Canny kenar belirleme, ortalama kayma algoritmaları ve önerilen sistemde en yüksek PSNR değerini, Tablo 6’da en düşük PSNR değerini veren görüntüler gösterilmektedir. Tablo 5 ve Tablo 6 birlikte incelendiğinde en başarılı sonucun önerilen sistemle alındığı gözlemlenmektedir.

**Tablo 5.** Test Aşamasında Kullanılan Algoritmaların En Yüksek PSNR Değerini Veren Görüntü Sonuçları

Metot	PSNR (dB)	Orijinal Görüntü	Sistem Çıktısı
Ortalama Kayma Alg.	11,78		
Canny Kenar Blr. Alg.	7,60		
Önerilen (K=4)	<b>17,15</b>		

**Tablo 6.** Test Aşamasında Kullanılan Algoritmaların En Düşük PSNR Değerini Veren Görüntü Sonuçları

Metot	PSNR (dB)	Orijinal Görüntü	Sistem Çıktısı
Ortalama Kayma Alg.	4,97		
Canny Kenar Blr. Alg.	2,59		
Önerilen (K=4)	7,72		

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Melanom cilt kanseri, erken teşhislerde oldukça yüksek tedavi şansının olduğu cilt kanseri türleri arasında bulunmaktadır. Agresif bir şekilde ilerleyen melanomun teşhisi çoğunlukla cilt üzerinde yapılan görsel incelemelerle yapılmaktadır. Dolayısıyla yapılan değerlendirmeler subjektif olmaktadır. Bu çalışmanın amacı doğru teşhis oranlarını artırmak için, lezyon alanlarının sayısal olarak elde edilmesi işlemidir. Bu işlemi gerçekleştirmek için irdelenen problem, kümeleme algoritması kullanılarak ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen lezyon bölgeleri ve lezyon olmayan bölgeler renk değerlerine göre kümelenebilmektedir. Renk değerlerine göre elde edilen kümeler, bizlere ileriki çalışmalarda kullanılmak üzere gerekli lezyon bölge sınırlarını ve lezyonların renk bilgilerini vermektedir.

Yapılan bu çalışmada dermoskopik görüntülerde lezyon bölütleme işlemlerinde temel bölütleme algoritması olarak K-ortalama kümeleme algoritması kullanılmış ve K merkezi sayısı (küme sayısı) 2 ve 4 değerleri seçilerek sistem test edilmiştir. Kümeleme algoritması olarak, literatürde yapılan çalışmalarda çok sık kullanılması ve başarılı sonuçlar vermesinden dolayı K-ortalama kümeleme yöntemi seçilmiştir. Elde edilen değerlerin analiz işlemleri, her bir merkez için ayrı ayrı PSNR ve CC metrikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda sistemin çalışma süreleri de hesaplanmıştır. Çalışmanın başarımını ölçmek için sistem iyileştirilmiş Canny kenar belirleme algoritması ve ortalama kayma algoritması kullanılarak elde edilen metrik sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup yüksek PSNR değerlerinin k merkez sayısı 4 seçildiğinde elde edildiği tespit edilmiştir. Yüksek PSNR değerinin sistem başarımını arttırdığı ve aynı zamanda seçilen merkez sayısı ile doğru orantılı olarak algoritma çalışma sürelerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

Metrik sonuçlar incelendiğinde, yapılan bu çalışmada dermoskopik görüntülerde lezyon bölütleme işlemlerinde temel bölütleme algoritması olarak K-ortalama kümeleme algoritması kullanıldığında ve merkez sayısı 4 seçildiğinde makroskopik melanomlu cilt görüntüleri üzerindeki lezyon bölütleme işleminin daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Gelecekteki çalışmada, bu çalışmadan elde edilen kümelerin bir sınıflama algoritmasında kullanılarak sistemin lezyon bölütleme işlemini akıllı bir şekilde gerçekleştirmesi beklenmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Çoban, L. Cilt (Deri) Kanseri Belirtileri, Tedavisi ve Korunma Yöntemleri. <https://www.memorial.com.tr/saglik-rehberleri/cilt-deri-kanseri-belirtileri-tedavisi-ve-korunma-yontemleri/>. (Ziyaret Tarihi: 15.09.2019).
- [2] Ganster, H., Pinz, P., Rohrer, R., Wildling, E., Binder, M., & Kittler, H. (2011). Automated Melanoma Recognition. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 20(3), 233-239.
- [3] Altuncu, M.A., Gülağız, F.K., Hangisi, F.S., & Şahin, S. (2017). Performance Analysis of Image Restoration Techniques for Dermoscopy Images. *International Journal of Applied Information Systems*, 11(8), 15-19.
- [4] Alsmadi, M. K. (2018). A hybrid Fuzzy C-Means and Neutrosophic for jaw lesions segmentation. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 697-706.
- [5] Maglogiannis I., Pavlopoulos S., & Koutsouris D. (2005). An integrated computer supported acquisition, handling, and characterization system for pigmented skin lesions in dermatological images. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 9(1), 86-98.
- [6] Pires I.M., & Garcia N.M. (2015). Wound Area Assessment using Mobile Application, In *Biodevices*, Lisbon, Portugal, 271-282.
- [7] Abbas A.A., Guo X., Tan W.H., & Jalab H.A. (2014). Combined spline and B-spline for an improved automatic skin lesion segmentation in dermoscopic images using optimal color channel. *Journal of medical systems*, 38(8), 80.
- [8] Celebi M.E., Kingravi H.A., Iyatomi H., Aslandogan A.Y., Stoecker W.V., Moss R.H., Malters J.M., Grichnik J.M., Marghoob A.A., Rabinovitz H.S., & Menzies S.W. (2008). Border detection in dermoscopy images using statistical region merging. *Skin Research and Technology*, 14(3), 347-353.
- [9] Wantanajittikul, K., Auephanwiriyakul, S., Theera-Umpon, N., & Koanantakool, T. (2012). Automatic segmentation and degree identification in burn color images, *The 4th 2011 Biomedical Engineering International Conference*, 169-173.
- [10] Haider A., Alhashim M., Tavakolian K., & Fazel-Rezai R. (2016). Computer-assisted image processing technique for tracking wound progress. In *Electro Information Technology (EIT), 2016 IEEE International Conference*, Grand Forks, ND, USA, 0750-0754.
- [11] MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281-297.
- [12] Sarıman, G. (2011). Veri madenciliğinde kümeleme teknikleri üzerine bir çalışma: k-means ve k-medoids kümeleme algoritmalarının karşılaştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3).
- [13] Cebeci, Z., Yıldız, F., & Kayaalp, G. T. (2015). K-ortalamlar kümelemesinde optimum K değeri seçilmesi. 2. Ulusal Yönetim Bilişim Sistemleri Kongresi, 8-10.
- [14] Işık, M., & Çamurcu, A.Y. (2007). K-means, k-medoids ve bulanık c-means algoritmalarının uygulamalı olarak performanslarının tespiti. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(11), 31-45.
- [15] Pang-Ning Tan, P. N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). *Introduction to Data Mining*, Addison Wesley Publishers, Boston.

- [16] Giotis, I., Molders, N., Land, S., Biehl, M., Jonkman, M.F., & Petkov, N. (2015). MED-NODE: A computer-assisted melanoma diagnosis system using non-dermoscopic images. *Expert Systems with Applications*, 42, 6578-6585.
- [17] Pham, D. T., Dimov, S. S., & Nguyen, C. D. (2005). Selection of K in K-means clustering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1), 103-119.
- [18] Dinçer, E., & N. Duru. (2006). Gırtlak Kanseri Ameliyat Verilerinin K-means Yöntemiyle Analizi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 2(1).
- [19] Cebeci, Z., Yıldız, F., & Kayaalp, G.T. (2015). K-Ortalamlar Kümelemesinde Optimum K Değeri Seçilmesi. *2. Ulusal Yönetim Bilişim Sistemleri Kongresi Bildiriler Kitabı*, 231-242.
- [20] Lee, R. J., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59-66.
- [21] Avcı, D. (2015). İdrar imgelerinden hücrelerin tanınması ve sayımı için steganografik yöntemler tabanlı güvenli bir karar destek sistemi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [22] İlkin, S., Gülağız, F.K., Hangişi F.S., & Şahin, S. (2018). Computer Aided Wound Area Detection System for Dermatological Images. Cham: Springer: *Trends and Advances in Information Systems and Technologies. WorldCIST'18 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 746, 820-830.
- [23] İlkin, S., Tayfur, T., & Şahin, S. (2018). Ortalama Kayma Algoritması Kullanılarak Dermatolojik Görüntüler Üzerindeki Melanomlu Alanların Tespiti. *IMASCON Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi 2018*, 780-787.



## Investigation Of Microhardness Properties Of MgB<sub>2</sub> Produced By Using Carbon Doped Boron By CVD Method

Naki KAYA<sup>1</sup>, Şükrü ÇAVDAR<sup>2</sup>, Haluk KORALAY<sup>3,\*</sup> 

<sup>1</sup> Opticianry Program, Vocational School, T.C. İstanbul Arel University, İstanbul, Turkey

<sup>2,3</sup> Superconductivity and Thermal Analysis Laboratory (STAL), Department of Physics, Faculty of Science, Gazi University, Ankara, Turkey

### Article Info:

Research article  
 Received: 03/01/2020  
 Revision: 19/02/2020  
 Accepted: 19/02/2020

### Highlights

- Carbon nanotubes
- Superconductivity
- Microhardness

### Keywords

CVD  
 MgB<sub>2</sub>  
 RISE

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the CVD unit shown in Figura A in Ankara University Chemical Engineering Nanotechnology Laboratory was used. Amorphous boron powders were used as a source of acetylene hydrocarbon and carbon was added by CVD method for 90 minutes. Then, magnesium was added to the carbon doped amorphous boron powders at Gazi University Thermal Analysis Laboratory and mixed in an automatic mixer for 60 minutes. The powders were sintered under closed argon gas at determined temperatures and sample was obtained. Microhardness analyzes of the obtained samples were made.



Figure A. CVD unit

**Purpose:** In this study, it is aimed to improve the current mechanical properties of MgB<sub>2</sub>, which is used as a superconducting material, and to increase its usage area.

**Theory and Methods:** MgB<sub>2</sub>, which shows superconductivity, has been produced with quite different production methods in order to improve its existing physical properties. One of them is to add different materials into the structure by adding. In this study, carbon was added to amorphous boron powders by CVD method. MgB<sub>2</sub> was produced by mixing carbon-doped boron with magnesium classical solid-state reaction method. Vickers method was used for microhardness measurements.

**Results:** While all of the samples show RISE behavior, contribution rate has been found to soften the material.

**Conclusion:** As a result of the measurements, it was determined that the plane peak of MgB<sub>2</sub> (1 0 1) in all samples was seen at 43,00°, the sharpest peak belonged to the C sample, the most successful approach in explaining the microhardness character of the samples was the Meyer Approach and IIC Approach.



## CVD Yöntemi ile Karbon Katkılanmış Bor Kullanılarak Üretilen MgB<sub>2</sub>'nin Mikrosertlik Özelliklerinin İncelenmesi

Naki KAYA<sup>1</sup>, Şükrü ÇAVDAR<sup>2</sup>, Haluk KORALAY<sup>3,\*</sup> 

<sup>1</sup>T.C. İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik Programı, İstanbul

<sup>2,3</sup>Gazi Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Süperiletkenlik ve Termal Analiz Laboratuvarı (STAL), ANKARA

### Öz

Bu çalışmada ülkemiz için stratejik bir öneme sahip olan bor elementi ile elde edilen ve teknolojik açıdan çok geniş ölçekli bir kullanım alanına sahip olan magnezyum diborür, kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile elde edilen karbon katkılanmış bor kullanılarak üretilmiştir. Öncelikle amorf nano bor tozları belirlenen optimum şartlarda, CVD yöntemi ile 90 dakika boyunca 700 °C'de etilen hidrokarbon kaynağı ve inert gaz akışı altında karbon katkılanmış. Karbon katkılanan amorf nano bor tozları belli stikiyometrik oranlarda tartılan magnezyum tozları ile karıştırıcıda karıştırılmıştır. Elde edilen karışım 2,5 gramlar halinde tartılıp manuel presleme yöntemi ile 4 adet tablete dönüştürülmüştür. Her bir tablet zirkonyum folyoya sarılarak, kapalı argon gazı altında 700-800-900 ve 1000 °C sıcaklıklarda fırınlanmıştır. Elde edilen numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre üretilen numunelerde MgB<sub>2</sub>'ye ait karakteristik piklerin baskın bir şekilde görüldüğü ve numunelerin mikro sertlik özelliklerini en iyi açıklayan modelin, Meyer yaklaşımı ve IIC (Çentik Kaynaklı Yarılma) yaklaşımı olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm numunelerde RISE (Ters Çentik Boyut Etkisi) davranışının ortaya çıktığı saptanmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 03/01/2020  
Düzeltilme: 19/02/2020  
Kabul: 19/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Kimyasal buhar biriktirme  
Magnezyum diborür  
Ters çentik boyutu etkisi

### Keywords

CVD  
MgB<sub>2</sub>  
RISE

### Investigation Of Microhardness Properties Of MgB<sub>2</sub> Produced By Using Carbon Doped Boron By CVD Method

### Abstract

In this study, magnesium diborite which is obtained with boron element which is of strategic importance for our country and which has a very wide usage area in technological terms, is produced by using carbon doped boron obtained by chemical vapor deposition method. First of all, amorphous nano boron powders were doped with CVD method at 700 °C for 90 minutes under the source of ethylene hydrocarbon and inert gas flow. The amorphous nano boron powders doped in carbon were mixed with magnesium powders weighed in certain stoichiometric proportions in an automatic mixer. The mixture was weighed in 2,5 gs and converted into 4 tablets by manual pressing method. Each tablet was wrapped in zirconium foil and sintered under closed argon gas at temperatures of 700-800-900 and 1000 °C. Structural and mechanical properties of the obtained samples were investigated. According to the results of the analysis, it was seen that the characteristic peaks of MgB<sub>2</sub> were predominant in all samples and the best explaining micro hardness properties of the samples were Meyer approach and IIC (Indentation-Induced Cracking) approach. In addition, RISE (Reverse Indentation Size Effect) behavior was detected in all samples.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1991 yılında karbon nanotüplerin keşfedilmesi ve uygun elektrik, mekanik optik gibi fiziksel özelliklerinin bulunması karbon nanotüplerin kullanım sahasını arttırarak nanoteknolojinin bambaşka bir dalı olarak karşımıza çıkmıştır. Karbon nanotüplerin keşfedilen olumlu yönlerinden sonra, karbon nanotüp sentezleme yöntemleri de geliştirilmeye çalışılmıştır. Gaz fazı işlemleri içeren karbon nanotüp yapılarını üretmek için birkaç yöntem geliştirilmiştir. Karbon nanotüpler, günümüzde yoğun olarak Ark Boşalım, Lazer Aşındırma ve CVD yöntemleri ile üretilmektedir [1-2]. Homojen yapı elde edilebilmesi, karbon nanotüp üretim veriminin yüksek olması (%70), gaz akış hızı, sıcaklık, deney süresi, hidrokarbon kaynağın belirlenmesi gibi deney şartlarının araştırmacı tarafından tayin edilebilmesi, diğer karbon nanotüp üretim metotlarına

kıyasla üretim maliyetleri daha düşük olması, hem tek duvarlı hem de çok duvarlı karbon nanotüp üretimi için elverişli olması, CVD'nin avantajlarından bazılarıdır [3]. Bu olumlu özelliklerinden dolayı bu çalışmada sıcak CVD yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kapsamında hedef numune fırına yerleştirilir, belirlenen hidrokarbon kaynağı ve taşıyıcı gaz akışı altında ısıtılan fırın içerisinde karbonun çökelişi sağlanır. CVD metodunun temeli, karbonca zengin gazların yüksek sıcaklıklarda metal katalizörleri varlığında pirolizi ve açığa çıkan parçalanma ürünlerinin karbon nanotüpe dönüştürülmesidir [4]. Ülkemiz rezervlerinin dünya ihtiyacının çok büyük bir bölümünü karşılaması ile bor elementi bizler için ayrı bir stratejik önem arz etmektedir. Bu çalışmada CVD yöntemi ile elde edilen karbon katkılanmış bor ile  $MgB_2$  üretimi gerçekleştirilmiştir.

1953 yılında keşfedilen  $MgB_2$  bileşiği birçok araştırmaya konu olmuştur. 2001 yılında Akimitsu ve arkadaşlarının,  $MgB_2$ 'nin süperiletken özelliğini keşfetmelerinden sonra ise bu bileşiğe olan ilgi de artmıştır. Basit kristal yapı, metallere ve alaşımlar içerisinde yüksek kritik geçiş sıcaklığına sahip olması, uyum uzunluğunun geniş olması, taneler arası zayıf bağların olmaması, yüksek kritik akım yoğunluğu, düşük anizotropi, yüksek akım taşınması için en uygun tanecikler arası sınırlar, ucuz olması  $MgB_2$ 'nin en önemli avantajlarından [5-6]. Literatür örneklerinde CVD ve klasik katıhal reaksiyon yönteminde kullanılan optimum şartlar incelenmiştir. CVD yönteminde hidrokarbon kaynağı açısından en yaygın olarak metan [7-8], etilen [9], asetilen [10] ve benzen [11] kullanılmaktadır. Chhowalla ve arkadaşları, geliştirilmiş CVD yöntemi ile dikey doğrultuda karbon nanotüp büyütme deneyinde sıcaklığı  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak ayarlamışlardır [12]. Tek duvarlı karbon nanotüplerde CVD işlemi için Kong ve arkadaşları reaksiyon sıcaklığını  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak belirlemişlerdir [13]. Kumar ve Ando, CVD yöntemi ile üretilen karbon nanotüplerin mekanik özelliklerini incelemek için deney sıcaklığının  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında yapılan çalışmaları ele almıştır [14]. Farklı literatür örneklerinde de sıcaklık aralığı CVD için hep bu aralıklardadır.  $MgB_2$  deneyleri esnasında kullanılan sıcaklık değerlerine bakılacak olursa genelde  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında sentezlenebilmektedir [15-16]. Dural ve arkadaşlarının yaptığı bir deneyde yüksek enerjili balonlar ve karbon kaynakları kullanarak elde ettikleri  $MgB_2$  bileşiğinin özelliklerinin incelendiği çalışmada, reaksiyon sıcaklığını  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  seçmişlerdir [17]. Ansari nano Fe katkılı  $MgB_2$ 'nin AC-duyarlılık ölçümleri ile dinamik davranışını incelediği çalışmasında reaksiyon sıcaklığını  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  seçmiştir [18]. Tolendiuly, 2017 yılında yaptığı yüksek argon gazı basıncı altında  $MgB_2$  sentezleme ve analiz çalışmasında reaksiyon sıcaklığını  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında belirlemiştir [19]. Paranthaman karbon katkısının  $MgB_2$  süperiletkeninin fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırdığı çalışmasında reaksiyon sıcaklığını  $890\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak belirlemiştir [20]. Tampieri ve arkadaşları, sıcak presleme ile üretilen  $MgB_2$ 'nin fırınlanma sürecinden nasıl etkilendiğini incelediği çalışmalarında sıcaklık parametresi  $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1190\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında olan ticari  $MgB_2$ 'ler üzerinde araştırma yapmıştır [21]. Tel içinde yöntemi ile üretilen  $MgB_2$ 'de oluşacak gözeneklerin incelendiği bir çalışmada Kim ve arkadaşları  $MgB_2$  sentezini  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında yapmışlardır [22]. 2009 yılında tel içinde yöntemi ile elde edilen  $MgB_2$  numunelerindeki gözenek şekillerinin incelendiği çalışmada Yi ve arkadaşları  $MgB_2$ 'yi  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında üretmişlerdir [23]. Literatür örnekleri göz önünde bulundurularak  $MgB_2$  eldesi için en uygun fırınlanma sıcaklığının bu çalışma için  $700, 800, 900$  ve  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  olmasına karar verilmiştir.

Numuneye uygulanan bir dış yüke karşılık numunenin vermiş olduğu tepkiler ölçülerek malzemenin sertlik yumuşaklık durumu, plastik ve elastik deformasyon olup olmadığı, numunenin RISE veya ISE (çentik boyut etkisi) davranışı gösterdiği gibi özellikleri hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Günümüzde kullanılan mikrosertlik analizleri, Vickers sertliği, Brinell sertliği, Rockwell sertliği, Knoop sertliği, Berkovich sertliği analizleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada ise Vickers sertliği kullanılmıştır. Malzeme üzerinde ciddi hasarlar oluşturmaması, basit ve ucuz maliyetlerle uygulanabilmesi mikrosertlik ölçümleri için avantaj sağlamaktadır. Mikro sertlik ölçümleri Vickers sertlik analizi doğrultusunda, bazı yaklaşım modellerine göre değerlendirilmektedir. Bunların en çok kullanılanları ise Meyer Kanununa göre sertlik analizi, Orantılı numune direnci (PSR) modeline göre sertlik analizi, Hays-Kendall yaklaşımına göre sertlik analizi, Elastik/Plastik deformasyon modeline göre sertlik analizi, Çentik kaynaklı yarıma modeline göre sertlik analizidir.

Bu çalışmada, CVD yöntemi ile karbon katkılanmış bor kullanılarak,  $700, 800, 900$  ve  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de fırınlanarak üretilen  $MgB_2$ 'nin mikrosertlik özellikleri incelenmiştir.  $700, 800, 900$  ve  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de fırınlanarak hazırlanan numuneler sırası ile A, B, C, D olarak isimlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada CVD ve klasik katıhal reaksiyon yöntemi olmak üzere iki farklı deney sürecinden yararlanılmıştır. Öncelikle Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarında, amorf bor tozları belirlenen optimum şartlarda 30-60 ve 90 dakika boyunca karbon katkılanmıştır. Bu işlem için kullanılan optimum şartlar; sıcaklık 700 °C, % 95-97 saflıkta amorf bor tozları (parçacık boyutu<1µm), hidrokarbon kaynağı olarak etilen gazı, taşıyıcı gaz olarak helyum ve hidrojen gazı, taşıyıcı gaz akışını 100 ml/dk, etilen akış hızınının 20 ml/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen 3 farklı sürede karbon katkılanmış bor tozlarının, ODTÜ Merkez Laboratuvarı'na bağlı Polimer Analiz Laboratuvarı (PAL)'ında elementel analizi yapılarak en yoğun birikimin hangi deney süresinde olduğu araştırılmıştır.

Elementel analiz sonucunda en yoğun karbon birikiminin %14,70 ile, 90 dakikalık deney süresince karbon katkılanan bor numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Karbon katkısının artması MgB<sub>2</sub>'nin fiziksel özelliklerini iyileştirdiği bilindiğinden çalışmanın devamında en yoğun karbon birikimi görülen 90 dakikalık CVD deneyi ile elde edilen karbon katkılanmış bor kullanılmıştır. MgB<sub>2</sub> oluşumu için gerekli stikiyometrik oran hesabı yapılarak toplamda 10 g olacak şekilde 5,29 g Mg ve 4,70 g karbon katkılanmış bor karıştırıcı ile 750 rpm'de 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen 10 g toz karışım 2,5 gramlar halinde tartılıp 4 farklı tablete dönüştürülmüştür. Presleme işleminde tozlar belli bir basınç altında sıkıştırılıp 10 dakika boyunca bekletildikten sonra presleme işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen tabletler herhangi bir süblimleşme ve kontaminasyona karşı zirkonyum folyolara sarılarak argon gazı altında kapalı fırın ortamında 700-800-900 ve 1000 °C'de 1 saat boyunca fırınlanmıştır. Fırınlama işlemi sonunda elde edilen 4 farklı MgB<sub>2</sub> numunesinin XRD ve Mikrosertlik analizleri yapılmıştır. Mikrosertlik analizleri, Shimadzu, HVM-2 model dijital mikrosertlik cihazı ile XRD ölçümleri D8 Advanced model XRD cihazı ile dalga boyu λ=1,5418 Å, 40 kV, 30 mA Cu K<sub>α</sub> ışını kullanılarak dakikada 0,02 derece tarayarak 2θ=20°-80° aralığında yapılmıştır.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSION)

### 3.1. Elementel Analiz Sonucu

Bu analiz CVD süreci tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz kütlesi bilenen numuneyi yakarak numunenin barındırdığı yapıları gaz fazına dönüştürüp belli haznelerde toplayarak, kalan numune ve ilk numune arasındaki kütle farkından yararlanıp ölçüm yapmayı temel alır. Yapılan elementel analiz sonucunda yapı içerisinde biriken karbon fazlarının yüzdeliği tespit edilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü gibi yapı içerisinde karbon birikimi CVD deney süresinin artması ile beraber artmıştır. En yoğun birikim 700 °C'de 90 dakikalık CVD deneyinde %14,70 en az birikim ise 700 °C'de 30 dakikalık CVD deneyinde % 5,98 oranı ile karşımıza çıkmaktadır. Karbon birikiminin en yoğun olduğu deney süresi olan 90 dakikalık CVD deneyinde elde edilen karbon katkılanmış bor tozları çalışmanın sonraki basamaklarında kullanılmıştır.

**Tablo 1.** CVD Yöntemi İle Karbon Katkılanan Amorf Bor Tozlarına Biriken C Yüzdeliği

Numune	C (%)
700 °C'de 30 dakikalık deney ile elde edilen numune	5,98
700 °C'de 60 dakikalık deney ile elde edilen numune	7,79
700 °C'de 90 dakikalık deney ile elde edilen numune	14,70

### 3.2. XRD Analizi Sonucu

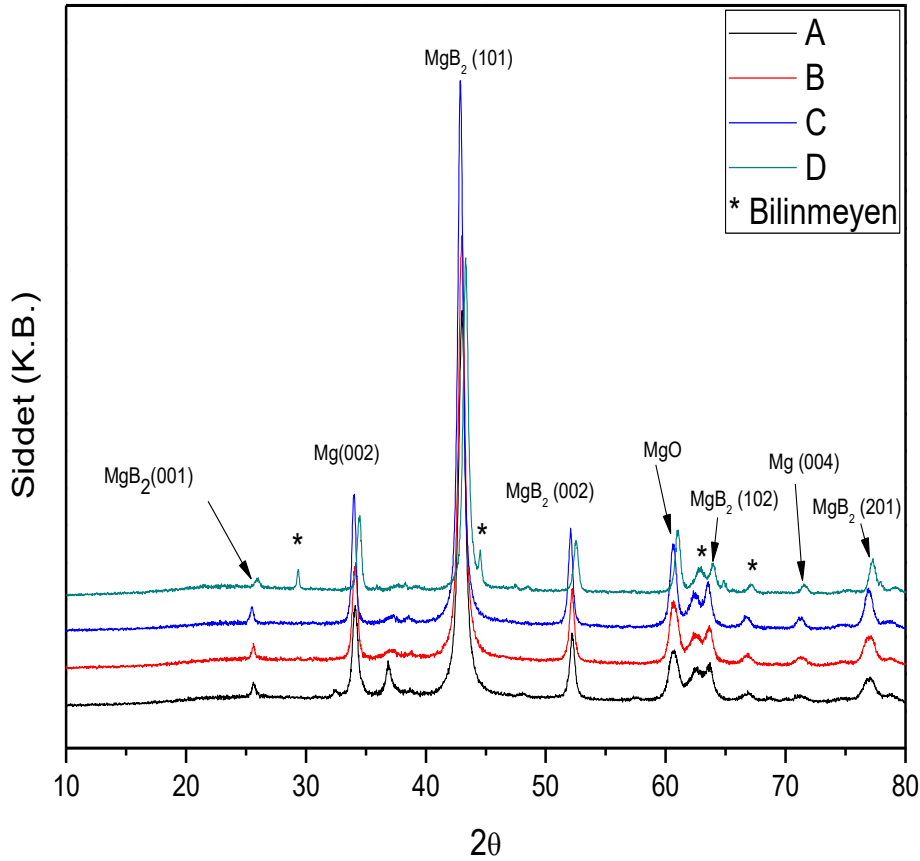
Yapılan XRD analizi sonucunda MgB<sub>2</sub>'ye ait karakteristik düzlem pikleri baskın olarak görülmektedir. Bu durum MgB<sub>2</sub> yapısının oluşmuş olduğunu göstermektedir. Ayrıca 900 °C'de fırınlanarak elde edilen C

numunesine ait XRD desenleri daha keskin ve daha dar olarak görülmektedir. Bu durum yapı oluşumunun düzgün olduğu ve safsızlık atomlarının oranının düşük olduğu anlamındadır. Ayrıca pik keskinliği ve piklerin daha dar olması kristalinitenin artması sonucunu da ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda numunelerin tanecik boyutları Denklem 1.'de verilen Scherrer Denklemi ile hesaplanmıştır.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

1

Burada D; tanecik boyutu (nm), K; Scherrer sabiti (0,9),  $\lambda$ ; x ışını kaynağından gönderilen ışının dalga boyu (0,15418 nm),  $\beta$ ; en şiddetli pikin yarı pik genişliği (FWHM) (radyan) ve  $\theta$ ; pik açısı (radyan) olarak tanımlanmaktadır. Denkleme ait  $\beta$  ve  $\theta$  değerleri, en keskin pik değerine karşılık gelen (1 0 1) düzlem piki kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu A numunesinin tanecik boyutu 13 nm, B numunesinin tanecik boyutu 14 nm, C numunesinin tanecik boyutu 16 nm ve D numunesinin tanecik boyutu ise 17 nm olarak bulunmuştur. Ayrıca D numunesinde tüm piklerde bir miktar kayma gözlenmektedir. Piklerin kayması karbon ve bor atomlarının iyon yarıçaplarının farklı olmasından dolayı, örgü parametresinin azalmasına sebep olduğunu göstermektedir.



**Şekil 1.** 700, 800, 900 ve 1000 °C'de Fırınlanarak Elde Edilen MgB<sub>2</sub> Numunelerinin Xrd Grafiği

Yapının deneyler sonucu oluşturulmuş olduğu sonucunu XRD ölçümü ile bulduktan sonra elde edilen numunenin mekanik özellikleri açısından önemli bir yere sahip olan mikrosertlik davranışlar incelenmiştir.

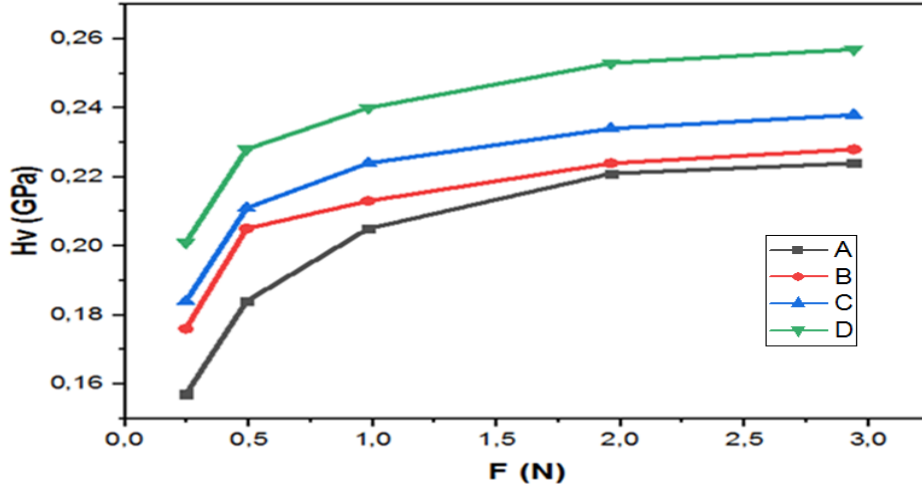
### 3.3. Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları

### 3.3.1. Vickers Ölçümü

Yüke bağlı mikro sertlik değerleri ( $H_v$ ), gerilme değerleri ( $Y$ ), girme derinliği ( $d$ ) tüm malzemeler için ayrı ayrı 4 farklı yük ( $F$ ) uygulanarak hesaplanmış ve Tablo 2 oluşturulmuştur. Tablo 2'deki değerler kullanılarak numunelerin Origin Pro 8 Programı yardımı ile, uygulanan yük ile mikro sertliklerinin değişimi grafiği çizilmiştir ve bu sayede numunelerin hangi davranışı gösterdikleri bulunmuştur. Vickers modeline göre yapılan değerlendirmede, numunelerin uygulanan yükün artması ile birlikte, tanecikleri arası boşluğun azaldığı, dolayısı ile artan bir mikro sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum numunelerin RISE (ters çentik boyut etkisi) davranışına sahip olduğu anlamındadır.

**Tablo 2.** Tüm Numuneler İçin Vickers Mikrosertlik analizine Göre Hesaplanan Mikrosertlik Parametreleri

Numune	F(N)	d( $\mu$ m)	$H_v$ (GPa)	Y(GPa)
A	0,245	53,79	0,16	0,05
	0,49	70,27	0,18	0,06
	0,98	94,15	0,20	0,07
	1,96	128,24	0,22	0,07
	2,94	156,00	0,22	0,07
B	0,245	50,80	0,17	0,06
	0,49	66,57	0,20	0,07
	0,98	92,36	0,21	0,07
	1,96	127,38	0,22	0,07
	2,94	154,63	0,23	0,08
C	0,245	49,69	0,18	0,06
	0,49	65,62	0,21	0,07
	0,98	90,07	0,22	0,07
	1,96	124,62	0,23	0,09
	2,94	151,35	0,24	0,08
D	0,245	47,54	0,20	0,07
	0,49	63,12	0,23	0,08
	0,98	87,01	0,24	0,08
	1,96	119,85	0,25	0,08
	2,94	145,64	0,26	0,09



**Şekil 2.** Vickers Mikrosertlik Analizine Göre Numunelere Ait Mikrosertlik Değerlerinin Uygulanan Yük İle Değişimi

Vickers yöntemine göre yapılan ölçüm sonucu ile elde edilen Tablo 2’de görülmektedir ki; numune sertlik değeri ve yüzey gerilimi fırınlama sıcaklığının artması ile artmıştır. Yine girme derinliği fırınlama sıcaklığı artışı ile artmıştır. Şekil 2 numunelerin RISE davranışının ortaya çıktığını göstermektedir. Başlangıç mikrosertlik değeri en fazla olan numune D numunesidir. 2 N değeri üzerindeki uygulanan yük değerinde numuneler plato bölgesine ulaşmışlardır.

### 3.3.2. Meyer Modeline Göre Mikro Sertlik Analizi

Meyer yapmış olduğu çalışmalarla, malzemeye uygulanan zor ile batma derinliği arasında bağ kuran bir model geliştirdi.

$$F = Ad^{nk} \quad 2$$

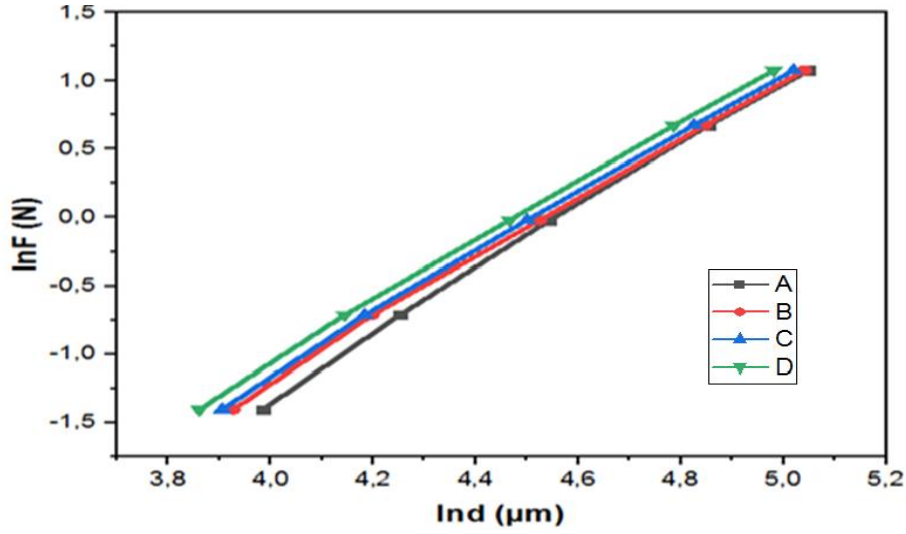
Meyer 2 denklemi ile bu modeli matematiksel olarak ifade etmiştir. Burada;  $n_k$ : Meyer üssü, A: malzeme sabitidir. Meyer yaklaşım modeli malzemenin ISE ya da RISE davranışı gösterdiğini saptar. Bu saptamayı Meyer üssü belirler ve farklı üç durum ortaya çıkar.

- Meyer üssü eğer 2’den küçük ise malzeme ISE davranışını sergiler
- Meyer üssü eğer 2’de büyük ise malzeme RISE davranışını sergiler
- Meyer üssü eğer 2’ye eşit ise sertlik uygulanan yüke bağlı değildir yani Meyer yaklaşım modeli yerini denklem 2’de tanımlandığı şekli ile Kick kanununa bırakır.

$$P_{max} = Chc^2 \quad 3$$

Meyer modelinin öngördüğü  $\ln F$  ve  $\ln d$  değerleri hesaplanarak, OriginPro 8 programı yardımı ile Şekil 3 çizilmiştir. Elde edilen grafik ile herbir numuneye ait genelleştirilmiş  $y=ax\pm b$  eğim denklemi hesaplanılarak, bu denklemden Meyer üstü ( $n_k$ ) olan a parametresi bulunup Tablo 3 oluşturulmuştur. Tabloda görülen  $H_v$  değeri yükten bağımsız mikrosertlik değeridir ve bu belirtilen aralıkta uygulanan yük numune üzerinde çok bir değişim yaratmaz. Bu hal plato bölgesi olarak adlanır.





Şekil 3. Numunelerin Meyer Kanunu'na Göre lnF- ln d Grafiği

Tablo 3. Meyer Kanunu'na Göre Deneysel Veriler İle Elde Edilen Parametreler

Numune	Eğim( $n_k$ )	$H_v$ (GPa)
A	2,33	0,21-0,22
B	2,21	0,21-0,23
C	2,22	0,22-0,24
D	2,21	0,24-0,26

Meyer üssü 2'den büyük ise numune RISE, 2'den küçük ise numune ISE davranışına sahiptir. Bu modelde tüm numuneler için Meyer üssü 2 değerinden büyük çıkmıştır. Bu durum numunelerin RISE davranışını göstermektedir. Meyer üssü değeri aynı zamanda malzemenin sert mi yumuşak mı olduğuna dair de bilgiler vermektedir.  $1 < n_k < 1,6$  durumu malzemenin sert malzeme olduğunu,  $1,6 < n_k$  durumu ise malzemenin yumuşak olduğunu ifade eder [24]. Meyer üssü tüm numunelerde 1,6 değerinden büyük çıkmış olması malzemenin yumuşak olduğunu göstermektedir.

### 3.3.3. PSR Modeline Göre Mikro Sertlik Analizi

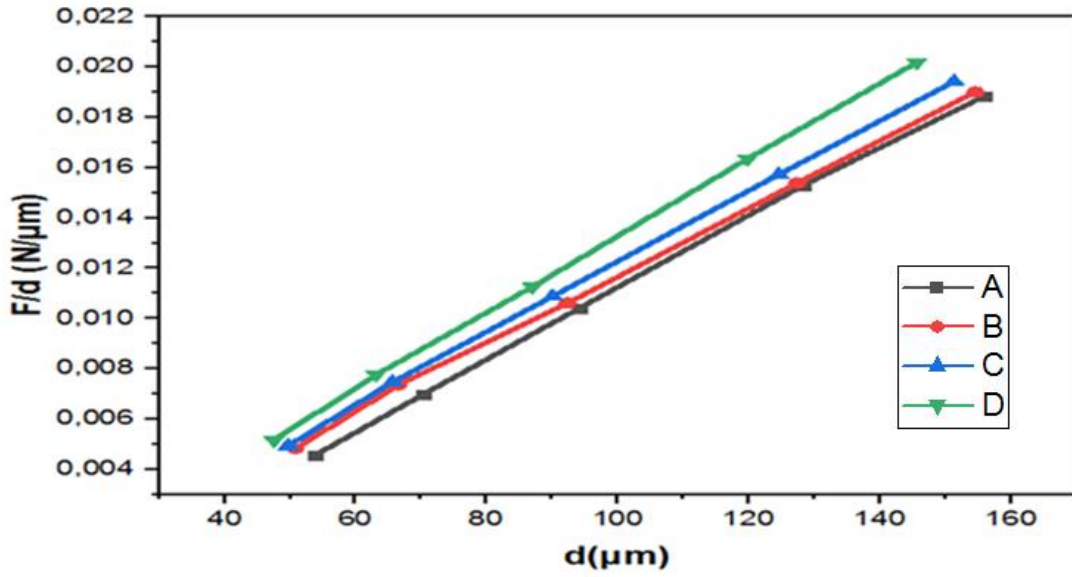
PSR modeline göre numunelerin F/d-d grafiğinin eğimi olan  $W_{PSR}$  ve yüke bağlı mikro sertlik değeri  $H_{psr}$  Denklem 4, Denklem 5 ve Denklem 6 yardımı ile hesaplanıp Tablo 4 oluşturulmuştur.

$$F = W_{PSR}d + A_{1PSR}d^2 \quad 4$$

$$\frac{F}{d} = W_{PSR} + A_{1PSR}d \quad 5$$

$$H_{PSR} = 1854,4.(A_{1PSR}) \quad 6$$

Ayrıca Vickers ölçümüne ait temel datalardan yola çıkarak F/d-d grafiği çizilmiştir. Burada  $W_{PSR}$  parametresinin negatif veya pozitif çıkması elde edilen numunelerin ISE veya RISE davranışını işaret etmektedir. Öyle ki;  $W_{PSR}$  negatif ise numuneler RISE,  $W_{PSR}$  pozitif ise ISE davranışı göstermektedir.



Şekil 4. PSR Modeline Göre Numunelerin F/d-d Grafiği

Tablo 4. PSR Modeline Göre Deneysel Veriler ile Elde Edilen Parametreler

Numune	$W_{PSR}$ (N/(μm))	$H_{PSR}$ (GPA)	$H_v$ (GPA)
A	$-29 \times 10^{-4}$	$26 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2} / 22 \times 10^{-2}$
B	$-19 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2} / 23 \times 10^{-2}$
C	$-20 \times 10^{-4}$	$26 \times 10^{-2}$	$22 \times 10^{-2} / 24 \times 10^{-2}$
D	$-20 \times 10^{-4}$	$28 \times 10^{-2}$	$24 \times 10^{-2} / 26 \times 10^{-2}$

$W_{PSR}$  tüm numunelerde negatif çıkmıştır. Bu durum numunelerin RISE davranışı sergilediğini göstermektedir. Fakat  $H_{PSR}$  değeri plato bölgesinde olmadığı için, bu model numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada yeterli değildir.

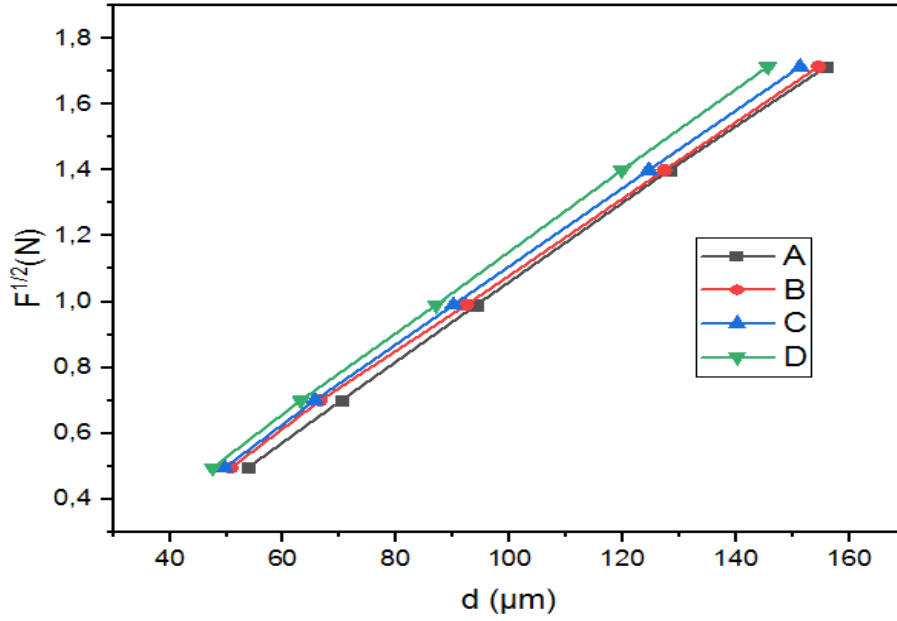
### 3.3.4. Elastik/ Plastik Deformasyon Modeline Göre Mikro Sertlik Analizi

Numune üzerine uygulanan kuvvet değerinin karekökü ile d parametresi kullanılarak  $F^{1/2}$ -d grafiği Origin Pro 8 Programı ile çizilmiş ve gerekli hesaplamalar Denklem 7 yardımı ile yapılarak,  $d_e$  ve  $H_{EPD}$  parametreleri bulunup Tablo 5 oluşturulmuştur.

$$F = A_2(d_p + d_e)^2 \quad 7$$

Bu denklemde  $F$  numuneye uygulanan dış yük,  $d_p$  plastik deformasyon katsayısı,  $d_e$  elastik deformasyon katsayısı ve  $A_2$  numuneye ait bir sabittir.  $A_2$  ve  $d_e$  değerleri elastik-plastik deformasyon yaklaşımının öngördüğü  $F^{1/2}$ -d grafiğinden eğim bulunarak hesaplanabilir.

Elastik plastik deformasyon modelinde temel öncül  $d_e$  değeridir. Bu değer negatif veya pozitif çıkması numune üzerinde elastik veya plastik deformasyonun oluşup oluşmadığı hakkında bilgiler verir. Eğer  $d_e$  değeri negatif çıkarsa numuneye uygulanan yük ile numune üzerinde elastik deformasyon oluşmadığını fakat plastik deformasyonun oluştuğunu,  $d_e$  değeri pozitif çıkarsa da hem plastik hem de elastik deformasyonun oluştuğunu ifade eder.



Şekil 5. Elastik-Plastik Deformasyon Modeline Göre Numunelerin  $F^{1/2}$ -d Grafiği

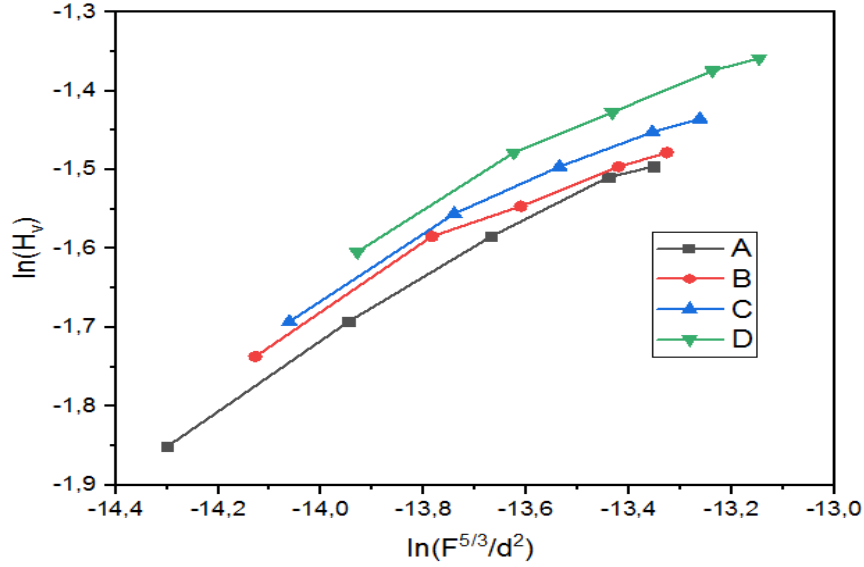
Tablo 5. Elastik-Plastik Deformasyon Modeline Göre Deneysel Veriler İle Elde Edilen Parametreler

Numune	$d_e$ (μm)	$H_{EPD}$ (GPa)	$H_v$ (GPa)
A	$-14 \times 10^{-2}$	$27 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2} / 22 \times 10^{-2}$
B	$-25 \times 10^{-2}$	$25 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2} / 23 \times 10^{-2}$
C	$-9 \times 10^{-2}$	$27 \times 10^{-2}$	$22 \times 10^{-2} / 24 \times 10^{-2}$
D	$-9 \times 10^{-2}$	$28 \times 10^{-2}$	$24 \times 10^{-2} / 26 \times 10^{-2}$

Tablo 5 incelendiğinde tüm numunelerde de değeri negatif çıktığı dolayısı ile yalnızca plastik deformasyonun olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca  $H_{EPD}$  plato bölgesi dışından olduğundan bu model numunelerin mikrosertlik karakterini açıklamada yeterli değildir.

### 3.3.5. IIC (Çentik Kaynaklı Yarıлма) Modeline Göre Mikro Sertlik Analizi

IIC (çentik kaynaklı yarıлма) modelinde bir grafik oluşturabilmek için Vickers ölçümü ile elde edilen  $H_v$  değeri ve numuneye uygulanan dış yük  $F$  kullanılarak  $\ln(H_v) - \ln(F^{5/3}/d^2)$  grafiği çizilmiştir. Çizilen bu grafiğin eğim değeri olan  $m$  Origin Pro 8 Programı yardımı ile bulunmuştur. Çizilen grafiğin eğim değerinden elde edilen  $m$  değerine göre numunenin ISE ya da RISE davranışı gösterdiği saptanır. Eğer;  $m > 0,6$  ise numune ISE davranışı,  $m < 0,6$  olduğunda ise numune RISE davranışı gösterir [25].



Şekil 6. IIC (Çentik Kaynaklı Yarıлма) Modeline Göre Numunelerin  $\ln(H_v)/\ln(F^{5/3}/d^2)$  Grafiği

Tablo 6. IIC (Çentik Kaynaklı Yarıлма) Modeline Göre Deneysel Veriler İle Elde Edilen Parametreler

Numune	$m$	$H_v(GPA)$
A	$38 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2}/22 \times 10^{-2}$
B	$32 \times 10^{-2}$	$21 \times 10^{-2}/23 \times 10^{-2}$
C	$32 \times 10^{-2}$	$22 \times 10^{-2}/24 \times 10^{-2}$
D	$31 \times 10^{-2}$	$24 \times 10^{-2}/26 \times 10^{-2}$

Tablo 6 incelendiğinde, elde edilen tüm numuneler için  $m$  değeri 0,6'dan küçük çıkmıştır. Bu durum malzemelerin RISE davranışı gösterdiklerini ifade etmektedir ve aynı zamanda Vickers yöntemi ile de uyumluluk arz etmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Elde edilen numuneler üzerinde yapılan XRD analizi sonucunda tüm numunelerde  $MgB_2$  yapısının oluşmuş olduğu, baskın düzlem pikinin (1 0 1) düzlemine ait olduğu ve  $43^\circ$ 'ye karşılık gelen açıda görüldüğü, en keskin pikin C numunesine ait olduğu görülmüştür. Mikrosertlik analizleri sonucunda ise numunede RISE davranışının hakim olduğu, sıcaklık artışı ile numunelerde yüzey gerilimi, girme derinliği ve sertlik değerinde artış olduğu, genel olarak yapının yumuşak olduğu fakat kendi içlerinde kıyaslandığında en yumuşak numunenin en düşük fırınlama sıcaklığında elde edilen numune olduğu saptanmıştır. Numuneler plato bölgesine 2 N değerinden sonra girdiği görülmüştür. Ayrıca Meyer Yaklaşımı ve IIC Yaklaşımının elde edilen numunelerin mikrosertlik davranışlarını en iyi açıklayan yaklaşımlar olduğu sonucuna varılmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada numune eldesi ve numune karakterizasyonu için kullanılan, Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Nanoteknoloji Laboratuvarına, Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarına, Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Termal Analiz Laboratuvarına ve Kastamonu Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarına teşekkürlerimizi sunarız.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Ürper, O. (2015). Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Organik Güneş Pillerinde Elektrot Malzemesi Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 24-25.
- [2] Uzun G., Yagmur S., Korkut İ., Şeker U. Hastelloy x süper alaşımının tornalanmasında kriyojenik işlem uygulanan PVD Ve CVD kaplamalı takımların performansının incelenmesi. Gazi Uni., J. Sci, Part C, 5(2): 231-239 (2017).
- [3] Corrias M., Caussat B., Ayrat A., Durand J., Kihnd Y., Kalck Ph. Carbon nanotubes produced by fluidized bed catalytic CVD: first approach of the process. Chemical Engineering Science, Vol 58, 4475-5582, (2003).
- [4] Kingston C., T., Simard B. Fabrication of carbon nanotubes. Analytical Letters, Vol. 36, No. 15, pp. 3119-3145, (2003).
- [5] Safran, S. (2010). MgB<sub>2</sub> Süperiletken Tellerde Alternatif Akım Kaybı Ve Akı Perçinleme Mekanizmaları, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 44.
- [6] Safran S. Karbon kaplı nano-bor kullanılarak hazırlanan süperiletken MgB<sub>2</sub> numunelerde magnezyum kaynağının yapısal ve elektriksel özellikler üzerindeki rolü. Gazi Uni J. Sci, Part C, 6, 3(715 – 720), (2018).
- [7] Hernadi K., Fonseca A., Nagy J., B., Bernaerts D., Lucas A., A. Fe-catalyzed carbon nanotube formation. Carbon 34, 1249, (1996).
- [8] Kong J., Cassell A., M., Dai H. Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. Chem. Phys. Lett., 292, 567. (1998).
- [9] Fan S., Chapline M., Frankline N., Tomblor T., Cassel A., M., Dai H. Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties. Science (283-512), (1999).
- [10] Li W., Z., Xie S., Qian L., X., Chang B., H., Zou B., S., Zhou W., Y., Zhao R., A., Wang G. Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. Science (274-1701) (1996).
- [11] Sen R., Govindaraj A., Rao C., N., R., Carbon nanotubes by the metallocene route. Chem. Phys. Lett. (267-276), (1997).
- [12] Chhowalla M., Teo K., B., K., Ducati C., Rupesinghe N., L., Amaratunga G., A., J., Ferrari A., C., Roy D., Robertson J., Milne W., I. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition. Journal of Applied Physics, volume 90, number 10. (2001).
- [13] Kong J., Alan M., Cassell H., D. Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. Chemical Physics Letters, 292 (567–574), (1998).
- [14] Kumar M., Ando Y. Chemical vapor deposition of carbon Nanotubes: a review on growth mechanism and mass production. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 10 (3739–3758), (2010).
- [15] Franco C., M., Ferreira B., Santos C., A., M., Ghiveldar L., Filho H., J., I., Machado A., J., S. Influence of Mg deficiency in the superconducting critical temperature of MgB<sub>2</sub>. Physica C 408 (130-131), (2004).
- [16] Kolesnikov N., N., Kulakov M., P., MgB<sub>2</sub> Superconducting wires: basics And applications. Physica C, 363 (166-169), (2002).

- [17] Rodrigues D., Lucas Jr., Silvaa B., S., Vivian C., V., Hellstromb E., E. Superconducting properties of MgB<sub>2</sub> with addition of other AlB<sub>2</sub>-type diborides and carbon sources, prepared using high energy ball milling and HIP. *Physics Procedia*, 36 (468 – 474), (2012).
- [18] Ansari I., A. Study of dynamic behaviors for nano Fe-doped MgB<sub>2</sub> superconductor via ac-susceptibility measurements. *Ceramics International*, 45 (1523-1527), (2009).
- [19] Tolendiuly S., Fomenko S., M., Dannangoda G., C., Martirosyan K., S. Self-propagating high temperature synthesis of MgB<sub>2</sub> superconductor in high-pressure of argon condition. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 19 (177-181), (2017).
- [20] Paranthaman M., Thompson J., R., Christen D., K. Effect of carbon-doping in bulk superconducting MgB<sub>2</sub> samples. *Physica C*. 355 (1-5) (2001).
- [21] Tampieri A., Celotti G., Sprio S., Caciuffo R., Rinaldi D. Study of the sintering behaviour of MgB<sub>2</sub> superconductor during hot-pressing *Physica C: Superconductivity* 400 (97-104), (2004).
- [22] Kim C., J., Yi J., H., Jun B., H., You B., Y., Park S., D., Choo K., N., Reaction-induced pore formation and superconductivity in in situ processed MgB<sub>2</sub> superconductors. *Physica C: Superconductivity*, 502 (4-9), (2014).
- [23] Yi J., H., Kim K., T., Jun B., H., Sohn J., M., Kim B., G., Joo J., Kim C., J. Pore formation in in situ processed MgB<sub>2</sub>superconductors. *Physica C: Superconductivity* 469 (1192-1195), (2009).
- [24] Bekteş, M. (2004).Fe-Mn Alaşımlarının Mikrosertlik Ölçümleri, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. 27-28.
- [25] Awad R., Abou-Aly A., I., Kamal M., Anas M., Mechanical properties of (Cu<sub>0.5</sub>Tl<sub>0.5</sub>)-1223 substituted by Pr. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 24 (1947-1956), (2011).

## Development of Nano Ache Enzyme Based Sensor for Determination of Nerve Agents Used in Chemical Weapons

 Ozan YAĞMUROĞLU<sup>1\*</sup>  Sibel Emir DİLTEMİZ<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>CBRN Department, Ministry of National Defense, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Chemistry Department, Faculty of Science, Eskisehir Technical University, 26470, Eskisehir/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

In this study nano enzyme system based sensor has been developed for detection of nerve agents used in chemical weapons production. The chemical substances forming the nerve agents are included in the group of organophosphorus compounds. Paraoxon was used as the organophosphorus compound. Paraoxon molecule irreversibly inhibits the acetylcholinesterase enzyme (AChE). In this respect, it is preferred because of its similarity to nerve agents.

### Article Info:

Research article

Received: 16/09/2019

Revision 14/02/2020

Accepted: 24/02/2020

### Highlights

- Nerve agent sensors.
- Nano enzyme systems.
- Low detection limit.

### Keywords

Chemical weapon  
Nerve agent  
CBRN  
Paraoxon  
Nano enzyme

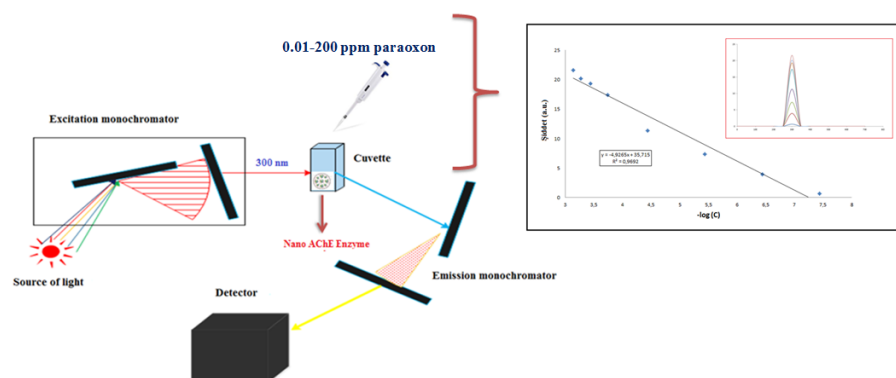


Figure A. Graphical representation of the study

**Purpose:** The aim of this study is to develop a sensor that can simultaneously determine the nerve agent molecule in the environment. For this purpose, a sensing layer based on the interaction between the AChE enzyme and the nerve agent has been developed.

**Theory and Methods:** Paraoxon molecule irreversibly inhibits the acetylcholinesterase enzyme (AChE). In this respect, it is preferred because of its similarity to nerve agents. In the sensor system, nano enzyme synthesized according to photosensitive cross-linking method with ruthenium based amino acid monomers was used as sensor layer. The fluorescence spectrum of the obtained nano enzyme was taken and observed to show fluorescence. As a result of the analyzes, working conditions were determined as wavelength of 300 nm and pH of 7,4.

**Results:** The fluorescence intensities of the paraoxon samples, which ranged from 0.01 ppm to 200 ppm, were measured after interaction with the nano-enzyme at 300 nm wavelength and 7.4 pH. Calibration graph is drawn by using the obtained data. According to the experimental results, the LOD value of the sensor system based on the Nano AChE enzyme was calculated as  $6,0 \times 10^{-8}$  M, and the LOQ was calculated as  $6,98 \times 10^{-8}$  M.

**Conclusion:** The fluorescence intensities obtained in the study were transferred to the calibration graph. In the graphic obtained, a close relationship was observed and the regression coefficient was found to be 0.9692. In order to calculate LOD and LOQ, blank solutions were prepared and 5 different measurements were taken. As a result of the calculations, the LOD value was  $6,0 \times 10^{-8}$  M and the LOQ value was  $6,98 \times 10^{-8}$  M. These results show us that with the developed method, very low amounts of paraoxon samples can be analyzed.





## Kimyasal Silahlarda Kullanılan Sinir Ajanlarının Tespitine Yönelik Nano Ache Enzim Sistemi Temelli Sensör Geliştirilmesi

Ozan YAĞMUROĞLU<sup>1\*</sup> Sibel Emir DİLTEMİZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Milli Savunma Bakanlığı KBRN Savunma Daire Başkanlığı, Ankara/Turkey

<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi Kimya Bölümü, 26470, Eskişehir/Turkey

### Öz

Bu çalışmada; kimyasal silah yapımında kullanılan sinir ajanlarının algılanmasına yönelik nano enzim sistemi temelli sensör geliştirilmiştir. Sinir ajanlarını oluşturan kimyasal maddeler organofosforlu bileşik grubu içerisinde yer almaktadır. Çalışmada organofosforlu bileşik olarak paraokson kullanılmıştır. Paraokson molekülü asetilkolinesteraz enzimini (AChE) geri dönüşümsüz olarak inhibe etmektedir. Bu yönüyle sinir ajanlarına benzemesinden dolayı tercih edilmiştir. Sensör sisteminde algılayıcı tabaka olarak rutenyum tabanlı aminoasit monomerleriyle fotosensitif çapraz bağlama yöntemine göre sentezlenen nano enzim sistemi kullanılmıştır. Elde edilen nano enzimin floresans spektrumu alınmış ve floresans özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda çalışma koşulları 300 nm dalga boyu ve 7,4 pH olarak belirlenmiştir. 300 nm dalga boyu ve 7.4 pH değerinde, 0.01 ppm ile 200 ppm arasında değişen paraokson numunelerinin nano enzim ile etkileştikten sonraki floresans şiddetleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak kalibrasyon grafiği çizilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, Nano AChE enzimi temelli sensör sisteminin LOD (Gözlenebilme Sınırı) değeri  $6,0 \times 10^{-8}$  M, LOQ (Tayin Sınırı) değeri  $6,98 \times 10^{-8}$  M olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen bu nano enzim sistemi temelli sensör ile eser miktarda analit içeren numunelerin analizini yapmak mümkündür.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 16/09/2019  
Düzeltilme: 14/02/2020  
Kabul: 24/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Kimyasal silah  
Sinir ajanı  
KBRN  
Paraokson  
Nano enzim

### Keywords

Chemical weapon  
Nerve agent  
CBRN  
Paraoxon  
Nano enzyme

## Development of Nano Ache Enzyme Based Sensor for Determination of Nerve Agents Used in Chemical Weapons

### Abstract

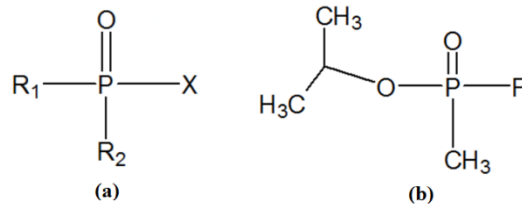
In this study; Nano enzyme system based sensor system has been developed for detection of nerve agents used in chemical weapons production. The chemical substances forming the nerve agents are included in the group of organophosphorus compounds. Paraoxon was used as the organophosphorus compound. Paraoxon molecule irreversibly inhibits the acetylcholinesterase enzyme (AChE). In this respect, it is preferred because of its similarity to nerve agents. In the sensor system, nano enzyme system synthesized according to photosensitive cross-linking method with ruthenium based amino acid monomers was used as sensor layer. The fluorescence spectrum of the obtained nano enzyme was taken and observed to show fluorescence. As a result of the analyzes, working conditions were determined as wavelength of 300 nm and pH of 7.4. The fluorescence intensities of the paraoxon samples, which ranged from 0.01 ppm to 200 ppm, were measured after interaction with the nano-enzyme at 300 nm wavelength and 7.4 pH. Calibration graph is drawn by using the obtained data. According to the experimental results, the LOD value of the sensor system based on the Nano AChE enzyme was calculated as  $6,0 \times 10^{-8}$  M, and the LOQ was calculated as  $6,98 \times 10^{-8}$  M.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toksik etkileri sonucunda canlıları; öldürme, yaralama veya temel yaşam fonksiyonlarını bozarak etkisiz hale getirme gibi özelliklere sahip kimyasal maddelere genel olarak kimyasal savaş ajanı denilmektedir. 1993 yılında imzalanan Kimyasal Silahlar Sözleşmesine göre; kimyasal savaş ajanlarını yaymak için kullanılan her türlü teçhizat kimyasal silah olarak tanımlanmıştır. Bu silahlar; insanları öldürmenin yanında, bitkisel, hayvansal besin stoklarını bulaş ile kullanılamaz hale getirme, ekonomik değeri yüksek hedefleri işlemez hale getirme, asker-sivil personeli koruyucu giysi, araç kullanmak zorunda bırakarak hareket kabiliyetlerini azaltma ve askeri birlikleri istenilmeyen yönlere sevk etme gibi amaçlarla kullanılmaktadır

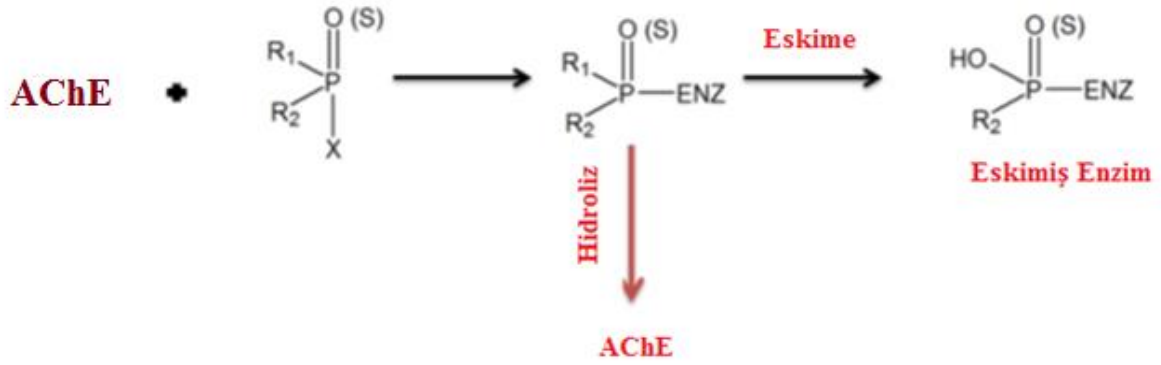
[1]. Kimyasal savaş ajanları vücuda deri, solunum sistemi, sindirim sistemi ve gözler yoluyla girebilmektedir. Bunlar; gaz, buhar, aerosol halinde solunduğlarında burun ve ağız yoluyla vücuda alınmaktadır. Sıvı veya katı haldeki kimyasal ajanlar genel olarak deriyle temas ettiklerinde etkilerini göstermektedirler. Kimyasal silahlarda kullanılan kimyasal savaş ajanları; fiziksel özelliklerine, kimyasal özelliklerine, askeri kullanım amaçlarına, toksik özelliklerine ve etkilerine göre farklı sınıflara ayrılabilir. Genel olarak kimyasal savaş ajanları toksikolojik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Toksikolojik özelliklerine göre kimyasal savaş ajanları; sinir ajanları, yakıcı ajanlar, kan zehirleyici ajanlar, boğucu ajanlar, öldürücü olmayan kimyasal ajanlar olarak 5 farklı sınıfa ayrılmaktadır [2].

Sinir ajanlarının keşfi daha etkili pestisit geliştirmek için yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Hem pestisitlerin hem de sinir ajanlarının molekül yapıları organofosforlu bileşiklere dayanmaktadır. Sinir ajanları ilk kez II. Dünya Savaşı'ndan önce geliştirilmeye başlanmıştır. II. Dünya Savaşı esnasında ve sonrasında yeni ve daha etkili ajanlar üretmek için çalışmalar artarak devam etmiştir. İlk bulunan sinir ajanı tabundur. İlerleyen yıllarda ise sarin, soman ve VX ajanları geliştirilmiştir. Bilinen bazı sinir ajanları ise; Tabun (GA), Sarin (GB), Soman (GD), Siklosarin (GF), VX, VR-55, Goman, TGD'dir. Sinir ajanlarına maruz kaldığında oluşacak etkiler; burunda sebepsiz yere akıntı, tükürük salgılanmasında artış, zor nefes alıp verme, göğüste sıkışma hissi, göz bebeklerinde küçülme, görmede bulanıklık, baş ağrısı ve baş dönmesi, aşırı terleme, kusma, çirpınma, kaslarda kasılma olarak sıralanabilir. Sinir ajanının yarattığı etki, maruziyet şekline göre değişmektedir. Sadece yüzeysel bir temasta ortaya çıkan belirtiler ile vücuda emilimi sonucu ortaya çıkan belirtiler farklılık göstermektedir. Sinir ajanlarında yapısını oluşturan organofosforlu bileşikler vücuttaki etkilerini sinir iletimini engelleyerek gösterirler. Bu bileşikler yapıları bakımından genel olarak esterler, amidler ve fosforik asidin tüel türevleridir. Organofosforlu bileşikler lipid çözünürlüğe sahiptirler [3]. Bundan dolayı deri, mukoza, konjoktiv ve solunum yolları tarafından vücuda alınırlar. Bu bileşikler hayvan ve insan tıbbında ilaç olarak, tarımsal uygulamalarda pestisit olarak ve askeri amaçlarla ise kimyasal savaş ajanı olarak kullanılmaktadırlar [4]. Organofosforlu bileşiklerin genel kimyasal yapıları şu şekildedir; molekülün merkezinde fosfor atomu bulunmakta ve fosfor atomu oksijen veya sülfür ile çift bağ yapmaktadır. Genel kimyasal yapıda bulunan R1-R2; hidrojen, alkil (siklik yapı dahil), aril, alkoksi, alkiltiyol ve amino gruplarını temsil etmektedir [2,5]. X ise halojenleri, siyano ve tiyol gruplarını ve inorganik-organik asitleri temsil eder. Organofosforlu bileşiklerin genel kimyasal yapısı ve sarin molekülünün kimyasal yapısı Şekil 1.'de gösterilmiştir.



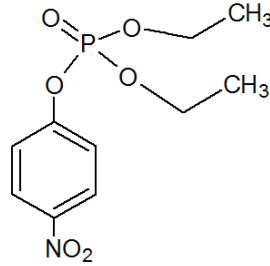
Şekil 1. (a) Organofosforlu bileşiklerin genel molekül yapısı, (b) Sarin molekülü

Organofosforlu bileşikler (OPB) vücuttaki etkilerini asetilkolinesteraz enziminin inhibisyonu üzerinden göstermektedir. OPB'ler AChE (Asetilkolinesteraz) enziminin aktif bölgesinde bulunan serin amino asidine bağlanarak enzim tarafından hidrolize edilirler [6]. Böylece enzimin aktif bölgesi fosforillenmiş olur [7]. AChE enzimi ile OPB'ler arasındaki reaksiyon iki basamakta gerçekleşir. Öncelikle geri dönüşümlü enzim-inhibitör kompleksi oluşur [8]. Bu kompleksin oluşum hızı organofosforlu bileşiğin yapısına, molekül büyüklüğüne ve alkil gruplarına bağlıdır. Geri dönüşümlü kompleks oluşumundan sonra yapıdaki alkil grubunun -OH ile yer değiştirmesi sonucu geri dönüşümsüz kompleks meydana gelir. Bu olay eskime olarak adlandırılır (Şekil 2.) [9].



Şekil 2. Organofosforlu bileşikler ile AChE arasındaki reaksiyon

Paraokson; molekül kütlesi 275.2 g/mol ve kapalı formülü C<sub>10</sub>H<sub>14</sub>NO<sub>6</sub>P olan bir organofosforlu bileşiktir. Kimyasal adı o,o-dietil-o-p-nitrofenil fosfattır. Paraokson molekülü insan vücudunda asetilkolinesteraz (AChE) enzimi inhibitörü olarak davranır [10]. Paration molekülünün aktif metabolitidir. AChE enzimini inhibe etme yeteneği çok güçlüdür [9]. İnsektisitler arasında inhibisyon açısından en kuvvetli organofosforlu bileşiklerden birisidir [12,13,14]. Sinir ajanı sarin molekülünün %70 kuvvetindedir ve canlılarda toksik etkilere yol açacağından dolayı kullanımı kısıtlıdır. Deri tarafından emilimi oldukça kolaydır [15]. Paraoksonun molekül yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



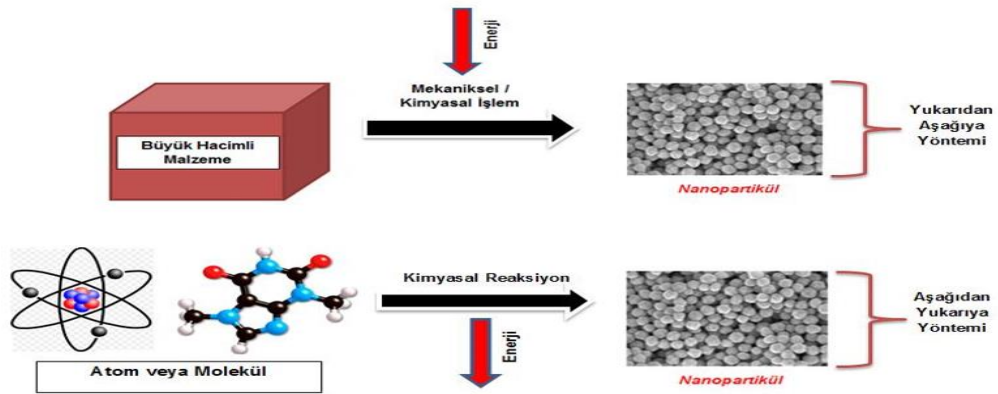
Şekil 3. Paraoksonun (O,O-dietil-O-p-nitrofenil fosfat) molekül yapısı

Kimyasal sensörler numune içerisindeki analitin derişimine bağılı olarak elde ettikleri kimyasal bilgiyi sinyale dönüştüren sensör sistemleridir. Elde edilen kimyasal bilgi analitin sensör yüzeyinde girdiği bir reaksiyon aracılığıyla veya ortamın değişen fiziksel özellikleri yardımıyla elde edilebilir. Kimyasal sensörler algılayıcı kısmının özelliklerine göre sınıflandırılabilir [16]. Kimyasal reaksiyonun olmadığı sadece ortamdaki fiziksel değişimlerden yararlanarak ölçüm yapılan kimyasal sensörler mevcuttur. Bu tarz kimyasal sensörlerde absorbanans değişimi, floresans değişimi, refraktif indeks, iletkenlik, sıcaklık ve kütle değişimi ölçülmektedir. Analit ortamı ile algılayıcı tabaka arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelen değişikliklerden yararlanarak da ölçüm yapılabilir [17]. Bu sensörler kimyasal ilkeye dayalı kimyasal sensörler olarak adlandırılabilirler. Algılayıcı tabakada biyolojik bir molekülün olduğu ve meydana gelen sinyalin biyokimyasal bir süreç sonucunda elde edildiği kimyasal sensörlere ise biyokimyasal sensör denilmektedir [18-23].

Nanoteknoloji kavramında geçen "Nano" ön eki Latince'den gelmektedir ve "cüce, çok küçük" anlamında kullanılmaktadır. Kimya alanında nano kelimesi uzunluk kavramında nanometreyi ifade etmektedir [24]. Nanometre metrenin milyarda bir büyüklüğüne karşılık gelmektedir [25]. Nanometre ifadesinin boyutsal olarak daha iyi anlaşılması bakımından değişik büyüklüklere sahip varlıkların kıyaslanmasından yararlanılabilir. Örneğin; bir kağıdın kalınlığı yaklaşık 100000 nm, insan saç teli yaklaşık 25000 nm, DNA sarmalı 2 nm civarındadır. Madde küçüldükçe özelliklerinde de değişmeler meydana gelmektedir. Boyutlar azaldıkça maddenin kuantum davranışları maddenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde ön plana çıkmaktadır. Nano boyuttaki maddelerde, atom yapısının, bağılı atomların cinsinin, yapının büyüklüğünün

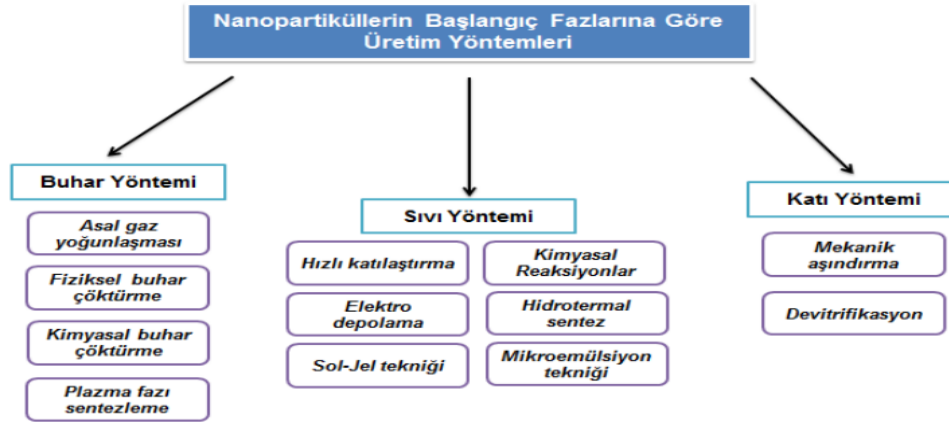
maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde büyük etkileri olduğu görülmektedir. Bu duruma örnek olarak karbon atomları gösterilebilir. Karbon atomlarından oluşan bir elmas kristali yalıtkan özellik gösterirken, karbon atomu ise yüksek derecede iletkenlik özelliğine sahiptir [25]. Nanoteknoloji; boyutları nanometre seviyesinde olan ve özellikleri açısından değerlendirdiğinde çok büyük avantajlar sağlayan malzemelerin üretimini ve geliştirilmesini tanımlamaktadır [26]. Nanoteknoloji ile amaçlanan, üstün özelliklere sahip malzemeler ve sistemler üreterek bunları nano boyutta elde edilebilir kılmaktır. Şuan kullanılmakta olan nanoteknoloji kavramı 1959 yılında Amerikan Fizik Topluluğu'na konuşma yapan Richard Feymann tarafından ortaya konulmuştur. Başlığı "En altta biraz yer var" olan konuşmasında günün birinde kalın ansiklopediklerin toplu iğne ucundan küçük alana sığdırılacağını ifade etmiştir. İlerleyen yıllarda yaptığı çalışmalarla Nobel ödülü almıştır. 1981 yılında taramalı tünel mikroskopunun (STM) icadı ve 1984 yılında atomik kuvvet mikroskopunun (AFM) icadıyla nano boyutta ölçüm yapılmaya başlanmıştır [25].

Makro boyuttaki bir malzemenin nano boyuttaki özellikleri incelendiğinde birçok özelliğinde farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Nano boyutu somut olarak canlandırmak gerekirse on tane yan yana konulmuş hidrojen atomu bir nanometre, DNA molekülleri yaklaşık olarak 2 nm, virüs 150 nm, biyolojik hücrelerin çapı ise bin nanometredir [27]. Nanoteknolojik malzemeler olarak tanımlanan yapılar; nanokristaller, nanopartiküller, nanotüpler, nanoteller, nanoçubuklar veya nano ince filmler gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır. Boyutsal olarak 100 nm ve daha küçük olan toz halindeki maddelere nanopartiküller denilmektedir. Nanopartiküllerin diğer maddelerden en önemli farkı ve üstünlüğü; kuantum boyut etkileri, elektronik yapıları ile boyutları arasındaki ilişki, yüksek yüzey/hacim oranı olarak sıralanabilir [25, 28]. Günümüzde kullanılan malzemelerin ve teknolojilerin nano boyuta taşınması ile birlikte nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakinalar ve yüksek kapasiteli veri depolama hücreleri gibi özgün özelliklere sahip küçültülmüş cihazların üretilmesinin önü açılmıştır [29]. Nanopartiküller özelliklerine göre en basit şekliyle şu şekilde sınıflandırılabilir; karbon bazlı nanopartiküller (karbon nanotüpler), metal bazlı nanopartiküller (altın kolloidler, nanoçubuklar), yarı iletken bazlı nanopartiküller (kuantum noktaları vb.). Nanopartiküller yapıları gereği kararsızdırlar. Kararsızlık nedeniyle çözeltileri hazırlanırken topaklanma oluşumu meydana gelir ve homojen çözeltilerinin hazırlanmasını zorlaştırır. Bunun önüne geçmek için farklı sentez yöntemleri ve farklı yüzey modifikasyonları geliştirilmiştir. Çözelti hazırlanacakken ortama yüzey aktif maddeler ilave edilerek topaklanma önlenmektedir [30]. Nanopartiküllerin üretim yaklaşımları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Nanopartikül üretiminde kullanılan yöntemler

Nanopartiküllerin elde edilme yöntemlerini sınıflandırırken boyutsal yapı temel alınabileceği gibi, başlangıç fazlarından yola çıkarak sınıflandırmakta mümkündür. Buna göre buhar, sıvı ve katı yöntemler olarak da üç farklı teknik ortaya çıkmaktadır. Nanopartiküllerin başlangıç maddelerine göre üretim yöntemlerinin şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir.



**Şekil 5.** Nanopartiküllerin başlangıç fazlarına göre üretim yöntemleri

Bu çalışmada nanopartikül elde edilirken rutenyum tabanlı amino asit monomerleriyle fotosensitif çapraz bağlama ve ANADOLUCA yöntemi kullanılmıştır. ANADOLUCA yöntemi (ANADOLUCA-AmiNoAcid (monomer) Decorated and Light Underpinning Conjugation Approach) rutenyum tabanlı, ışığa duyarlı, amino asit monomer ve oligomerlerinin sentezi, ışığa duyarlı proteinlerin konjugasyonu ve çapraz bağlanmaları süreçlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir [31]. ANADOLUCA yönteminde; proteinlerde bulunan sistein, triptofan ve tirozin aminoasitleri ile rutenyum tabanlı amino asit monomerlerinin arasında çapraz bağlı konjugasyon işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin getirdiği en önemli avantajlardan bir tanesi, elde edilen ışığa duyarlı monomerlerin nano ve mikro yapılarda denatüre olmadan kullanılabilmesidir. ANADOLUCA yöntemi, silika materyallere, süperparamanyetik partiküllere, nanokristallere, karbon nanotüplere, Ag/Au nanopartiküllere ve Au yüzeylerine protein entegrasyonu yani sıra proteinimsi polimerik nanopartiküllerin hazırlanmasında ve ilgili yüzeylerle entegrasyonuna da uygulanabilir. ANADOLUCA, yeniden ayrılabilir katı faz sistemleri, teranostikler (aynı anda tanı ve tedavi olanağı), nanoprotein taşıyıcılar, reseptör hedefli nanokargolar, biyosensörler, biyokataliz uygulamaları, yönetilebilir görüntüleme ve algılama teknolojileri gibi alanlarda kullanılabilen yeni nesil nanobiyokonjugantların oluşturulduğu bir yöntemdir [32]. ANADOLUCA; pH ve sıcaklıktan bağımsız, kataliz ve tayin amacıyla kullanılabilen bir yöntemdir. Bu teknikle elde edilen nano-biyokonjugantlarda bulunan proteinlerin fonksiyonu ve konformasyonları etkilenmez [31]. Bu çalışmada, paraokson molekülünü seçici olarak tanıyan ve bağlayan nano AChE enzim sistemi temelli sensör geliştirilmiştir. Geliştirilen sensörün performansının değerlendirilmesi maksadıyla literatür incelenmiştir [33-36]. Bu inceleme esnasında yapılan çalışmaların büyük kısmında organofosfatların hidrolizinden yararlandığı ve bunun sonucundaki değişimlerin analizin temelini oluşturduğu görülmüştür.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIEL AND METHOD)

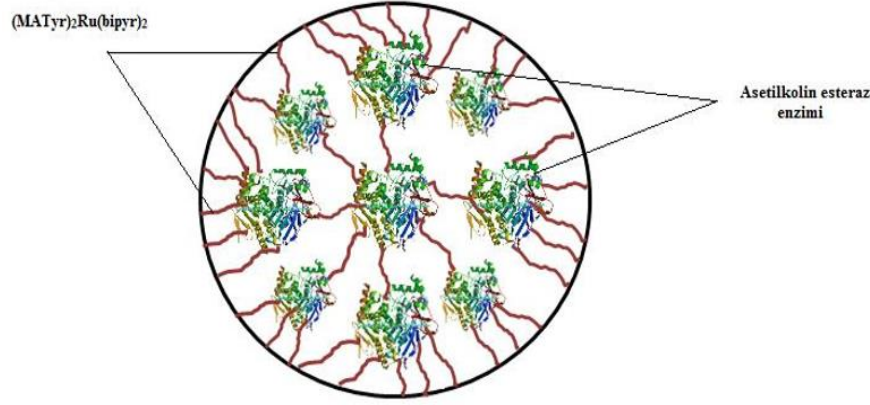
Çalışmalarda kullanılan tüm kimyasallar Sigma-Aldrich (St. Louis, USA) firmasından temin edilmiştir. Saf su elde etmek için Thermo Scientific Barnstead™ Smart2Pure™ saf su cihazı kullanılmıştır. Kullanılan saf suyun iletkenliği 18 megaohmcm<sup>-1</sup>'dir. Floresans ölçümleri Varian Cary Eclipse marka spektrofloreometre cihazı ile yapılmıştır.

### 2.1. Nano AChE sentezi ve karakterizasyonu (Nano AChE synthesis and characterization)

Nano AChE enzimi elde edilirken mikroemülsiyon polimerizasyon tekniği kullanılmıştır. Bu teknik ANADOLUCA metodundaki prosedüre göre uygulanmıştır[31]. Öncelikle mikroemülsiyon polimerizasyon ortamı hazırlanmıştır. Bunun için 0,5 g polivinil alkol 45 mL deiyonize suda dispers edilmiştir. 150 µL 1000 ppm AChE, (MATyr)<sub>2</sub>Ru(bipy)<sub>2</sub> ile etkileştirilmiş ve hazırlanan dispersiyon ortamına ilave edilmiştir. Dispersiyon ortamı 1 saat azot ortamında bekletilmiştir. Daha sonra polimerizasyonda başlatıcı olarak kullanılan amonyum persülfat (APS) reaksiyon ortamına ilave edilmiştir. Polimerizasyonun gerçekleşmesi için hazırlanan karışım, azot ortamında ve gün ışığına maruz kalacak



şekilde oda sıcaklığında 48 saat beklemeye bırakılmıştır. Polimerleşmenin gerçekleşmesinin ardından elde edilen nano AChE enzimleri 10000 rpm devirde santrifüjlenerek reaksiyon ortamından alınmıştır. Akabinde nano AChE enzimleri 5 kez deiyonize su ile yıkanmıştır. Elde edilen nano AChE enziminin yapısı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Nano AChE yapısı

## 2.2. Nano AChE enziminin paraokson ile etkileşiminin incelenmesi (Investigation of the interaction of nano AChE enzyme with paraoxon)

Nano AChE ile paraoksonun etkileşiminin incelenmesi amacıyla 0,01-200 ppm arasında değişen derişimlerde numuneler hazırlanmıştır. Nano AChE enziminden 100 µL, paraokson çözeltilerinden 1 mL alınarak toplam karışım deiyonize su ile 3 mL'ye seyreltilmiştir. Elde edilen çözelti floresans cihazının kütetine konulmuş ve ölçümler alınmıştır. Ölçümler yapılırken numune 300-625 nm dalga boyu aralığında değişen ışınlarla uyarılmış ve maksimum şiddet elde edilen dalga boyu çalışma için seçilmiştir.

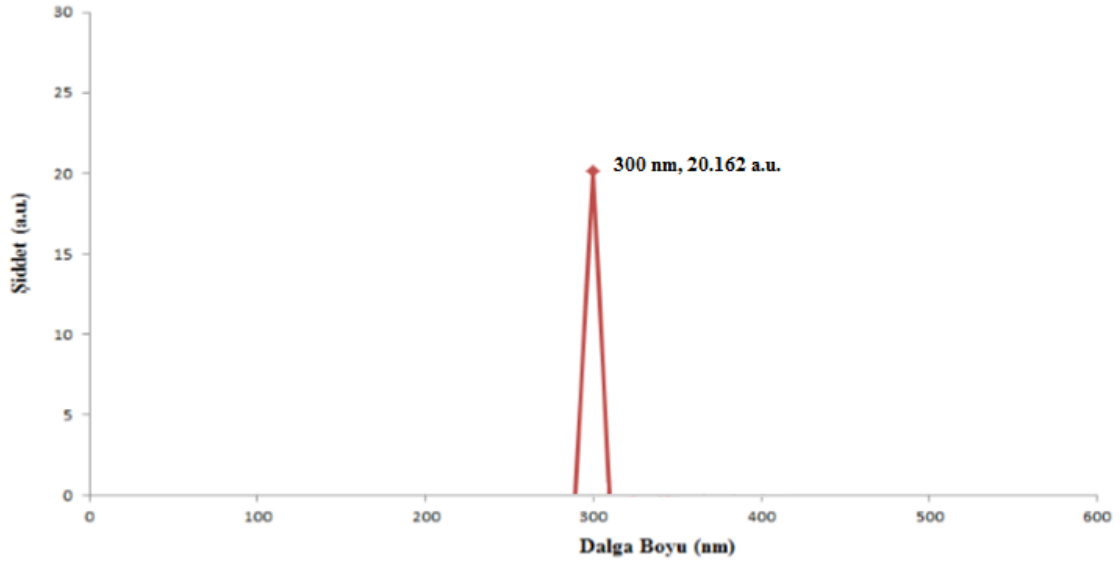
## 2.3. Uygun çalışma pH'sının belirlenmesi (Determination of the optimum pH)

100 µL nano AChE üzerine 1 mL 150 ppm paraokson çözeltisi eklendikten sonra farklı pH'lardaki tampon çözeltiler ile toplam hacim 3 mL'ye seyreltilmiştir. Elde edilen çözelti çalışılan dalga boyundaki ışınla uyarılarak floresans şiddetleri karşılaştırılmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

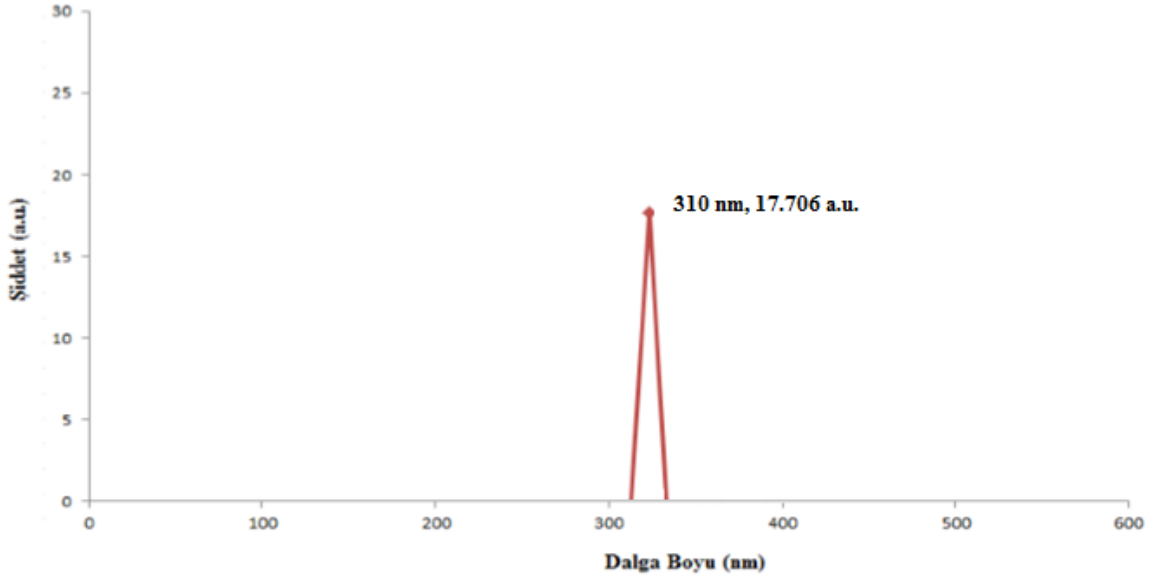
### 3.1 Nano AChE enzimi ile numune analizinde çalışılacak dalga boyunun belirlenmesi (Investigation of wavelength to be studied with Nano AChE enzyme)

Nano AChE enzimiyle paraokson etkileşimini floresans spektrofotometresi yardımıyla incelemek için öncelikle çalışılacak dalga boyu belirlenmiştir. Bunun için 150 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm ile 625 nm arasında değişen dalga boylarında floresans şiddetleri ölçülmüştür. Analiz yapılırken tampon çözelti olarak HEPES (pH=7,4) kullanılmıştır. 150 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 7'de verilmiştir.



**Şekil 7.** 150 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

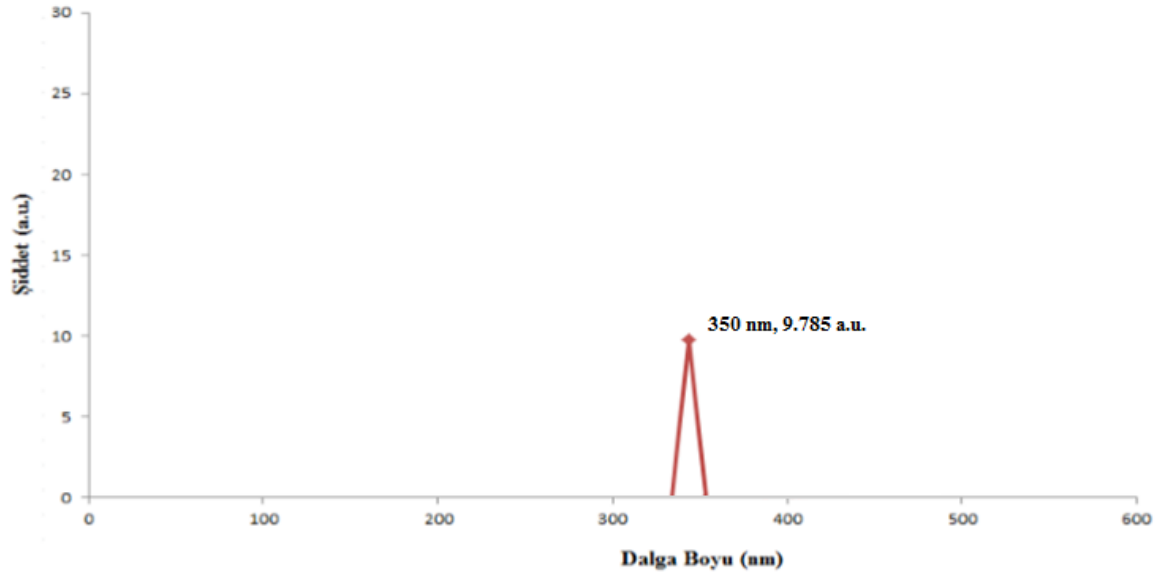
150 ppm paraokson içeren numunenin 310 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 8’de verilmiştir.



**Şekil 8.** 150 ppm paraokson içeren numunenin 310 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

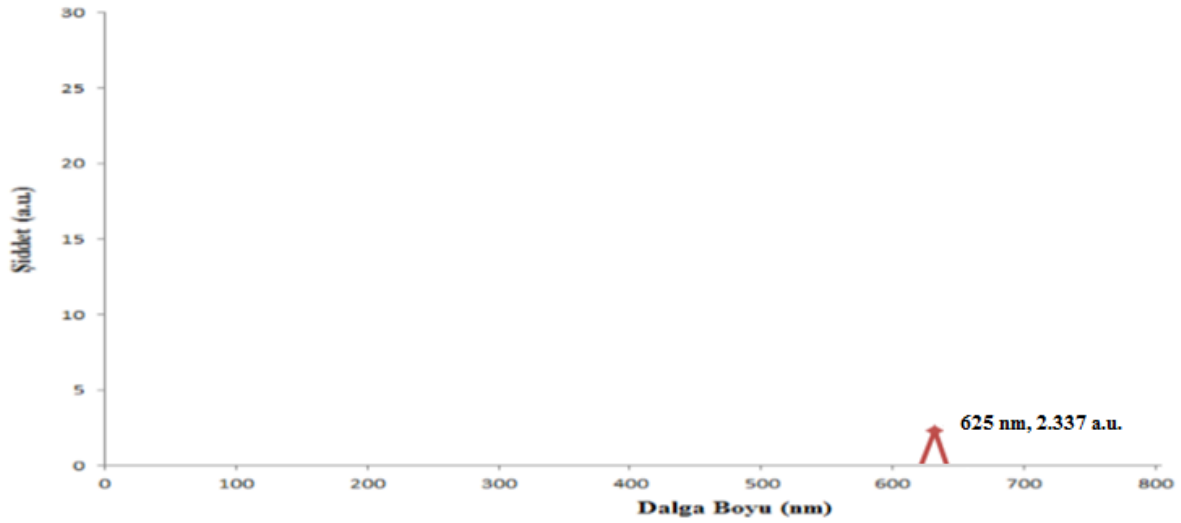
150 ppm paraokson içeren numunenin 350 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 9’da verilmiştir.





**Şekil 9.** 150 ppm paraokson içeren numunenin 350 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

150 ppm paraokson içeren numunenin 625 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 10.** 150 ppm paraokson içeren numunenin 625 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek floresans şiddetini veren dalga boyunun 300 nm olduğu görülmüştür. Bundan sonraki ölçümlerde çalışılacak dalga boyu olarak 300 nm belirlenmiştir.

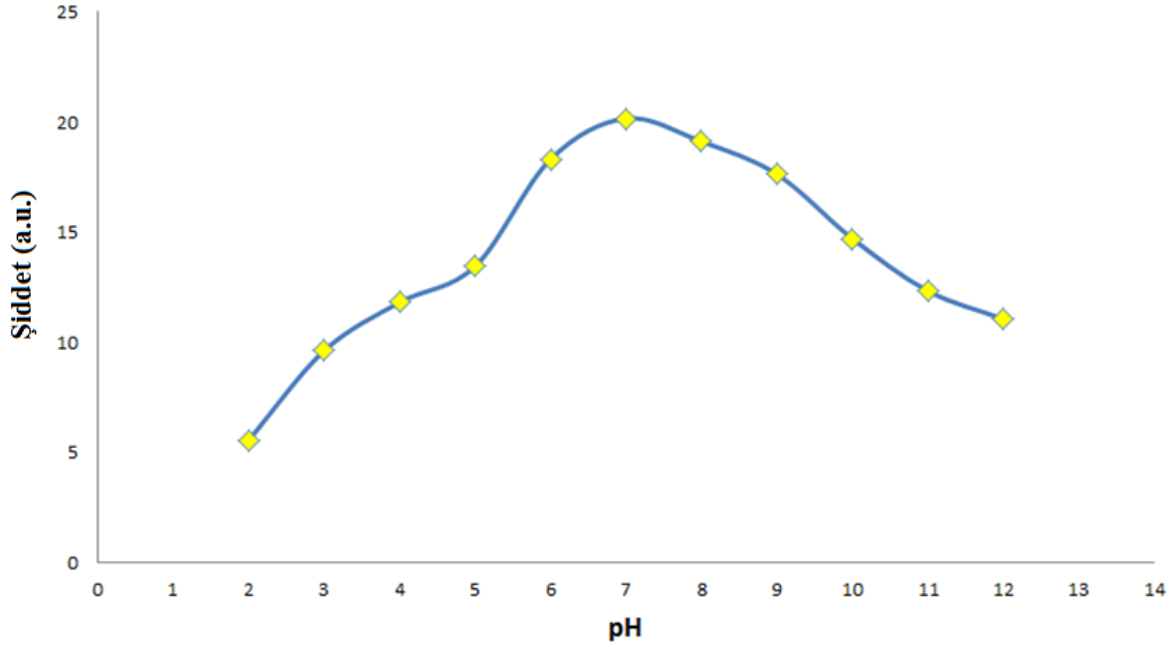
### 3.2. Nano AChE enzimi ile numune analizinde çalışılacak pH'nın belirlenmesi (Determination of pH to be studied in sample analysis with nano AChE enzyme)

Analizler esnasında çalışılacak pH'nın belirlenmesi amacıyla çeşitli pH değerlerine sahip tampon çözeltiler hazırlanmıştır. 100 µL nano AChE, 150 ppm paraokson çözeltisinden 1 mL alınmış ve hazırlanan tampon çözeltilerle hacim 3 mL'ye seyreltilmiştir. Farklı pH değerlerine sahip olarak hazırlanan her bir numune çözeltisi 300 nm dalga boyuna sahip ışınla uyarılarak floresans şiddetleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı pH değerlerinde elde edilen floresans şiddetleri

ppm(mg/L)	pH	Intensity (a.u.)
150	2	5,571
150	3	9,623
150	4	11,818
150	5	13,456
150	6	18,314
150	7	20,162
150	8	19,115
150	9	17,631
150	10	14,711
150	11	12,336
150	12	11,071

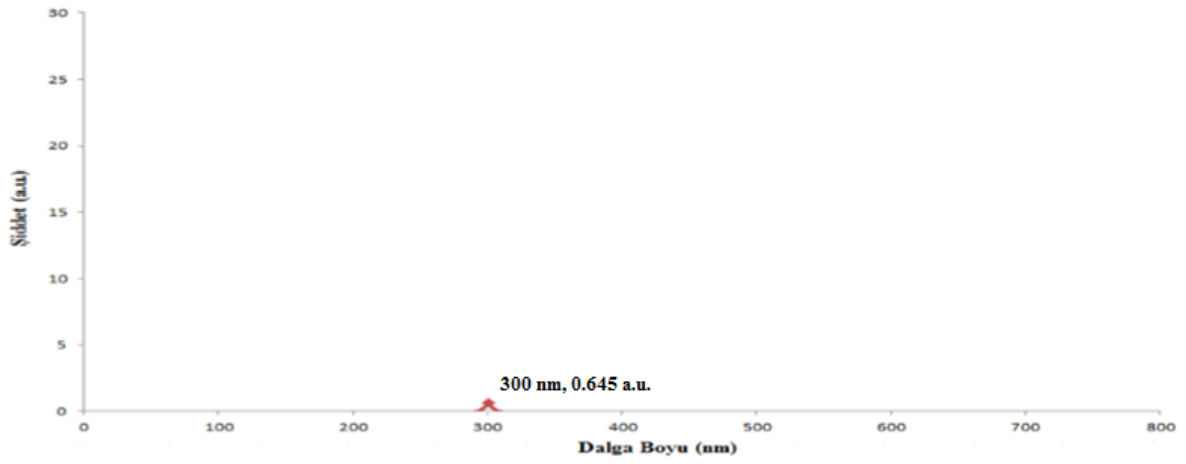
Elde edilen ölçüm sonuçları grafiğe geçirilmiştir (Şekil. 11). Ölçüm sonuçları incelendiğinde en yüksek floresans şiddetinin pH 6-8 arasında elde edildiği görülmüştür. Bundan dolayı bundan sonraki analizlerde HEPES (pH=7,4) tamponu kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 11. Ölçüm sonuçlarına pH etkisi

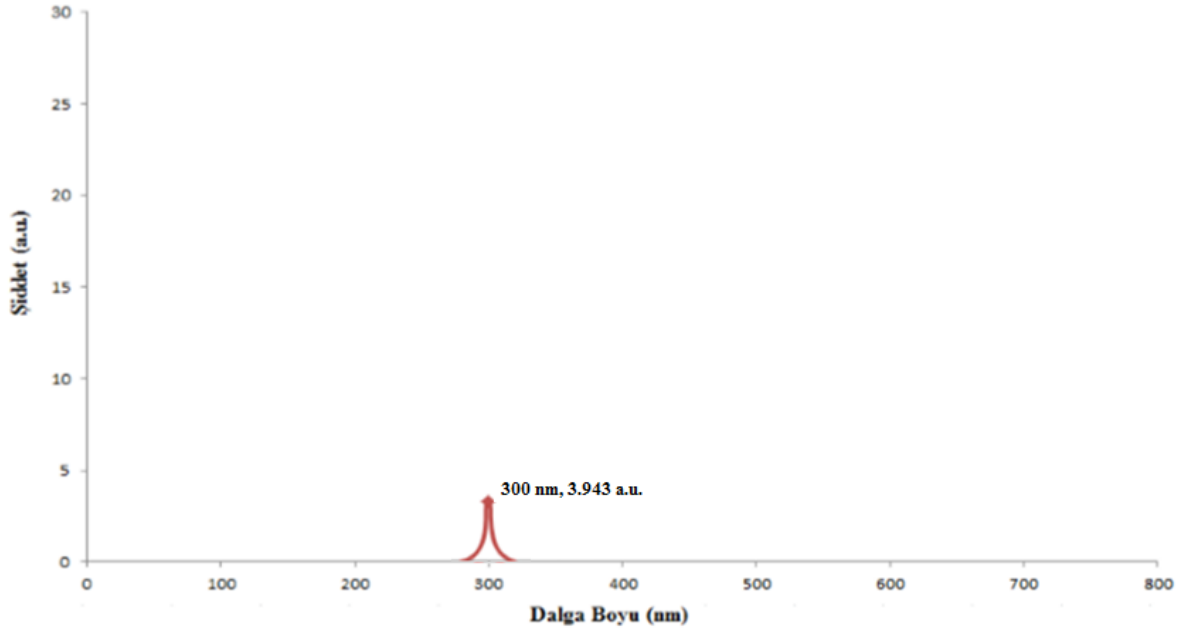
### 3.3 Nano AChE enzimi ile artan derişimdeki paraokson arasındaki etkileşimin incelenmesi (Investigation of the interaction between nano AChE enzyme and paraoxon at increasing concentration)

Farklı derişimlerdeki paraokson ile nano AChE etkileşimini incelemeye önce çalışılacak pH ve dalga boyunu belirlemiştik. Şimdi ise belirlenen çalışma şartlarında 0,01 ppm ile 200 ppm arasında değişen paraokson numunelerinin floresans şiddetleri ölçülmüştür. 0,01 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 12’de verilmiştir.



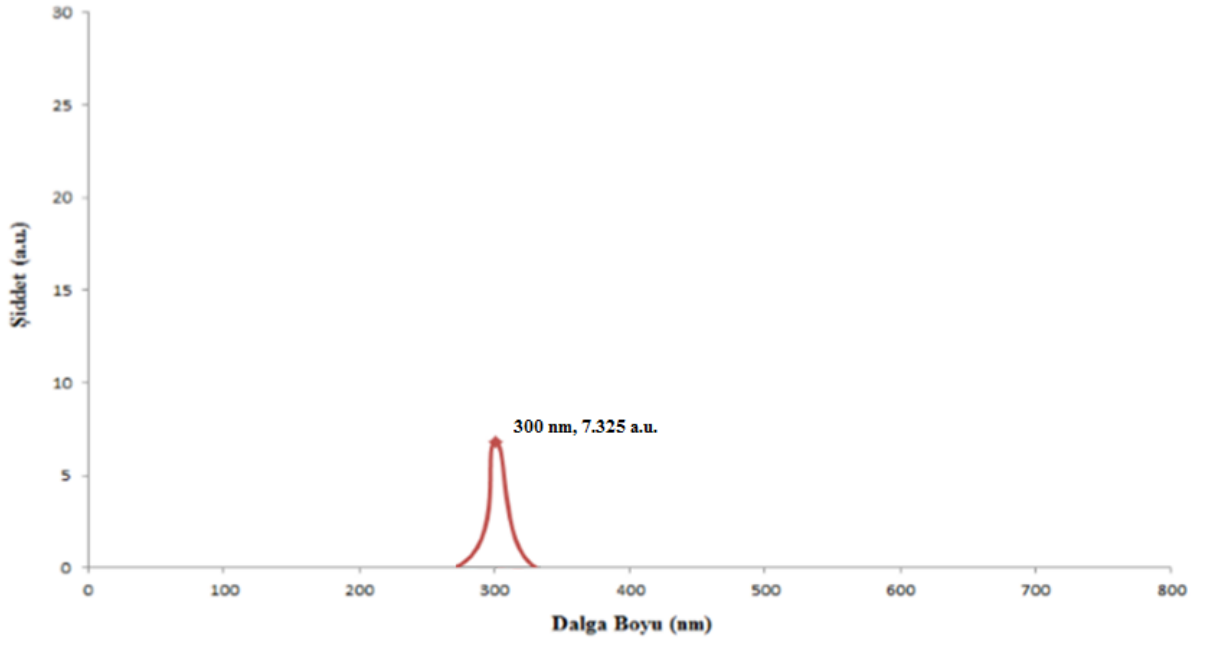
*Şekil 12. 0,01 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

0,1 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 13’de verilmiştir.



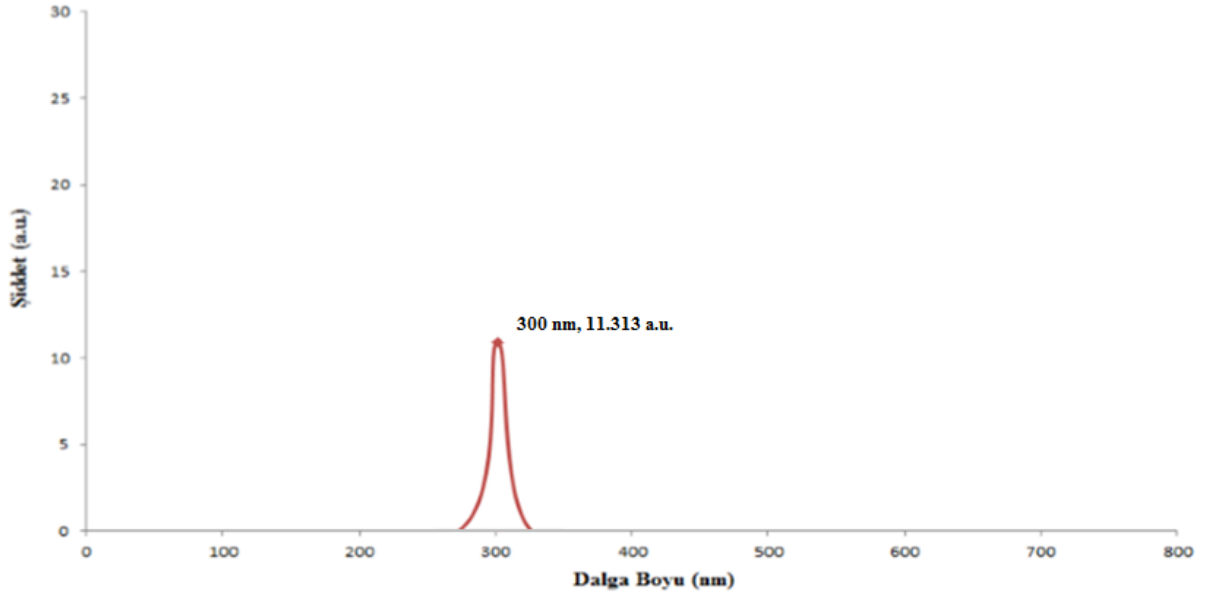
*Şekil 13. 0,1 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

1 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 14’de verilmiştir.



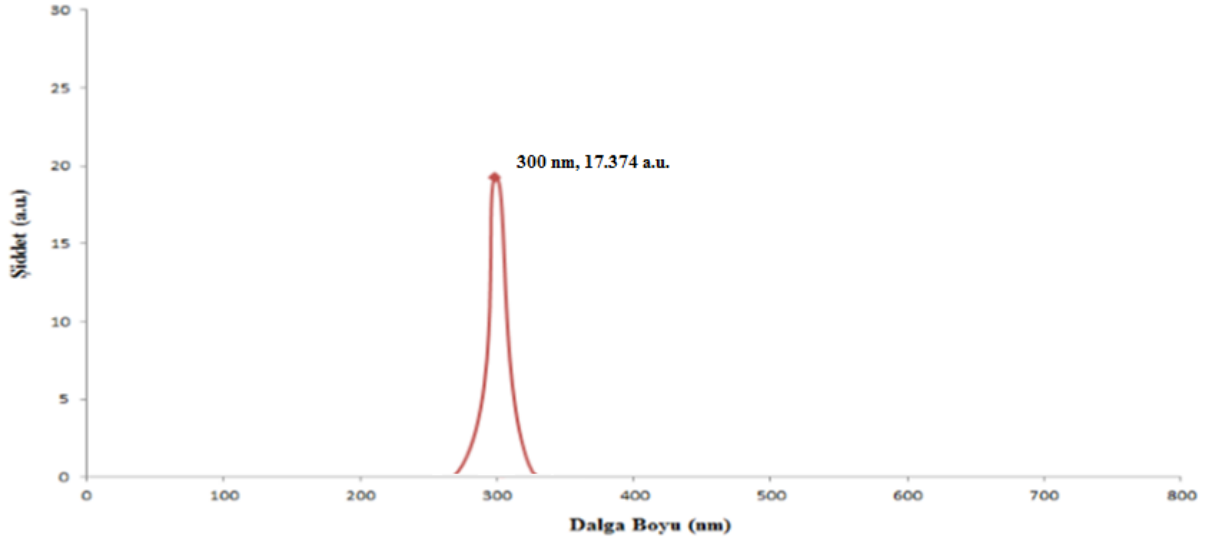
**Şekil 14.** 1 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

10 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 15’de verilmiştir.



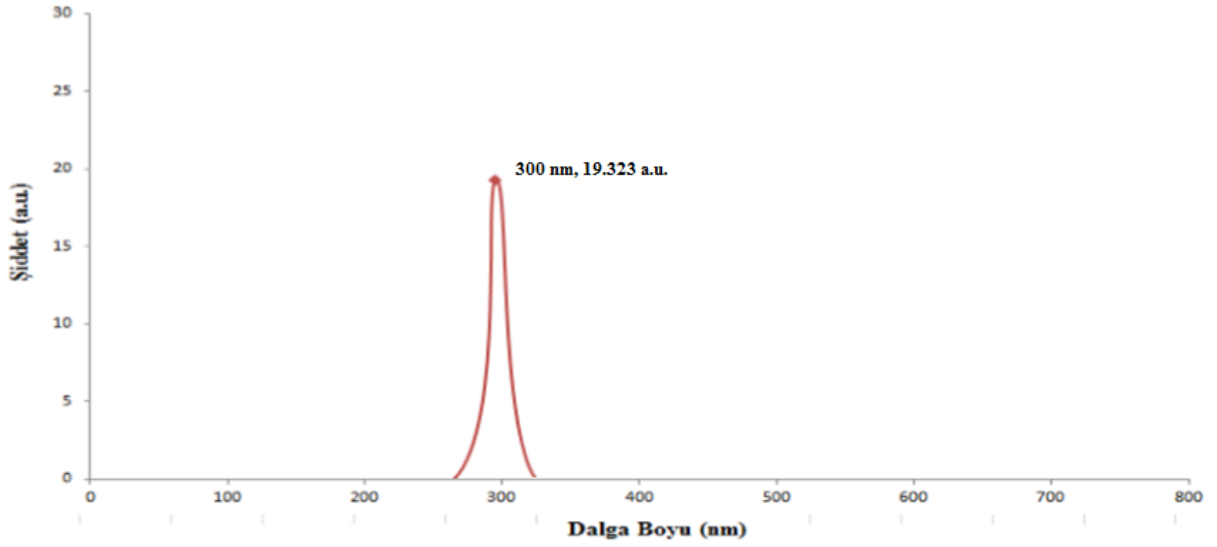
**Şekil 15.** 10 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu

50 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 16’da verilmiştir.



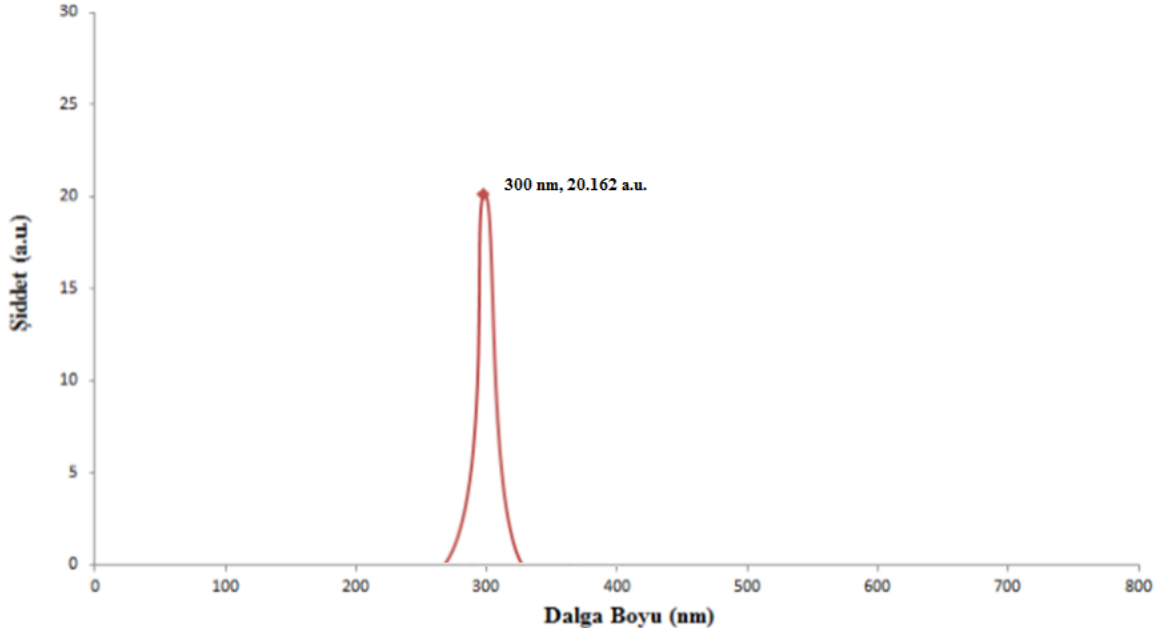
*Şekil 16. 50 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

100 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 17’de verilmiştir.



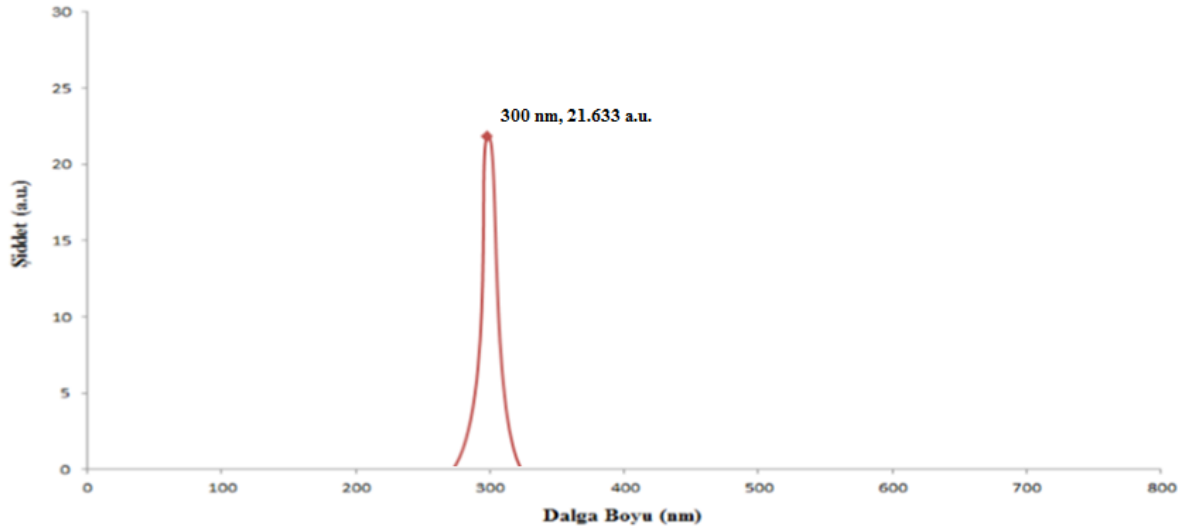
*Şekil 17. 100 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

150 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 18’de verilmiştir.



*Şekil 18. 150 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

200 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu Şekil 19'da verilmiştir.



*Şekil 19. 200 ppm paraokson içeren numunenin 300 nm dalga boyundaki floresans spektrumu*

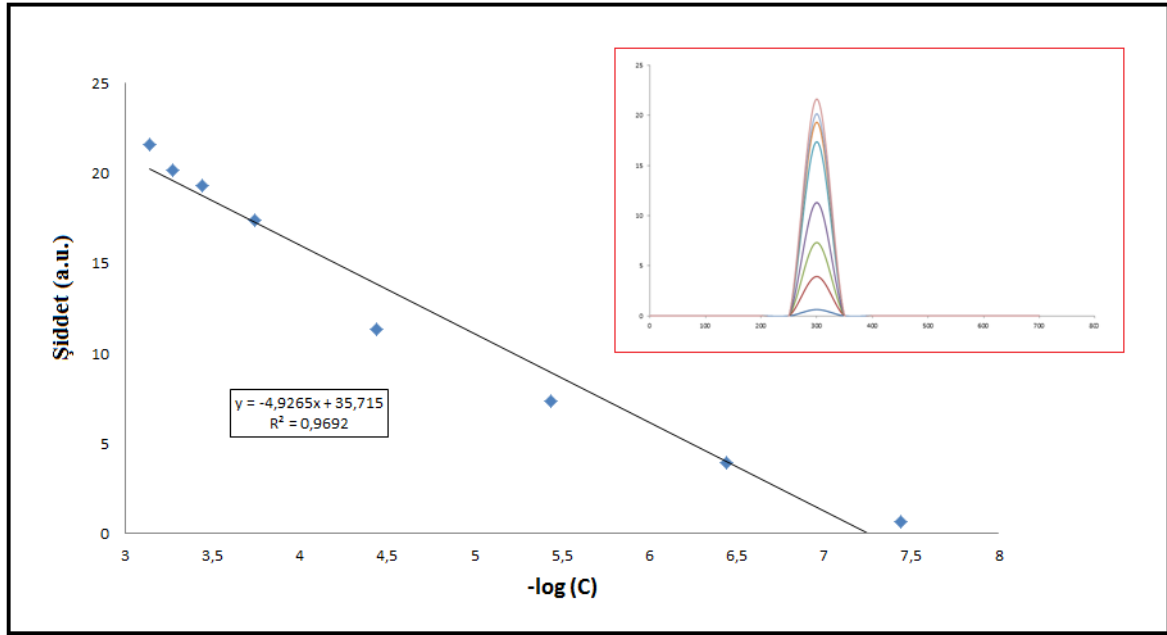
Farklı konsantrasyonlarda paraokson numuneleri için elde edilen ölçüm sonuçları toplu olarak Tablo 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Paraokson numunelerine ait floresans şiddetleri

ppm(mg/L)	Floresans Şiddeti (a.u.)
0.01	0,645
0.1	3,943
1	7,325
10	11,313
50	17,374
100	19,323
150	20,162
200	21,633

### 3.4 Floresans ölçümleri sonucunda elde edilen paraoksone ait kalibrasyon grafiği (Calibration graph of paraoxone obtained as a result of fluorescence measurements)

Paraoksonun farklı derişimlerdeki numuneleriyle alınan floresans ölçümleri grafiğe geçirilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 20'de gösterilmiştir.



**Şekil 20.** Farklı derişimlerdeki paraokson numunelerine ait kalibrasyon grafiği

Kalibrasyon doğrusu için paraoksonun çalışılan en yüksek derişimi olan  $7,2 \times 10^{-4}$  mol L<sup>-1</sup> değerine kadar floresans spektroskopisinde doğrusala yakın bir ilişki gözlenmiş ve elde edilen regresyon katsayısı 0,9692 olarak bulunmuştur. LOD (Gözlenebilme Sınırı) ve LOQ (Tayin Sınırı) hesaplanması maksadıyla blank (kör) çözeltileri hazırlanarak 5 farklı ölçüm alınmıştır (Tablo 3).



**Tablo 3.** Blank çözeltilerden alınan ölçüm sonuçları

Ölçüm Numarası	Floresans Şiddeti (a.u.)
1	0,32
2	0,37
3	0,35
4	0,41
5	0,29

Alınan ölçüm sonuçlarının ortalaması 0,348, standart sapma ise 0,046 olarak hesaplanmıştır. Bulunan standart sapma değerinden yararlanılarak LOD ve LOQ değerlerine geçilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda LOD değeri  $6,0 \times 10^{-8}$  M, LOQ değeri  $6,98 \times 10^{-8}$  M olarak bulunmuştur.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kimyasal silah yapımında kullanılan sinir ajanlarının algılanmasına yönelik nano enzim sistemi temelli sensör geliştirilmiştir. Nanopartikül olarak rutenyum tabanlı aminoasit monomerleriyle fotosensitif çapraz bağlama (ANADOLUCA) yöntemine göre sentezlenen nano enzim sistemi kullanılmıştır. Nano AChE enzimi elde edilirken mikroemülsiyon polimerizasyon tekniği kullanılmıştır. AChE, (MATyr)<sub>2</sub>Ru(bipy)<sub>2</sub> ile etkileştirilerek mikroemülsiyon polimerizasyon ortamı hazırlanmıştır. Başlatıcı olarak ise APS kullanılmıştır. Elde edilen nano enzimin floresans spektrumu alınmış ve floresans özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Daha sonra nano enzim sisteminde çalışılacak dalga boyunu belirlemek amacıyla 300-625 nm aralığında AChE nano enzimi 150 ppm paraokson ile etkileştirilmiş ve floresansın en çok değiştiği dalga boyu çalışılacak dalga boyu olarak seçilmiştir. Yapılan ölçümlerde çalışılacak dalga boyu olarak 300 nm belirlenmiştir. Daha sonra çalışma pH'sını belirlemek amacıyla pH 2-12 arasında 150 ppm paraokson numunesi için ölçümler alınmış ve en uygun pH'nın 6-8 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu maksatla tampon çözelti olarak HEPES (pH=7,4) kullanılmıştır. 300 nm dalga boyu ve 7,4 pH değerinde, 0,01 ppm ile 200 ppm arasında değişen paraokson numunelerinin nano enzim ile etkileştikten sonraki floresans şiddetleri ölçülmüştür. Elde edilen floresans şiddetleri kalibrasyon grafiğine geçirildi. Elde edilen grafikte doğrusala yakın bir ilişki gözlenmiş ve elde edilen regresyon katsayısı 0,9692 olarak bulunmuştur. LOD (Gözlenebilme Sınırı) ve LOQ (Tayin Sınırı) hesaplanması amacıyla blank (kör) çözeltileri hazırlanarak 5 farklı ölçüm alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda LOD değeri  $6,0 \times 10^{-8}$  M, LOQ değeri  $6,98 \times 10^{-8}$  M olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar bize göstermektedir ki geliştirilen yöntemle çok düşük miktarlardaki paraokson numunelerinin analizi yapılabilmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Karayılanoğlu, T. (1996). Kimyasal, biyolojik ve nükleer silahların tıbbi etkileri. Ankara: GATA Basımevi.
- [2] Hıncal, F., Çeliker, A., Özgüven, Ş., Kaya, E. (1991). Kimyasal ve biyolojik savaş ajanlarının sağlık üzerine etkileri. Ankara: Hacettepe İlaç ve Zehir Bilgi Merkezi.
- [3] Jeyaratnam, J. (1990). Pesticides: poisoning as a global health problem. World Health Stat., Vol. Q.43, 139-144.
- [4] Kamanyire, R., Karalliedde, L. (2004). Organophosphate toxicity and occupational exposure. Occup. Med., Vol. 54, 69-75.
- [5] Sunay, S. (2010). Paraoksonaz polimorfizminin ve paraoksonaz enzim aktivitesinin pestisitlere maruz kalan bireylerde araştırılması. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 80-85.
- [6] Şanlı, Y. (1984). Çevre sorunları ve besin kirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, Özel Sayı, 17-37.
- [7] Dragonov, D. I., Ladu, B.N. (2004). Pharmacogenetics of paraoxonases: a brief review. Naunyn-Schmiedeberg's Arch Pharmacol, Vol.369(1), 78-88.
- [8] Bajgar, J. (2004). Organophosphates/Nevre Agents poisoning: mechanism of action, diagnosis, prophylaxis and treatment. Advances In Clinical Chemistry, Vol. 38, 152-153.
- [9] Patocka, J., Kuča, K. (2004). Acetylcholinesterase and butyrylcholinesterase – Important enzymes of human body. Acta Medica (Hradec Králové), Vol. 4, No. 4.
- [10] Textbook of Military Medicine. Washington, D.C.: Office of the surgeon general at TMM publications, 1997.
- [11] Patocka, J., Kuca, K., Jun, J. (2005). Oxime reactivation of acetylcholinesterase inhibited by toxic phosphorus esters: In vitro kinetics and thermodynamics. J.Appl.Biomed., Vol.3, 91-99.
- [12] Kousba, A. A., Sultatos, L.G., Poet, T.S., Timchalk, C. (2004). Comparison of chlorpyrifos-oxon and paraoxon acetylcholinesterase inhibition dynamics: potential role of a peripheral binding site. Toxicol Sci., Vol.80(2), 239-48.
- [13] Başkol, G., Köse, K. (2004). Paraoksonaz: Biyokimyasal özellikleri, fonksiyonları ve klinik önemi. Erciyes Tıp Dergisi (Erciyes Medical Journal), Vol.26(2), 75-80.
- [14] Hong-Liang, L., De-Pei, L., Chih-Chuan, L. (2003). Paraoxonase gene polymorphisms, oxidative stress and diseases. J. Mol. Med., Vol.81(12), 766-79.
- [15] Rainwater, D.L., Rutherford, S.T., Dyer, D.E., Rainwater, D.S.A., Cole, J., Vandenberg, L., Almasy, L., Blangero, J. J., Maccluer, W., Mahaney, M. C. (2009). Determinants of variation in human serum paraoxonase activity. Heredity, Vol.102(2), 147-154.
- [16] Stetter, J., Penrose, W. (2002). Understanding chemical sensors and chemical sensors arrays; past, present and future. Sensors Update, Vol.10, 189-229.
- [17] Skoog, D.A., West, D.M., Holler, F.J. (1990). Fundamentals of analytical chemistry. Saunders College publishing.

- [18] Dondurmacıoğlu, F. (2011). Ağır metal iyonlarının tayini için optik sensörlerin geliştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul,.
- [19] A. Hulanicki, Glab, S., İngman, F. (1991). Chemical sensors definitions and classification. *Pure&apl Chem.*, Vol.63(9), 1247-1250.
- [20] Yağmuroğlu, O. (2018). Kimyasal Savunma ve Güvenlik. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Basımevi, s.3,30.
- [21] Yağmuroğlu, O., Diltemiz, SE. (2020). Development of QCM based biosensor for the selective and sensitive detection of paraoxon. *Analytical Biochemistry*, 591, 113572.
- [22] Diltemiz, S., Yağmuroğlu, O. (2019). Development of reflectometric interference spectroscopy based sensors for paraoxon determination. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology - C Life Sciences and Biotechnology*, 8 (1), 12-22.
- [23] Yağmuroğlu, O. (2017). Development of paraoxon-based sensors for the detection of chemical warfare agents. Doctoral Thesis. Anadolu University, Eskişehir.
- [24] Ateş, H., Kaya, B., Bahçeci, E. (2015). Nano malzemeler için üretim yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(2), 483–499.
- [25] Bergeson, L.L. (2004). The regulatory implications of nanotechnology. *Environmental Quality Management*, Vol.14(1), 71-82.
- [26] Bayındır, M., Köylü, Ö. (2006). Türkiye’de nanoteknoloji. *Bilim ve Teknik Dergisi - Yeni Ufuklar*, Vol.469, 1-23.
- [27] Erkoç, Ş. (2010). Nanobilim ve nanoteknoloji. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- [28] Liveri, F. (2006). Controlled synthesis of nanoparticles in microheterogeneous systems. New York: Springer science and Business media.
- [29] Goldstain, A. (1997). Handbook of nanophase materials. New York: Marcel Dekker Inc.
- [30] Doron, A., Katz, E., Willner, I. (1995). Organization of au colloids as monolayer films onto glass surfaces: application of the metal colloid films as base interfaces to construct redox-active monolayers. *Langmuir*, Vol.11, 1313-1317.
- [31] Say, R., Ersoz, A., Hur, D., Yılmaz, F., Denizli, A., Atılır Özcan, A., Emir Diltemiz, S., Yazar, S., Biçen, Ö., Büyüktiryaki, S., Keçili, R., Saka, G., Fındık, T. (16.06.2011). Photosensitive aminoacid-monomer linkage and bioconjugation applications in life sciences and biotechnology. U.S. Patent, No: WO/2011/070402.
- [32] Köse, E. (2015). Yapısında birden fazla fonksiyonu barındıran hetero nano-enzim yapılar ve elisa uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- [33] Wang, J., Krause, R., Block, K., Musameh, M., Mulchandani, A. (2009). Dual amperometric-potentiometric biosensor detection system for monitoring organophosphorus neurotoxins. *Analytica Chimica Acta.*, Vol.469, 197-203.
- [34] Lei, C., Valenta, M., Saripalli, P., Ackerman, J. (2007). Biosensing paraoxon in simulated environmental samples by immobilized organophosphorus hydrolase in functionalized mesoporous silica. *J. Environ. Qual.*, Vol.36, 233-238.

- [35] Hossain, M., Faisal, M., Kim, C., Cha, H., Nam, S., Lee, J. (2011). Amperometric proton selective strip-sensors with a microelliptic liquid/gel interface for organophosphate neurotoxins. *Electrochemistry Communication*, Vol.13, 611-614.
- [36] Meng, Z., Yamazaki, T., Sode, K. (2003). Enhancement of the catalytic activity of an artificial phosphotriesterase using a molecular imprinting technique. *Biotechnol. Lett.*, Vol.25, 1075-1080.

# Approximation Algorithm Variants for Convex Multiobjective Optimization Problems

Firdevs ULUS <sup>1</sup> *Bilkent University Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 06800, Çankaya/ANKARA*

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article

Received: 12/09/2019

Revision: 10/02/2020

Accepted: 26/02/2020

### Highlights

- Multiobjective optimization.
- Algorithms.
- Numerical Analysis.

### Keywords

Multiobjective  
Optimization  
Algorithms  
Convex Optimization  
Linear Programming

In this study, a recent objective space based convex multiobjective optimization algorithm (Algorithm 1), which generates inner and outer approximations to the whole Pareto frontier for any given error bound, is considered. The algorithm solves a Pascoletti-Serafini (PS) scalarization for every vertex of the current outer approximation and iterates by updating it. Different variants of this algorithm are proposed and their efficiencies are compared through numerical tests.

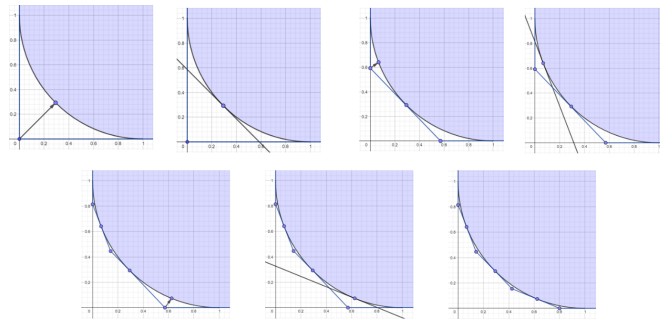


Figure A. Iterations of Algorithm 1

**Purpose:** Recent literature shows that Algorithm 1 works well for convex multiobjective optimization problems (MOPs) in the sense that independent of the dimension of the objective space, it returns an approximation to the whole frontier. The purpose of this study is to develop further variants to this algorithm and to compare the efficiencies.

**Theory and Methods:** The solution concepts for MOPs and results regarding the PS scalarization method are provided. Algorithm 1 is explained in detail. Further variants to the algorithm are proposed. Note that the variants are parametric and each  $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  describes a different variant. The variants are implemented using MATLAB. First, the performances of the variants ( $k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, \infty$ ) are compared for randomly generated linear MOP instances; then, they are compared for a scalable (in the sense of the dimension of the objective space) nonlinear convex problem. The number of objectives is increased from 2 to 6 for each.

**Results:** For linear MOP instances with two and three objective functions, we observe that  $k = \infty$  works the best and the performance of the algorithm improves if one decreases  $k$  as the number of the objective functions increases. For the nonlinear example however, no particular pattern is observed.

**Conclusion:** A convex MOP algorithm is considered and a set of variants to this algorithm is proposed. The variants are designed parametrically, one for each  $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ . One recovers the original variants by setting the two extreme points ( $k = 1, k = \infty$ ). Seven variants are implemented and tested through randomly generated linear MOPs and a scalable nonlinear convex MOP. It has been observed that the performances of the different variants differ as well. Even though no particular conclusion regarding the performances of the variants is observed for the nonlinear example, for the linear instances the algorithm works better if one decreases the value of  $k$  as the dimension of the objective space increases.

GU J Sci, Part C, 8(1): 224-236 (2020)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

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

## Dışbükey Çok Amaçlı Eniyileme Problemleri için Yaklaşıklaşma Algoritma Varyantları

Firdevs ULUS

<sup>1</sup>Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, dışbükey çok amaçlı eniyileme problemlerini Pareto küme iç ve dış yaklaşık kümeler bulmak anlamında ‘çözen’ bir Benson tipi algoritma ele alınmıştır. Algoritma her yinelemede o anki dış yaklaşık kümenin herhangi bir köşesi için Pascoletti-Serafini skalerizasyon modelini çözer. Çözülen bu model sayesinde köşenin Pareto küme yeterince yakın olup olmadığı anlaşılır. Eğer yeterince yakın değilse o anki dış yaklaşık küme bir kesit eklenerek güncellenir. Bu uygulama bir dış yaklaşık kümenin tüm köşeleri Pareto küme yeterince yakın oluncaya kadar tekrarlanır. Dış yaklaşık kümenin güncellemesi işlemi, Pareto küme yeterince yakın olmayan ilk köşe bulunduktan sonra yapılabileceği gibi tüm köşeler kontrol edildikten sonra da yapılabilmektedir. Bu seçim algoritmanın performansını etkilemektedir. Bu çalışma ile algoritmaya bu iki uç varyanta ek olarak farklı varyantlar önerilmiş ve tüm varyantların performansları bilgisayarlı testler yolu ile karşılaştırılmıştır. Rasgele türetilmiş doğrusal problemlerde, amaç uzayının boyutu arttıkça bu çalışma ile önerilen varyantların performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 12/09/2019  
Düzeltilme: 10/02/2020  
Kabul: 26/02/2020

### Anahtar Kelimeler

Çok Amaçlı Eniyileme Algoritmaları  
Dışbükey Eniyileme  
Doğrusal Programlama

### Keywords

Multiobjective Optimization Algorithms  
Convex Optimization  
Linear Programming

## Approximation Algorithm Variants for Convex Multiobjective Optimization Problems

### Abstract

We consider a Benson type algorithm to ‘solve’ convex multiobjective optimization problems in the sense that it generates inner and outer approximations to the Pareto frontier. In each iteration of the algorithm, a Pascoletti-Serafini scalarization is solved for an arbitrary vertex of the current outer approximation. In this way, it is possible to determine if the vertex is close enough to the Pareto frontier. If not, then the current outer approximation is updated by a cut. This procedure continues until all the vertices are close enough. The update of the outer approximation can be done right after finding the first vertex that is not close enough to the Pareto frontier; or after checking all the vertices. This choice affects the performance of the algorithm. With this study, additional variants that are different than these two extreme ones are proposed and the performances of all these variants are compared via computational tests.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birbiri ile çelişen birden fazla amaç fonksiyonunun aynı anda eniyilendiği çok amaçlı eniyileme problemlerinin birçok uygulama alanı mevcuttur (örneğin [23]) ve bu problemler literatürde çokça çalışılmıştır. Elbette çok amaçlı bir eniyileme problemini ‘çözmek’, tek amaç fonksiyonu olan standart bir eniyileme problemini çözmeye göre oldukça zordur. Literatürde belirli problem tipleri için geliştirilmiş çok amaçlı eniyileme problemleri çözüm yaklaşımları ve algoritmalar bulunmaktadır ([8]).

Bu çalışmada, her bir amaç fonksiyonunun en küçüklendiği çok amaçlı eniyileme problemleri ele alınmıştır. Böyle bir problemde genellikle tek bir en küçük amaç fonksiyonu değeri yoktur. Bunun yerine  $p$  boyutlu amaç uzayında ‘minimal’ noktaların kümesini bulmak gerekmektedir. Olurlu bir noktanın amaç uzayındaki görüntüsü ancak ve ancak kendisinden ‘daha küçük’ başka bir olurlu nokta görüntüsü yoksa minimaldir.

Amaç uzayındaki bir minimal nokta çok amaçlı eniyileme problemlerinde başatlanmamış/baskın (İng. Nondominated) nokta olarak adlandırılmıştır. Karar uzayında, amaç fonksiyonu altındaki görüntüsü baskın nokta olan çözümlere etkin çözüm denilmektedir.

Çok amaçlı eniyileme problemlerinde genellikle bir etkin çözümler kümesi bulmak hedeflenir. Bazı problem tiplerinde bütün etkin çözümlerin kümesini bulmak da mümkündür. Örneğin, Evans ve Steuer ([9]) çok amaçlı doğrusal programlama problemlerinin tüm etkin noktalarını bulan bir simpleks algoritması geliştirmiştir. Daha sonra bu algoritmanın çeşitli iyileştirilmeleri yapılmıştır ([1, 2]). Ancak genellikle tüm etkin çözümleri bulmak zor ve bazen de gereksizdir. Örneğin, doğrusal problemlerde yozlaşma (İng. Degeneracy) olduğunda birçok etkin çözümün görüntüsü tek bir baskın noktaya denk gelebilmektedir. Aslında tek amaç fonksiyonu olan sıradan bir eniyileme probleminde de amaç tüm eniyi çözümler kümesini bulmak değil, bir eniyi çözüm bulmaktır. Benzer şekilde, çok amaçlı eniyileme problemlerinde de tüm etkin çözümleri bulmak yerine amaç uzayındaki tüm baskın noktalar kümesini ya da tüm baskın noktalar kümesini ‘yeterince iyi’ şekilde temsil edecek bir altkümesini verecek etkin çözümler altkümesi bulmak hedeflenir.

Bu çalışmada doğrusal ve dışbükey çok amaçlı eniyileme problemleri üzerinde durulacaktır. Yakın geçmişte bu problemler için motivasyonunu küme değerli eniyileme problemlerinden alan çözüm kavramları geliştirilmiştir. Buna göre ‘sonlu ( $\varepsilon$ -) çözüm’ verimli kümenin amaç uzayındaki baskın noktaların tamamını ( $\varepsilon$ -yaklaşıklıkını) oluşturabilen bir altkümesidir ([15, 16]).

Doğrusal ve dışbükey çok amaçlı eniyileme problemleri için tasarlanmış dış yaklaşıklama algoritmalarının öncüsü Benson’ın 1998’de doğrusal problemler için önerdiği algoritmadır ([3]) ve yazında benzer düzende çalışan dış yaklaşıklama algoritmaları sıkça Benson tipi algoritmalar olarak anılmaktadır. Benson’ın önerdiği algoritmanın doğrusal problemler için geliştirilmiş farklı varyantları [22, 12, 4]’te görülebilir. Ayrıca, doğrusal problemler için geometrik çiftleşik teorisi geliştirilmiş ([15]) ve çiftleşik problemin yapısı kullanılarak farklı (çiftleşik) dış yaklaşıklama algoritmaları geliştirilmiştir ([6, 12]). Dışbükey problemler için Benson tipi bir dış yaklaşıklama algoritması [7]’de önerilmiştir. Daha az sayıda skalerizasyon modeli çözen benzer bir algoritma ve onun geometrik çiftleşik versiyonu ise [16]’da önerilmiştir. Önerilen bu algoritmalar probleme sonlu  $\varepsilon$ - çözüm bulmaktadır.

Bu çalışmada baz olarak alınan algoritma, [16]’da geliştirilen Benson tipi dış yaklaşıklama algoritmasıdır. [16]’da bu temel algoritmanın iki varyantı önerilmiş, bunların belirli varsayımlar altında doğru çalıştığı ispatlanmıştır. Ancak sınırlı sayıda test problemi çözülmüş ve iki varyantın verimlilik açısından kıyası yapılmamıştır. Bu çalışma ile [16]’da önerilen temel algoritmaya farklı bir varyant önerilmektedir. Bu varyant parametrik olarak tasarlanmıştır ve bu parametrenin alabileceği iki uç değer alındığında [16]’da önerilen iki varyant elde edilmektedir. Ancak parametre sonsuz farklı şekilde seçilebilmektedir, bu yüzden onu problemin kendi yapısına uygun olacak şekilde seçmeye yarayacak bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşım kullanılarak alternatif varyantlar türetilmiş ve [16]’da önerilen iki (uç) varyant da dahil olmak üzere bu varyantlar sayısal testler kullanılarak birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Sayısal kıyaslamalar için rastgele türetilmiş doğrusal problemler ile temel bir dışbükey çok amaçlı eniyileme problemi kullanılmıştır. Her iki problem tipi için de amaç fonksiyonu ikiden altıya kadar değiştirilmiştir ve varyantların çalışma zamanları ile çözdükleri skalerizasyon modeli sayıları bu problem kümeleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Doğrusal problemler ele alındığında, varyantların verimliliğinin problem boyutuna bağlı olarak değişimi için bir çıkarım yapılabilirken, incelenen dışbükey örnek için genel bir çıkarım yapmak mümkün olmamıştır.

## 2. BAŞLANGIÇ (PRELIMINARIES)

Bir  $A \subseteq \mathbb{R}^p$  kümesinin dışbükey örtüsü, sınırı ve öziçi (İng. Interior) sırasıyla  $dışb A$ ,  $snr A$  ve  $int A$  ile gösterilmektedir.  $A \subseteq \mathbb{R}^p$  dışbükey bir küme ve  $F \subseteq A$  onun dışbükey bir altkümesi olsun. Eğer,  $0 < \lambda < 1$  ve  $a^1, a^2 \in A$  için “ $\lambda a^1 + (1 - \lambda)a^2 \in F$  ancak ve ancak  $a^1, a^2 \in F$ ” ilişkisi varsa,  $F$  kümesine  $A$ ’nın bir yüzü denir. Sıfır boyutlu bir yüze *köşe*; bir boyutlu bir yüze ise *kenar* denir ([20]).

$A, B \subseteq \mathbb{R}^p$  kapalı kümeleri arasındaki Hausdorff uzaklık,



$$H(A, B) := \max \left\{ \sup_{x \in A} \inf_{y \in B} \|x - y\|, \sup_{y \in B} \inf_{x \in A} \|x - y\| \right\}$$

olarak tanımlanır ([21]). Burada  $\|*\|$ ,  $\mathbb{R}^p$ 'de tanımlı bir normdur. Bu çalışmada Öklid normu olarak alınmıştır.

Bu çalışmada  $y, y' \in \mathbb{R}^p$  noktalarının arasındaki tam olmayan sıralama ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:

$$y \leq y' : \Leftrightarrow y_i \leq y'_i, \text{ her } i = 1, \dots, p \text{ için}$$

$$y < y' : \Leftrightarrow y_i < y'_i, \text{ her } i = 1, \dots, p \text{ için}$$

$$y \not\leq y' : \Leftrightarrow y \leq y' \text{ ve } y \neq y'.$$

Ayrıca,  $\mathbb{R}_+^p = \{y \in \mathbb{R}^p : \text{Her } i \text{ için, } y_i \geq 0\}$  ile  $p$  boyutlu uzaydaki pozitif koni,  $e \in \mathbb{R}^p$  ile birlerden oluşan  $(1, \dots, 1)^T$  vektörü ve  $e^i \in \mathbb{R}^p$  ile  $i$ 'inci bileşeni bir olan birim  $(0, \dots, 1, \dots, 0)^T$  vektörü gösterilmektedir. Makale boyunca kümeler arasındaki toplam (+) işlemi Minkowski toplamını ifade etmektedir, yani,  $A, B \subseteq \mathbb{R}^p$  olmak üzere  $A + B := \{a + b : a \in A, b \in B\}$ .

### 3. PROBLEM TANIMI VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI (PROBLEM DEFINITION AND SOLUTION APPROACHES)

$f = (f_1, \dots, f_p)^T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$  vektör değerli bir fonksiyon ve  $X \subseteq \mathbb{R}^n$  dışbükey kapalı bir küme olsun. Her  $i$  için  $f_i : X \rightarrow \mathbb{R}$  dışbükey fonksiyon olmak üzere bir dışbükey çok amaçlı enküçükleme problemi

$$(P) \quad \text{enküçükle } f(x) \text{ öyleki } x \in X$$

olarak yazılabilir.

Olurlu kümenin  $f$  altındaki görüntüsü  $Y := f(X) = \{f(x) : x \in X\}$  olsun.  $\mathcal{P} := f(X) + \mathbb{R}_+^p$  kümesine (P) probleminin *üst görüntü kümesi* denmektedir. Üst görüntü kümesi dışbükeydir; ayrıca, eğer amaç fonksiyonu sürekli ise kapalıdır.

**Tanım 3.1 ([13]):** Amaç uzayındaki iki nokta  $y$  ve  $y'$  için  $y \leq y'$  ise  $y$  noktası  $y'$  noktasına baskındır;  $y < y'$  ise  $y$  noktası  $y'$  noktasına güçlü baskındır denir.  $Y$  kümesi içinde  $y$  noktasına baskın olan (kendisinden başka) bir nokta yoksa  $y$  noktası *baskın* noktadır. Benzer şekilde,  $y$  noktasına güçlü baskın olan bir nokta yoksa  $y$  noktası *zayıf baskın* noktadır. Amaç fonksiyonu altındaki görüntüsü (zayıf) baskın olan bir  $x \in X$  çözümüne (zayıf) etkin çözüm denir.

Bir dışbükey çok amaçlı eniyileme problemi için bütün (zayıf) baskın noktalar üst görüntü kümesinin sınırında yer almaktadır ([7]). (P) problemini çözmekle kastedilen, (zayıf) etkin çözümler kümesi bulmaktır. Bulunan çözüm kümesinin tüm zayıf baskın noktalar kümesini  $(f(X) \cap \text{snr } \mathcal{P})$  'kaliteli' şekilde temsil etmesi beklenir. Bu çalışmada, motivasyonunu küme değerli eniyileme problemlerinden alan aşağıdaki çözüm kavramı kullanılacaktır.

**Tanım 3.2 ([16]):** Sonlu sayıda (zayıf) etkin çözümden oluşan  $\bar{X} \subseteq X$  altkümesi  $\mathcal{P} \subseteq \text{dışb} (f(\bar{X}) + \mathbb{R}_+^p) - \varepsilon\{e\}$  ilişkisini sağlıyorsa  $\bar{X}$ 'e *sonlu (zayıf)  $\varepsilon$ -çözüm* denir.

Bu tanım, üst görüntü kümesine aşağıdaki gibi içerden ve dışardan yaklaşık çokyüzlüler üretmektedir:

$$\text{dışb} (f(\bar{X}) + \mathbb{R}_+^p) \subseteq \mathcal{P} \subseteq \text{dışb} (f(\bar{X}) + \mathbb{R}_+^p) - \varepsilon\{e\}.$$

Bu çok yüzlüler arasındaki Hausdorff uzaklık tam olarak  $\varepsilon\|e\| = \varepsilon\sqrt{p}$  kadardır. Eğer problem doğrusal ise, yani,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}, A \in \mathbb{R}^{n \times m}, b \in \mathbb{R}^m$  olmak üzere  $f(x) = Cx$  ve  $X = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax \leq b\}$  şeklinde verilmişse, o zaman üst görüntü kümesi kesin olarak hesaplanabilmektedir. Bir diğer deyişle,  $\varepsilon = 0$  alınabilmektedir. Elbette, doğrusal olmayan dışbükey problemlerde bu mümkün değildir. Ancak, eğer dışbükey problemin olurlu kümesi tıkHz (İng. Compact) ise her  $\varepsilon > 0$  için bir sonlu  $\varepsilon$ -çözüm vardır ([16]).

Yazında etkin ya da zayıf etkin çözümlerin bulunabilmesi için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Yaygın bir yaklaşım (P) probleminden türetilmiş, tek amaç fonksiyonlu ve çözüldüğünde (zayıf) etkin çözüm bulan bir eniyileme modeli, diğer adı ile skalerizasyon modeli, çözmektir. Skalerizasyon modellerinde genel olarak problem parametreleri haricinde model parametreleri vardır ve bu model parametreleri değiştirilerek farklı (zayıf) baskın noktalar bulmak mümkündür. Yakın zamanda bu modellerin kıyaslandığı bir çalışma Kasimbeyli v.d. tarafından yazına kazandırılmıştır [14].

Doğrusal ve dışbükey problemler için sıkça kullanılan iki skalerizasyon modeli, ağırlıklı toplam ve Pascoletti-Serafini skalerizasyonlarıdır. Ağırlıklı toplam skalerizasyonunda model parametresi olarak ağırlık vektörü ( $w \in \mathbb{R}^p$ ) bulunur:

$$(P(w)) \quad \text{enküçükle} \quad w^T f(x) \quad \text{öyleki} \quad x \in X.$$

Eğer  $w \in \mathbb{R}_+^p$  ise modelin eniyi çözümü (P) problemi için zayıf etkin çözümdür; eğer her  $i$  için  $w_i > 0$  ise o zaman etkin çözümdür ([13]).

Çok amaçlı eniyileme problemlerinde *ideal nokta*,  $y^I \in \mathbb{R}^p$ , her amaç fonksiyonunun diğerlerinden bağımsız olarak alabileceği en iyi değerin oluşturduğu vektördür, matematiksel olarak her  $i = 1, \dots, p$  için  $y_i^I = \inf_{x \in X} f_i(x)$  olarak tanımlanabilir. Dolayısı ile ideal noktanın  $i$ 'yinci bileşeni ( $P(e^i)$ ) skalerizasyon modelinin eniyi değeridir.

Pascoletti-Serafini skalerizasyon modelinde biri referans noktası ( $v \in \mathbb{R}^p$ ) ve biri de yön vektörü ( $d \in \mathbb{R}^p$ ) olmak üzere iki parametre vardır:

$$(P(v, d)) \quad \text{enküçükle} \quad z \quad \text{öyleki} \quad x \in X, \quad f(x) \leq v + zd.$$

Eğer  $d \neq 0 \in \mathbb{R}^p$  ise modelin eniyi çözümü, (P) problemi için zayıf etkin çözümdür ([19, 5]). Bu çalışma boyunca  $d = e$  olarak alınacaktır. Pascoletti-Serafini modelinin Lagrange çiftleş problemi

$$(D(v, d)) \quad \text{enbüyük} \quad \left( \inf_{x \in X} w^T f(x) - w^T v \right) \quad \text{öyleki} \quad w \geq 0, \quad w^T d = 1$$

olarak yazılabilir. Çiftleş problemin eniyi çözümü kullanılarak üst görüntü kümesi  $\mathcal{P}$ 'ye bir destekleyici (İng. Supporting) hiperdüzlem bulmak mümkündür.

**Teorem 3.3 ([16]):** Eğer  $X$  kümesinin öziçi boş küme değilse o zaman hem  $(P(v, e))$  hem de  $(D(v, e))$  probleminin eniyi çözümü,  $(x^*, z^*)$  ve  $w^*$ , vardır ve aralarında güçlü çiftleşlik ilişkisi geçerlidir. Ayrıca,  $h := \{y \in \mathbb{R}^p : (w^*)^T y = (w^*)^T f(x^*)\}$  hiperdüzlemi üst görüntü kümesi  $\mathcal{P}$ 'yi  $f(x^*)$  noktasında destekler ve  $H := \{y \in \mathbb{R}^p : (w^*)^T y \geq (w^*)^T f(x^*)\}$  yarıuzayı  $\mathcal{P}$ 'yi içerir.

#### 4. BENSON TİPİ BİR YAKLAŞIKLAMA ALGORİTMASI (A BENSON TYPE APPROXIMATION ALGORITHM)

Dışbükey çok amaçlı eniyileme problemlerine Tanım 3.2'de verildiği gibi zayıf  $\varepsilon$ -çözüm üreten temel ve (geometrik) çiftleş algoritmalar [16]'da verilmiştir. Bu çalışmada, amaç uzayını baz alan ve Benson tipi bir algoritma olan temel algoritma üzerinde durulacaktır.

Temel algoritmanın çalışma mantığı kısaca şu şekilde özetlenebilir: Algoritma başlangıçta üst görüntü kümesi  $\mathcal{P}$ 'yi kapsayan bir çokyüzlü bulur. Bu ilk dışyaklaşık çokyüzlü, genelde,  $y^I$  ideal nokta olmak üzere  $\mathcal{P}^0 := y^I + \mathbb{R}_+^p$  olarak alınmaktadır. Elbette  $\mathcal{P}^0$  kümesinin tek köşesi ideal noktadır.

Algoritma  $k$ 'yinci yinelemede o andaki dışyaklaşık çokyüzlü  $\mathcal{P}^k$ 'nin köşelerini bulur. Her bir  $v^k$  köşesi için  $(P(v^k, e))$  Pascoletti-Serafini skalerizasyon modelini çözerek bu köşenin üst görüntü kümesine  $e$  yönündeki 'uzaklığını' hesaplar. Eğer bu uzaklık istenilen hata payı  $\varepsilon$ 'dan büyükse o zaman Teorem 3.3 kullanılarak  $\mathcal{P}$ 'yi kapsayan ama  $v^k$ 'yi dışında bırakan  $H$  yarıuzayı bulunur. Bir sonraki yineleme için geçerli olacak dışyaklaşık çokyüzlü  $\mathcal{P}^{k+1} = \mathcal{P}^k \cap H$  olarak güncellenir. Eğer bir dışyaklaşık çokyüzlünün tüm köşeleri için hesaplanan uzaklık  $\varepsilon$ 'dan küçükse algoritma sonlanır. Algoritmanın sözde-kodu aşağıda verilmiştir:

**Algoritma 4.1:** (P) problemi için temel yaklaşıklama algoritması

Başlangıç:

Her  $i = 1, \dots, p$  için  $(P(e^i))$  modelini çöz, eniyi çözüm  $x^i$  olsun.

$$\bar{X} = \{x^1, \dots, x^p\}, y^l = \left(f_1(x^1), \dots, f_p(x^p)\right)^T, \mathcal{P}^0 := y^l + \mathbb{R}_+^p, k = 0.$$

Ana döngü:

1.  $M = \mathbb{R}^p$  olsun.
2.  $\mathcal{P}^k$ 'nin köşelerini bul, bu küme  $\mathcal{V}^k$  olsun.
3.  $j = 1$  olsun.
4. Eğer  $j > |\mathcal{V}^k|$  ise Adım 5'e git. Eğer  $j \leq |\mathcal{V}^k|$  ise
  - a.  $\mathcal{V}^k$ 'nin  $j$ 'nci elemanı  $v$  olsun.  $(P(v, e))$  ve  $(D(v, e))$  problemlerini çöz, sırasıyla  $(x^*, z^*)$  ve  $w^*$  eniyi çözümlerini bul.
  - b.  $\bar{X} \leftarrow \bar{X} \cup \{x^*\}$  olarak güncelle.
  - c. Eğer  $z^* > \varepsilon$  ise
    - i.  $M \leftarrow M \cap \{y \in \mathbb{R}^p: (w^*)^T y \geq (w^*)^T f(x^*)\}$
    - ii. (Varyant 1): Adım 5'e ilerle  
(Varyant 2):  $j \leftarrow j + 1$  olarak güncelle ve Adım 4'e git.
  - d. Eğer  $z^* \leq \varepsilon$  ise  $j \leftarrow j + 1$  olarak güncelle ve Adım 4'e git.
5. Eğer  $M \neq \mathbb{R}^p$  ise  $\mathcal{P}^{k+1} \leftarrow \mathcal{P}^k \cap M$ ,  $k \leftarrow k + 1$  olarak güncelle ve Adım 2'ye git. Eğer  $M = \mathbb{R}^p$  ise dur:  $\bar{X}$  bir sonlu (zayıf)  $\varepsilon$ -çözümdür.

Algoritma, başlangıçta  $p$  adet (her  $e^i$  için) ağırlıklı toplam skalerizasyonu çözerek, problemin ideal noktası  $y^l$ 'yi bulur. Çözülen skalerizasyon sonucu bulunan eniyi değerler, zayıf etkin çözümler olarak  $\bar{X}$  kümesine eklenir. İlk dış yaklaşık küme  $\mathcal{P}^0 := y^l + \mathbb{R}_+^p$  olarak tanımlanır ve yineleme sayısı  $k = 0$  olarak atanır.

Her yinelemede ilk adım o anki dış yaklaşık kümenin köşelerini bulmaktır. İlk yineleme için bunun sadece  $y^l$  noktası olduğu açıktır. Ancak, daha sonraki yinelemelerde bu aşamada bir köşe sıralaması (İng. Vertex enumeration) problemi, yani sonlu sayıda yarıuzayın kesişimi olarak tanımlanmış bir çokyüzlünün (bkz. Adım 5 ve Adım 4.c.i.) köşelerinin hesaplanması problemini, çözmek gerekmektedir. Bunun için geliştirilmiş farklı algoritmalar mevcuttur. Bu çalışmada Löhne ve Weißing tarafından geliştirilmiş MATLAB uyumlu *bensolve* programı kullanılmıştır ([17, 18]).

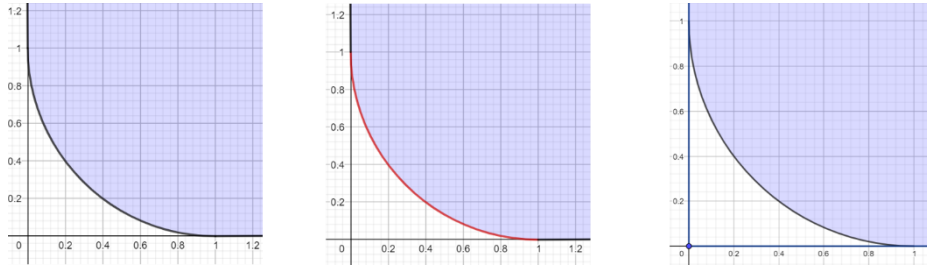
Algoritmanın  $k$ 'yinci yinelemede bulunduğu köşelerin kümesi  $\mathcal{V}^k$  ve bunların sayısı  $|\mathcal{V}^k|$  olsun. Adım 4'te, bulunan tüm bu köşeler sırasıyla ele alınmaktadır. Her bir köşe ( $v$ ) için  $(P(v, e))$  ve  $(D(v, e))$  problemleri çözülerek sırasıyla  $(x^*, z^*)$  ve  $w^*$  eniyi çözümleri bulunur.  $x^*$  bir zayıf etkin çözüm olarak  $\bar{X}$  kümesine eklenir. Eğer  $z^* \leq \varepsilon$  ise incelenen  $v$  köşesinin üst görüntü kümesi  $\mathcal{P}$ 'ye  $e$  yönündeki uzaklığı  $\varepsilon$ 'dan küçük olduğu için algoritma (eğer varsa), sıradaki köşeyi ele alır. Eğer  $z^* > \varepsilon$  ise  $v$  köşesi  $\mathcal{P}$ 'ye yeterince yakın olmadığı için o anki dış yaklaşık kümenin ( $\mathcal{P}^k$ 'nin) güncellenmesi gerekmektedir.

Güncellenme aşamasında algoritmanın iki varyantı bulunmaktadır. İlk varyantta  $M = H = \{y \in \mathbb{R}^p: (w^*)^T y \geq (w^*)^T f(x^*)\}$  olarak hesaplanır ve ilk kez uzak bir köşe bulunduğunda Adım 5'e ilerlenerek dış yaklaşık küme güncellenir. Böylece  $\mathcal{P}^{k+1}$  kümesi,  $\mathcal{P}^k$  kümesinin tek bir yarıuzayla kesiştirilmesi sonucu elde edilir. Algoritma Adım 2'ye dönerek bu kümenin köşelerini bulur.

İkinci varyantta ise her yinelemede, mutlaka her köşe için  $(P(v, e))$  modeli çözülür. Herhangi bir köşe için  $z^* > \varepsilon$  olarak bulunmuşsa elde edilen yarıuzay direkt olarak  $\mathcal{P}^k$  kümesi ile kesiştirilmek yerine,  $M$  kümesi ile kesiştirilerek saklanır. Tüm köşeler için bu işlem tamamlandığında, Adım 5'te  $\mathcal{P}^k$  kümesi bulunan tüm yarıuzaylarla, tek seferde kesiştirilerek güncellenir. Algoritma yine Adım 2'ye dönerek köşe sıralaması problemi çözer.

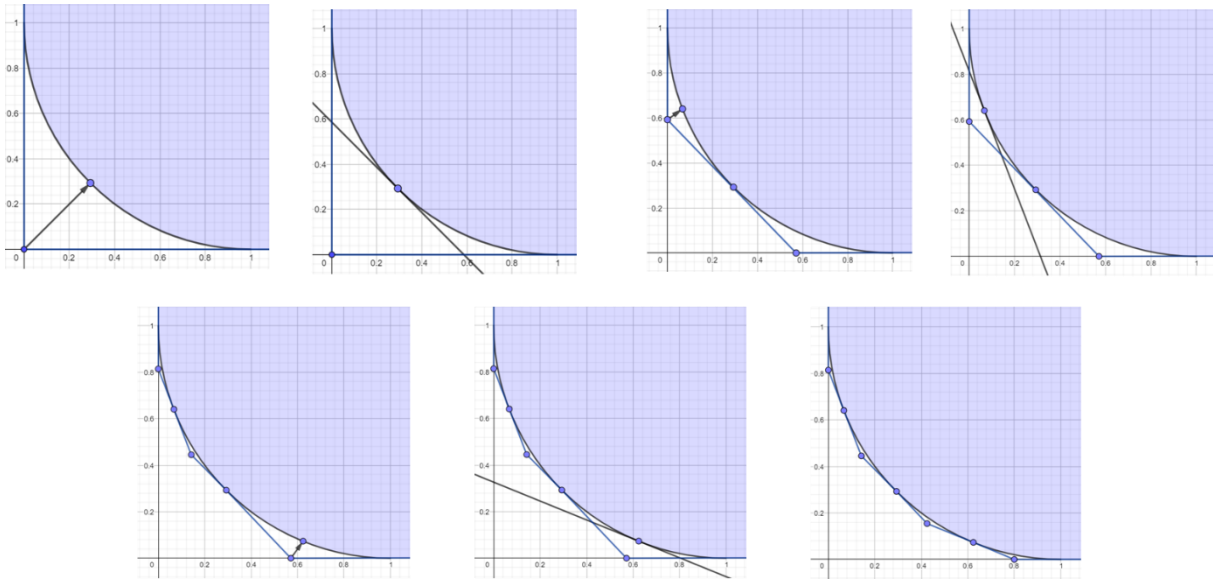
Herhangi bir yinelemede bulunan tüm köşeler üst görüntü kümesine yeterince yakın olarak bulunmuşsa  $M$  kümesi güncellenmeden kalır ve algoritma sonlanır. Aşağıda basit bir örnek üzerinde algoritma görsellerle anlatılmıştır.

**Örnek 4.2:** (P) problemi için  $f(x) = x$  ve  $X = \{x \in \mathbb{R}_+^2 : (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 1)^2 \leq 1\}$  olsun. Bu durumda  $n = p = 2$ 'dir. Problemin üst görüntü kümesi, baskın noktaları ve ideal noktası Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Örnek 4.2 için sırası ile üst görüntü kümesi (mavi küme), baskın noktalar kümesi (kırmızı çizgi) ve ideal nokta (koyu mavi nokta ile gösterilmiş 0 noktası)

Şekil 2'de ise Algoritma 4.1 Varyant 1'in çalışma basamakları gösterilmiştir. Figür 1 ilk döngüde çözülen Pascoletti-Serafini skalerizasyonunu, Figür 2 bu model sonucu çifteş çözüm kullanılarak bulunan destekleyici hiperdüzlemi gösterir. İlk yineleme sonucunda Figür 3 elde edilmiştir. İkinci yinelemeden sonra Figür 5 ve üçüncü yinelemeden sonra Figür 7 elde edilir. Bu figürdeki tüm köşeler üst görüntü kümesine yeterince yakın olduğu için Algoritma sonlanır. Şekil 2 kullanılarak Varyant 2'nin çalışma basamakları gösterilmek istense, Figür 5'in Figür 3 üzerine ve Figür 6'nın Figür 4 üzerine taşınması gerekirdi. Bu durumda Figür 7, ikinci döngü sonunda elde edilmiş olurdu.



**Şekil 2.** Algoritma 1 (Varyant 1)'in Örnek 4.2 üzerinde uygulama adımları (İlk satır soldan sağa Figür 1-4 ve ikinci satır soldan sağa Figür 5-7)

Algoritma 4.1'in doğru çalışarak probleme bir zayıf  $\epsilon$ -çözüm verdiği bilinmektedir ([16]). [16]'da sunulan sınırlı sayıda (doğrusal olmayan) dışbükey sayısal örnekte algoritmanın ilk varyantının ikinci varyanta göre aynı ya da daha az sayıda skalerizasyon modeli çözerek durduğu gözlemlenmiştir. Bu örneklerden iki amaç fonksiyonuna sahip olanlarda her iki varyant da aynı şekilde çalışırken, üç ve dört amaç fonksiyonu olan örneklerde Varyant 1 daha verimlidir. Elbette, sadece bu örnekler bakarak Varyant 1'in her zaman daha iyi (ya da en azından Varyant 2 kadar iyi) bir verimlilikte çalışacağı çıkarımını yapmak mümkün değildir.

Aslında, Varyant 1 ve 2'nin farklı yönlerden daha güçlü olma potansiyelleri vardır. Varyant 1'de, dış yaklaşık küme güncellendiğinde henüz kontrol edilmemiş bazı köşelerin, bu güncelleme sonucunda elenmesi mümkündür. Elbette bu durumda bu köşeler için Pascoletti-Serafini modeli çözülmeyecektir. Varyant 2'nin bir avantajı ise tüm köşeler kullanılarak güncelleme yapıldığı için dış yaklaşık kümenin, üst

görüntü kümesine, daha ‘dengeli’ yakınsamasıdır. Diğer bir deyişle, bu varyantta dış yaklaşık kümenin üst görüntü kümesine olan Hausdorff uzaklığı her yinelemede mutlaka azalmaktadır. Bunun sayesinde, algoritma erken durdurulduğunda elde edilen dış yaklaşık kümenin, üst görüntü kümesini her bölümünde daha iyi temsil etmesi beklenir. Ayrıca, Varyant 2’de genel olarak çok daha az sayıda köşe sıralaması problemi çözülmesi beklenir. Elbette, bu problemlerde, o anki dış yaklaşık küme, aynı anda birden fazla sayıda yarıuzay ile kesiştirilmektedir. Dolayısı ile çözülen köşe sıralaması problemi Varyant 1’e göre yapısal olarak daha zordur.

## 5. BENSON TİPİ ALGORİTMAYA FARKLI BİR VARYANT (A DIFFERENT VARIANT FOR THE BENSON TYPE ALGORITHM)

Bu bölümde Algoritma 4.1’e parametrik olarak tasarlanmış bir varyant önerilmektedir. Bu varyant parametre seçimine göre Varyant 1 ve 2’yi kapsamaktadır. Varyantın Algoritma 4.1’den farklı olduğu adım 4.c. adımıdır. Bir önceki bölümde açıklandığı gibi algoritmada o anki dış yaklaşık küme ya ilk kez uzak bir köşeye denk gelindiğinde (Varyant 1) ya da tüm köşeler tarandıktan sonra (Varyant 2) güncellenmektedir. Bunun yerine, uzaklık için ikinci bir kontrol yapılmasını öneriyoruz. Buna göre, belirlenmiş bir  $\tilde{\varepsilon} \geq \varepsilon$  için, Pascoletti-Serafini modeli çözülerek bulunan uzaklığın,  $\tilde{\varepsilon}$ ’den büyük olup olmadığına bakılmalı; eğer büyükse o anki dış yaklaşık küme güncellenmeli, değilse diğer köşelere bakmaya devam edilmelidir. Algoritmanın bu varyantına ait 4.c. adımın sözde-kodu aşağıda verilmiştir.

**Algoritma 5.1:** (P) problemi için temel yaklaşıklama algoritmasına farklı bir varyant:

4. c. Eğer  $z^* > \varepsilon$  ise
  - i.  $M \leftarrow M \cap \{y \in \mathbb{R}^p: (w^*)^T y \geq (w^*)^T f(x^*)\}$
  - ii. Eğer  $z^* < \tilde{\varepsilon}$  ise  $j \leftarrow j + 1$  olarak güncelle ve Adım 4’e git.
  - iii. Eğer  $z^* \geq \tilde{\varepsilon}$  ise Adım 5’e ilerle.

Kolayca anlaşılacağı gibi eğer  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon$  olarak alınırsa her zaman 4.c.iii. geçerli olur ve Algoritma 4.1’de verilen Varyant 1 elde edilir. Buna karşılık eğer  $\tilde{\varepsilon}$  yeterince büyük seçilirse her zaman 4.c.ii. geçerli olur ve Algoritma 4.1’de verilen Varyant 2 elde edilir. Bu iki uç varyantın yanı sıra,  $\tilde{\varepsilon}$ ’yi farklı şekillerde seçmek, algoritmanın farklı varyantları olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, algoritma  $\tilde{\varepsilon} \geq \varepsilon$  olarak alındığı sürece doğru çalışır ve [16]’da gösterilmiş olduğu gibi probleme bir zayıf  $\varepsilon$ -çözüm verir. Ancak seçilen  $\tilde{\varepsilon}$  değeri algoritmanın performansını etkileyeceğinden, bu parametrenin nasıl seçileceği önemlidir.

Bu çalışmada  $\tilde{\varepsilon}$  seçimi için problemin kendi yapısı kullanılmıştır. Bu prosedürü anlatmadan önce şu gözlemleri yapalım:

**Açıklama 5.2:** (a) Eğer bir dışbükey çokyüzlü ( $A$ ) başka bir dışbükey kümeyi ( $B$ ) kapsıyorsa, bu iki küme arasındaki Hausdorff uzaklık  $H(A, B) := \sup_{x \in A} \inf_{y \in B} \|x - y\|$  olarak yazılabilir. Elbette, burada  $\inf_{y \in B} \|x - y\|$ ,  $x$  noktasının  $B$  kümesine uzaklığıdır. Eğer  $H(A, B) = \inf_{y \in B} \|\bar{x} - y\| > 0$  ifadesini sağlayan bir  $\bar{x} \in A$  varsa o zaman  $\bar{x}$ ,  $A$ ’nın bir köşesi olarak alınabilir. (b) Ayrıca, eğer  $A \supseteq C \supseteq B$  ifadesini sağlayan bir  $C$  kümesi varsa o zaman,  $H(A, B) \geq H(A, C)$  doğrudur.

Algoritma boyunca elde edilen dış yaklaşık kümeler  $\mathcal{P}^0 \supseteq \mathcal{P}^1 \supseteq \dots \supseteq \mathcal{P}^k \supseteq \mathcal{P}^{k+1} \supseteq \dots \supseteq \mathcal{P}$  ilişkisini sağladığı için Açıklama 5.2.’ye göre algoritma boyunca ele alınacak tüm köşeler içinde üst görüntü kümesine en uzak olanı  $\mathcal{P}^0$  kümesinin tek köşesi olan ideal noktadır. Burada dikkat edilmesi gereken, algoritma içinde bir köşenin üst görüntü kümesine olan Öklid uzaklığı değil, bunun yerine Pascoletti-Serafini skalerizasyonu çözülerek, köşeye kaç  $e$  eklenirse ilk kez üst görüntü kümesine çarpacağı hesaplanmaktadır. Elbette üst görüntü kümesine ilk kez değen nokta ( $v + z^*e$ ) ile köşe ( $v$ ) arasındaki uzaklık, köşenin üst görüntü kümesine olan Öklid uzaklığından daha büyük olacaktır. Yine de bu iki mesafe arasında bir ilişki olduğu açıktır.

Çalışmada  $\tilde{\varepsilon}$ , çözülen ilk Pascoletti-Serafini modelinin (ki bu  $(P(y^l, e))$  modelidir) eniyi değerine bağlı olarak seçilmektedir. Bu modelin eniyi değeri  $z^l$  olsun. Bu durumda ilerleyen yinelemelerde Pascoletti-Serafini modeli çözüldüğünde eniyi değer olarak  $z^l$ ’den daha küçük değerler elde edilmesi beklenebilir.

(Elbette bu her zaman doğru olmak zorunda değildir.) Bu gözlemden faydalanarak algoritmanın önerdiğimiz varyantında  $k \geq 1$  olmak üzere farklı  $k$  sayıları için  $\tilde{\varepsilon} = \frac{z^l}{k}$  olarak alınmıştır.

## 6. BİLGİSAYIMSAL TESTLER (COMPUTATIONAL TESTS)

Algoritma 4.1’de önerilen iki varyant ile bu çalışmada önerilen varyant, doğrusal çok amaçlı eniyileme problemleri ile özel yapıya dışbükey çok amaçlı eniyileme problemleri üzerinde test edilmiştir. Bütün test problemleri için  $k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, \infty$  olarak alınmak üzere toplamda yedi varyant kıyaslanmıştır.  $k = 1$  durumu Algoritma 4.1’de verilen Varyant 1’e ve  $k = \infty$  durumu Varyant 2’ye denk gelmektedir. Algoritma ve tüm varyantları MATLAB (R2019a versiyonu) kullanılarak uygulanmıştır. Skalerizasyon modelleri için çözücü olarak CVX kullanılmıştır ([10, 11]). Testler sistem özellikleri Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU@ 3.60GHz, 4.00GB, x64 Windows 10 olan bir bilgisayar kullanılarak yapılmıştır.

### 6.1. Doğrusal Problemler

Algoritma varyantlarının çalışma performansları öncelikle rastgele oluşturulmuş doğrusal problemler üzerinde test edilmiştir. Bilindiği gibi  $p$  boyutlu bir doğrusal çok amaçlı eniyileme problemi  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$  ve  $b \in \mathbb{R}^m$  olmak üzere (P) probleminde  $f(x) = Cx$  ve  $X = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax \leq b\}$  alınarak yazılabilir. Rastgele testler için  $A$  ve  $C$  matrislerinin her bileşeni ortalama değeri  $\mu = 0$  ve varyans değeri  $\sigma^2 = 100$  olan bağımsız normal dağılımlar kullanılarak,  $b$  vektörünün her bileşeni ise aralığı  $[0,10]$  olan bağımsız düzgün dağılımlar kullanılarak türetilmiştir. Nümerik karmaşıklıkları engellemek için bu matris ve vektörlerin her bileşeni, kendisine en yakın tamsayıya yuvarlanmıştır. Bu şekilde rastgele bir problem türetildikten sonra, ilk olarak, problemin olurlu ve sınırlı (ideal noktanın her bileşeninin sonlu olması bağlamında) olduğu kontrol edilmiş; bu koşulları sağlıyorsa test problemi olarak alınmıştır.

Bu çalışmada sayısal testler için  $p = 2, 3, 4, 5, 6$  boyutlu örnekler türetilmiştir. İki amaçlı problemler ( $p = 2$ ) için  $n = 10$  ve  $m = 20$  olarak alınmış, diğer tüm problem kümeleri için ise  $n = 5$  ve  $m = 10$  olarak alınmıştır. 2-5 boyutlu problem kümeleri 20şer, 6 boyutlu problem kümesi ise 10 adet olurlu ve sınırlı doğrusal problemden oluşmaktadır. Tüm problemler için  $\varepsilon = 10^{-5}$  olarak alınmıştır. Tablo 1’de her bir problem kümesi için yedi varyantın ortalama çalışma süreleri (saniye cinsinden) görülmektedir. Buna göre Varyant 1 ( $k = 1$ ) tüm problem kümelerinde en kötü sonucu vermiştir. İki boyutlu örnekler için diğer tüm örnekler benzer performans gösterirken,  $p = 3, 4, 5, 6$  boyutlu örnekler için sırası ile  $k = \infty, 10, 3, 5$  varyantları en iyi sonucu vermiştir.

Çalışma zamanları üzerinden, varyantları farklı bir şekilde daha kıyaslamak için, problem kümelerindeki her bir örnek için her varyantın o örneği en kısa zamanda çözen varyanttan yüzde kaç daha yavaş çözdüğü ve o örneği en uzun zamanda çözen varyanttan yüzde kaç daha hızlı çözdüğü hesaplanmıştır. Daha sonra, her problem kümesi için bu yüzdelerin ortalamaları alınarak Tablo 2 oluşturulmuştur. Daha detaylı açıklamak gerekirse, her bir problem yedi farklı varyantla çözüldüğünde çözüm süreleri  $T_1, \dots, T_\infty$  olarak kaydedilir. Burada  $T_i$ , ( $k = i$ ) varyantının problemi çözme süresidir. Daha sonra her  $k$  için  $\left(\frac{T_k - \min_i T_i}{\min_i T_i} \times 100\right)$  ve  $\left(\frac{\max_i T_i - T_k}{\max_i T_i} \times 100\right)$  değerleri hesaplanmış ve son olarak o problem kümesindeki tüm problemler üzerinden ortalama alınmıştır.

**Tablo 1.** Rastgele oluşturulmuş doğrusal problemler için algoritma varyantlarının ortalama çalışma süreleri (sn)

$p \backslash k$	1	2	3	4	5	10	$\infty$
2	4,05	3,98	3,96	3,97	3,97	3,96	3,96
3	6,34	6,08	6,13	6,06	6,06	6,06	<b>5,99</b>
4	21,20	18,23	18,11	18,12	18,21	<b>17,44</b>	17,88
5	48,26	36,43	<b>35,86</b>	36,64	36,08	37,07	38,64
6	477,43	114,53	148,82	<b>90,86</b>	114,61	181,09	112,76

**Tablo 2.** Rastgele oluşturulmuş doğrusal problemler için varyantların çalışma sürelerinin birbiri ile problem bazında kıyası

En iyi varyanttan ne kadar yavaş?							
$p \backslash k$	1	2	3	4	5	10	$\infty$
2	2,67	1,92	1,61	1,76	1,85	1,51	<b>1,28</b>
3	8,87	6,05	6,94	5,86	5,42	5,11	<b>4,92</b>
4	22,16	10,91	10,01	9,33	10,31	<b>4,87</b>	7,40
5	50,59	11,68	10,21	11,66	<b>9,47</b>	17,59	20,13
6	407,18	33,50	74,39	<b>4,66</b>	30,52	106,02	28,91
En kötü varyanttan ne kadar hızlı?							
$p \backslash k$	1	2	3	4	5	10	$\infty$
2	2,31	2,98	3,29	3,17	3,02	3,36	<b>3,58</b>
3	2,84	5,35	4,58	5,48	5,87	6,13	<b>6,31</b>
4	6,04	12,83	13,72	14,48	13,69	<b>17,54</b>	15,78
5	6,01	27,22	27,74	27,29	<b>28,67</b>	24,76	23,40
6	2,90	68,23	59,57	<b>76,17</b>	70,12	50,78	71,65

Tablo 2 incelendiğinde iki ve üç amaç fonksiyonu olan problemler için Varyant 2 ( $k = \infty$ )'nin en iyi sonucu verdiği ve problem boyutu arttıkça  $k$  değerini küçültmenin daha etkili olduğu gözlenmiştir: Sırası ile  $p = 4, 5, 6$  boyutlu örnekler için  $k = 10, 5, 4$  varyantları en iyi sonucu vermiştir.

## 6.2. Doğrusal Olmayan Bir Örnek

(P) problemi için  $f(x) = x$  ve  $X = \{x \in \mathbb{R}_+^n : \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 \leq 1\}$  olsun. Bu durumda  $p = n$ 'dir. Eğer  $p = 2$  olarak alınırsa Örnek 4.2 elde edilmiş olur. Bu problem,  $p$  boyutlu birim küre örneği olarak adlandırılabilir.

Bu problemlerde Pareto kümeyi tam olarak veren bir kesin çözüm bulunması mümkün değildir. Bu yüzden hata oranı  $\varepsilon$  seçimi algoritmanın çalışma hızını fazlaca etkileyecektir. Testler için farklı  $\varepsilon$  değerleri belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken iki noktaya dikkat edilmiştir. Birincisi, çalışma sürelerinin çok fazla uzamasını engellemek için problemin boyu arttıkça hata payı da artırılmıştır. Ayrıca, özellikle problemin boyutu büyüdükçe, ya skalerizasyon modelleri için kullanılan çözücü (CVX) ya da köşe sıralaması problemini çözmek için kullanılan program (*bensolve*) hata verebilmektedir. Testlerde kullanılan  $\varepsilon$  değerleri, her iki programın da hata vermeden çözüme ulaştığı en küçük değerler olarak alınmaya çalışılmıştır.

Bu problemlerde, CVX çözücü bazen skalerizasyon modelini çözse dahi çözümün kesin olmadığına dair bir uyarı gönderebilmektedir. Bu uyarı, iki boyutlu örnekler de dahil olmak üzere, çözülen tüm birim küre örneklerinde, bazı köşeler için çözülen Pascoletti-Serafini modellerinde görülmüştür. Bu çalışmada CVX için 'yüksek kesinlik' modu tercih edilmiştir. Buna göre, çalıştırılan skalerizasyon modeli için hata payı  $10^{-12}$ 'den küçükse model kesin bir şekilde çözülmüş sayılır; hata payı  $10^{-12}$  ile  $10^{-6}$  arasındaysa kesin olmayan bir şekilde çözülmüş kabul edilir. Bu hata payları bizim çok amaçlı problem için aldığımız  $\varepsilon$  değerlerinden çok daha küçük olduğu için, sonuçların hala geçerli olduğu düşünülebilir. Ancak, algoritma için çiftes çözümün de o anki dış yaklaşık kümeyi güncellemek için kullanıldığı gözden kaçırılmamalıdır.



Dolayısı ile bu aşamada kesin olmayan bir çözüm algoritmanın genel yapısını etkiyebilme potansiyeline sahiptir.

**Tablo 3.** Birim küre örneği için algoritma varyantlarının çalışma süreleri (sn)

$p   \varepsilon$	$k$	1	2	3	4	5	10	$\infty$
2	$10^{-4}$	33,31	28,47	30,50	28,59	28,72	29,07	28,39
2	$10^{-5}$	127,79	106,35	106,37	106,22	107,16	107,25	106,33
3	0,1	8,07	9,94	9,86	9,92	8,44	<b>7,93</b>	11,72
3	0,01	74,29	69,37	69,47	69,31	75,66	82,92	<b>60,90</b>
4	0,5	16,35	16,31	16,40	16,38	16,35	16,31	<b>13,87</b>
4	0,15	<b>39,79</b>	88,64	79,40	69,05	76,93	<b>39,75</b>	67,43
5	1	29,56	18,25	18,51	18,23	18,21	18,18	<b>13,76</b>
5	0,5	86,33	88,63	85,12	85,14	85,63	84,92	<b>43,92</b>
6	1	148,16	148,42	148,02	147,17	148,49	148,39	173,95

Tablo 3'te ilk kolon amaç fonksiyonu sayısını, ikinci kolon ise bu problem için alınan hata payı oranını göstermektedir. Altı boyutlu problem hariç tüm problemlerde iki farklı hata payı alınarak varyantların performansının hata payı değiştiğinde nasıl bir değişiklik gösterdiğine de bakılmıştır.

Tablo 3 incelendiğinde doğrusal problemlerde olduğu gibi genel bir sonuç çıkarmanın mümkün olmadığı gözlenmiştir. İki boyutlu problemde her iki hata payı değeri için de Varyant 1 en kötü performansı gösterirken diğer tüm varyantlar benzer performans göstermiştir. Üç boyutlu problemde ise hata payı değiştirildiğinde, en iyi ve en kötü performansı gösteren varyantlar yer değiştirmektedir. Tek başına bu gözlem bile genel bir çıkarım yapmanın doğru olmayacağını göstermektedir. Dört boyutlu problemde, hata payı büyük olduğunda bariz bir kazanan yokken, hata payı küçüldüğünde  $k = 1$  ve  $k = 10$  varyantlarının diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Beş boyutlu problemde her iki hata payı değeri için de Varyant 2 daha iyi çalışırken altı boyutlu problemde aynı varyant en kötü performansı göstermiştir. Tüm problemlere bakıldığında  $k = 1, 2, 10, \infty$  varyantları zaman zaman en iyi ya da en kötü performansı göstermiştir. Ancak  $k = 3, 4, 5$  varyantları hiçbir zaman en iyi ya da en kötü performansa sahip olmamıştır.

## 7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, dışbükey çok amaçlı eniyileme problemleri için geliştirilmiş bir dış yaklaşılama algoritması ele alınmış ve algoritmanın daha önce geliştirilmiş iki varyantına ek olarak yeni varyantlar geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni varyantlar parametrik olarak ve alınan parametrenin uç değerleri ile daha önce geliştirilmiş iki varyant elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada ayrıca, parametrik olarak tasarlanan bu varyantlar için parametre seçiminin nasıl yapılabileceğine dair bir öneri getirilmiş ve buna göre oluşturulan beş yeni varyant bilgisayarlı testler için kullanılmıştır.

Testler için öncelikle rastgele türetilmiş doğrusal örnekler kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu sayısı ikiden altıya kadar artırılmış ve her boyut için problem kümeleri oluşturulmuştur. Bu problemler tüm varyantlar ile çözdürülerek varyantların çözüm zamanları ile çözdükleri toplam skalerizasyon sayıları kıyaslanmıştır. Doğrusal problemler için daha önce geliştirilmiş ve bu çalışmada Varyant 1 olarak adlandırılan varyantın, en kötü performansı verdiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık iki ve üç boyutlu problemlerde, yine daha önce geliştirilmiş ve bu çalışmada Varyant 2 olarak adlandırılan varyantın, diğerlerinden daha iyi çalıştığı gözlemlenmiştir. Problem boyutu arttıkça bu çalışmada geliştirilmiş ara varyantların, daha önceden geliştirilmiş bu iki varyanta göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden, doğrusal problemler için ve özellikle de problem boyutu artırıldığında, geliştirilen varyantların ümit verici olduğunu söylemek mümkündür.

Doğrusal problemlere ek olarak, problemin yapısını değiştirmeden, amaç fonksiyonu ve karar değişkeni sayısının istenildiği kadar artırılabilen bir doğrusal olmayan dışbükey problem incelenmiştir. Bu problem tipi için de amaç sayısı ikiden altıya kadar artırılmıştır. Bu kez, hata payları da problemin boyutuna

göre farklı değerler alacak şekilde seçilmiştir. Bu problemler için, varyantların çözüm süreleri ve çözdükleri skalerizasyon modeli sayıları kıyaslandığında, genel bir çıkarım yapmak mümkün olmamıştır.

Çalışmada doğrusal olmayan problemler için de rastgele örnekler türetilip varyantların performansına bakmak, bu tip problemler için daha geçerli sonuçların elde edilmesini sağlayabilir. Ancak, bu çalışmada ele alınan tek doğrusal olmayan örnek bile, basit yapısına rağmen, zaman zaman çözülememiştir. Bunun sebebi ya CVX çözücüsünün ya da *bensolve* programının hata vermesidir. Dolayısı ile kullanılan bu çözücü ve programın sorunsuz şekilde çalıştığı örnekleri rastgele türetmek epey güçtür. Daha güçlü eniyileme ve köşe sıralaması çözücüleri ile böyle bir çalışma yapmak ileride mümkün olabilir. Örneğin, rastgele türetilmiş dışbükey ikinci dereceden çok amaçlı eniyileme problemleri için varyantların kıyaslaması yapılabilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada önerilen algoritma varyantların MATLAB kodlarının hazırlanmasında emeği geçen İrem Nur Keskin'e teşekkürlerimi sunarım.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Armand, P.: Finding all maximal efficient faces in multiobjective linear programming. *Mathematical Programming* 61, 357 – 375 (1993)
- [2] Armand, P. and Malivert, C.; Determination of the efficient set in multiobjective linear programming. *Journal of Optimization Theory and Applications* 70, 467-489 (1991)
- [3] Benson, H.P.: An outer approximation algorithm for generating all efficient extreme points in the outcome set of a multiple objective linear programming problem. *Journal of Global Optimization* 13, 1-24 (1998)
- [4] Csirmaz, L.: Using multiobjective optimization to map the entropy region. *Computational Optimization and Applications*, 63(1):45 – 67, 2016.
- [5] Eichfelder, G.: *Adaptive Scalarization Methods in Multiobjective Optimization* (Springer, Berlin, 2008).
- [6] Ehrgott, M., Löhne, A., Shao, L.: A dual variant of Benson's outer approximation algorithm. *Journal of Global Optimization* 52(4), 757–778 (2012)
- [7] Ehrgott, M., Shao, L., Schöbel, A.: An approximation algorithm for convex multi-objective programming problems. *Journal of Global Optimization* 50(3), 397–416 (2011)
- [8] Ehrgott, M., Wiecek, M. M.: Multiobjective programming. In: Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., (eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Science + Business Media, Berlin, 667–722 (2005)
- [9] Evans, J.P., Steuer, R.E.: A revised simplex method for multiple objective programs. *Mathematical Programming* 5(1), 54–72 (1973)
- [10] Grant, M. and Boyd, S.: CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta. <http://cvxr.com/cvx> (September 2013)
- [11] Grant, M. and Boyd, S.: Graph implementations for nonsmooth convex programs, *Recent Advances in Learning and Control* (a tribute to M. Vidyasagar), Blondel, V., Boyd, S. and Kimura, H. editors, 95-110, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer (2008).

- [12] Hamel, A.H., Löhne, A., Rudloff, B.: Benson type algorithms for linear vector optimization and applications. *Journal of Global Optimization* 59(4), 811–836 (2014)
- [13] Jahn, J.: *Vector Optimization: Theory, Applications, and Extensions*. Springer, Berlin (2004)
- [14] Kasimbeyli, R., Ozturk, Z. K., Kasimbeyli, N., Yalcin, G. D., & Erdem, B. I. (2019). Comparison of some scalarization methods in multiobjective optimization. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, 42(5), 1875-1905.
- [15] Löhne, A.: *Vector Optimization with Infimum and Supremum*. Springer, Berlin (2011)
- [16] Löhne, A., Rudloff, B., Ulus, F.: Primal and dual approximation algorithms for convex vector optimization problems. *Journal of Global Optimization* 60(4), 713–736 (2014)
- [17] Löhne, A., Weißing, B.: The vector linear program solver Bensolve -- notes on theoretical background, *European Journal of Operational Research* 260(3), 807-813 (2017)
- [18] Löhne, A., Weißing, B.: BENSOLVE: A free VLP solver, version 2.0.0.alpha (2014)
- [19] Pascoletti, A., Serafini, P.: Scalarizing vector optimization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 42(4), 499–524 (1984)
- [20] Rockafellar, R.T.: *Convex Analysis*. Princeton University Press, Princeton (1970)
- [21] Rockafellar, R.T., Wets, R. J-B.: *Variational Analysis*. Springer, Berlin (2009)
- [22] Shao, L., Ehrgott, M.: Approximately solving multiobjective linear programmes in objective space and an application in radiotherapy treatment planning. *Mathematical Methods of Operations Research* 68(2), 257–276 (2008)
- [23] Uçar, U. Ü., İşleyen, S. K., Demir, Y.: Üniversite Ders Çizelgeleme Probleminin Bulanik Ahp ve Çok Amaçlı Karışık Tam Sayılı Matematiksel Modelle Çözümü. *Gazi University Journal of Science Part C* 3(3): 513-523 (2015)