

## The Influence of Specimen Length on the Measured Fundamental Vibration Frequencies of Metal Faced Sandwich Beams

 İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ\*  Raphiq ALİYEV 

Akdeniz University Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Campus/ANTALYA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 14/07/2019

Revision 19/11/2019

Accepted: 21/12/2019

#### Highlights

- Vibration test
- Mechanical properties
- Boundary conditions

#### Keywords

Sandwich beam

Vibration test

Frequency

Specimen length

In this study, the influence of the clamped-free beam specimen length on the measured fundamental vibration frequencies of flat sandwich beams is investigated. First, sandwich beams having flat galvanized steel faces, and a rigid foam core are produced, and clamped beam vibration tests are conducted on specimens having three different lengths. The experimental results obtained are compared with the numerical results obtained using a 1D finite element model. The results obtained show that the clamped beam vibration test yields satisfactory results, and the longer specimens yield more accurate results.



Figure A. The experimental setup

**Purpose:** The main purpose is to determine the influence of specimen length on the vibration test results.

**Theory and Methods:** The experimental results obtained using a MEMS type accelerometer are compared with the numerical results obtained using a shear deformable beam finite element model.

**Results:** The results obtained show that the numerical and experimental results are in good agreement, especially for longer specimens.

**Conclusion:** (i) The numerical and experimental results obtained are in better agreement for longer beam specimens. (ii) It is observed that the frequency ratio decreases with increasing specimen length. (iii) The material properties used in the numerical model are verified by the experimental results obtained in this study. (iv) It is shown that MEMS type accelerometers can be used to conduct simple vibration tests. (v) The results obtained show that the not-perfect clamped end conditions cause deviations between the numerical and the experimentally obtained results.



## Metal Yüzlü Sandviç Konsol Kirişlerde Numune Boyunun Ölçülen Temel Titreşim Frekansına Etkisi

İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ\* Rəphiq ALİYEV

Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kampüs/ANTALYA

### Öz

Bu çalışmada düz yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının ölçümünde konsol kiriş numune boyunun neticelere etkisi incelenmiştir. Bu maksatla basit bir titreşim deney düzeneği oluşturulmuş ve imal edilen düz galvanizli sac yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kiriş numuneleri üzerinde 3 farklı konsol uzunluğu için titreşim deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel neticeler bir boyutlu bir sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş olan neticeler ile mukayese edilmiştir. Yapılan mukayese konsol kiriş titreşim deneyi ile sandviç kiriş temel titreşim frekansının hassas olarak ölçülebileceğini ve numune boyunun artırılmasının genel olarak hassasiyeti artırdığını göstermiştir.

### The Influence of Specimen Length on the Measured Fundamental Vibration Frequencies of Metal Faced Sandwich Beams

#### Abstract

In this study, the influence of the clamped-free beam specimen length on the measured fundamental vibration frequencies of flat sandwich beams is investigated. First, sandwich beams having flat galvanized steel faces, and a rigid foam core are produced, and clamped beam vibration tests are conducted on specimens having three different lengths. The experimental results obtained are compared with the numerical results obtained using a 1D finite element model. The results obtained show that the clamped beam vibration test yields satisfactory results, and the longer specimens yield more accurate results.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 14/07/2019  
Düzeltilme: 19/11/2019  
Kabul: 21/12/2019

#### Anahtar Kelimeler

Sandviç kiriş  
Titreşim deneyi  
Frekans  
Numune boyu

#### Keywords

Sandwich beam  
Vibration test  
Frequency  
Specimen length

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışmada düz metal yüzlü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının konsol kiriş titreşim deneyi ile elde edilmesinde numune uzunluğunun neticelere etkisi incelenmiştir.

Kiriş titreşim deneyi, kiriş rijitliği ve malzeme parametrelerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Titreşim deneyleri ile ilgili standartlar olan ASTM E 1876'da [1] tarif edilmiş olan basit mesnetli kiriş titreşim ve ASTM E 756'da [2] tarif edilmiş olan konsol kiriş titreşim deneyleri ile malzeme parametreleri belirlenebilir. Bu çalışmada mesnet teşkilinin çok daha kolay olması sebebiyle basit mesnetli kiriş yerine konsol kiriş titreşim deneyinin yapılmasına karar verilmiştir.

Literatürde kiriş titreşim deneyi ile ilgili aşağıda özetlenmiş olan pek çok çalışma bulunmaktadır. Hyer vd. [3] sınır şartlarının etkisini incelemişlerdir ve ankastre ucun tam anlamıyla tutulu olmaması halinde elde edilen neticelerin yüksek oranda hata içereceklerini belirlemişlerdir ve bu sebeple mesnetlenmeye özellikle dikkat edilmesini ve mesnetlerde bir miktar sıkışma meydana geleceğinden mesnetleme sırasında numune kalınlık değişiminin de takip edilmesi gerektiğini konusunda tavsiyelerde bulunmuşlardır. Sokolinsky vd. [4] sandviç kirişlerin titreşim davranışlarını incelemişler ve konsol kiriş titreşim deneylerinden elde ettikleri neticelerin elde ettikleri analitik ve sayısal neticeler ile uyumlu olduğunu ve sönümün göz önünde bulundurulması gerektiğini bildirmişlerdir. Rizos vd. [5] konsol kiriş testi ile kirişlerde çatlak konum ve

derinliğinin belirlenebildiğini göstermişlerdir. Benzer şekilde, titreşim deneyleri sandviç panellerde hasar oluşan bölgelerin belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır [6, 7].

Düşük maliyetli (MEMS tipi) dijital ivmeölçerler özellikle son yıllarda titreşim testlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Albarbar vd. [8] MEMS tipi ivmeölçerlerin performansını incelemişler ve bu tip düşük maliyetli ivmeölçerler ile darbe yüklemesinde yüksek maliyetli ivmeölçerler ile elde edilen frekans tepe değerlerine çok yakın değerlerinin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Varanis vd. [9, 10] metal kiriş ve çerçevelerin titreşim parametrelerini elde etmek için bu tip ivmeölçerler kullanmışlardır ve sayısal/analitik neticeler ile uyumlu deneysel neticeler elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, öncelikle basit bir titreşim deney düzeneği oluşturulmuş ve MEMS tipi dijital bir ivmeölçer ile elde edilmiş olan zaman-ivme verileri üzerinde FFT analizleri yapılarak iki farklı uzunluktaki numuneler için temel titreşim frekansları elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen deney neticelerinin mukayese edilebilmesi için formülasyonu Hinton ve Owen [11] tarafından verilmiş kayma deformasyonlu bir izoparametrik kiriş elemanı kullanılmış ve Octave [12] programı kullanılarak bir program yazılmıştır. Son olarak, elde edilen deneysel ve sayısal neticeler mukayese edilerek sunulmuştur.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Çekirdek malzemesi olarak yoğunluğu  $23.4 \text{ kg/m}^3$  olan Wallboard marka bir XPS (extruded polystyrene) köpük malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme için kayma modülü değeri ASTM C393 [13] standardına göre yapılmış olan sandviç kiriş 3 nokta eğilme testleri ile belirlenmiştir. Bu maksatla titreşim testleri için üretilmiş olan  $L=700\text{mm}$  uzunlukta  $0.7 \text{ mm}$  kalınlıkta galvanizli sac yüzü sandviç kiriş numuneleri kullanılmış ve 3 nokta eğilme testleri ile  $G_{12}^{XPS}=4.3 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir.

Galvanizli sac için aşağıdaki değerler alınmıştır;

$$E_{\zeta} = 2 \times 10^5 \text{ MPa}, \sigma_{\zeta}^a = 120 \text{ MPa}, \nu_{\zeta} = 0.3,$$

burada  $E_{\zeta}$  ve  $\sigma_{\zeta}^a$  kullanılan galvanizli sacın sırasıyla elastisite modülü ve çekmede akma gerilmesi değerleridir.  $\sigma_{\zeta}^a$  değeri üretici firma olan Erdemir A.Ş.'nin ürünler kataloğundan alınmıştır.

### 2.2. Numune Özellikleri

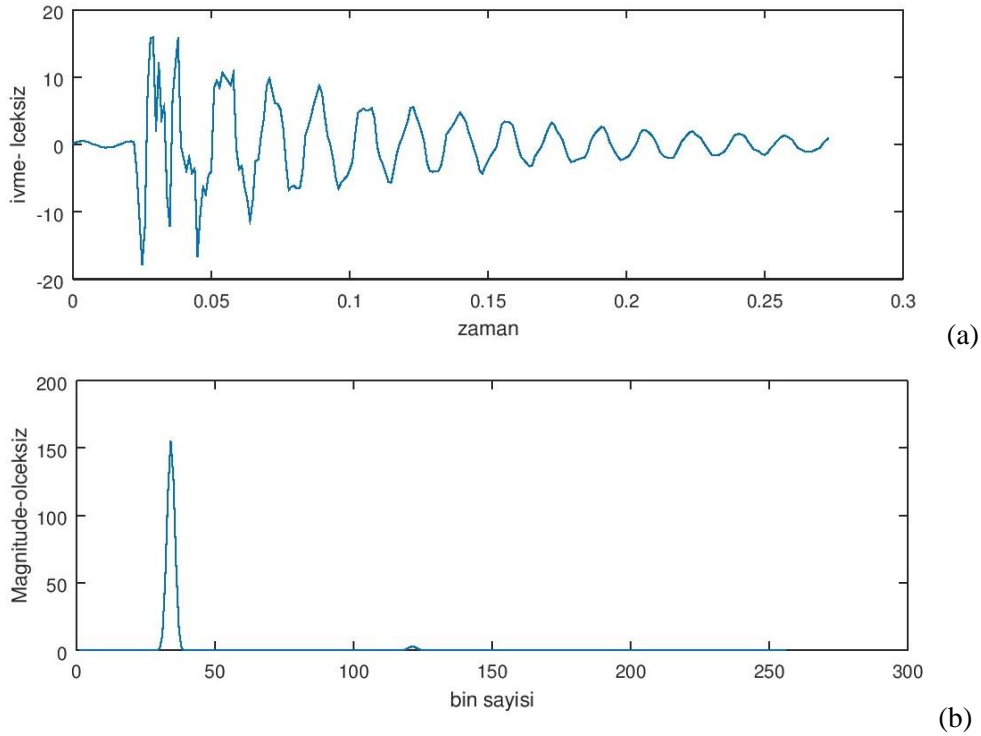
Kiriş uzunluğu  $L=700 \text{ mm}$ , kiriş genişliği  $b=50 \text{ mm}$ , çekirdek yüksekliği  $h_c=50 \text{ mm}$ , dış yüz kalınlığı  $t_f=0.7 \text{ mm}$  olarak alınmıştır. Dış yüzler XPS köpük çekirdeğe Mikrokim marka bir poliüretan yapıştırıcı kullanılarak oda sıcaklığında yapıştırılmıştır. İmal edilen numunelerin ağırlıkları sırasıyla  $463 \text{ gr}$ ,  $466 \text{ gr}$ , ve  $468 \text{ gr}$  olarak ölçülmüştür. Deneyler yapılmadan önce poliüretan bazlı yapıştırıcının kimyasal dayanımına tam olarak ulaşmasını sağlamak için 2 hafta kadar beklenmiştir.

### 2.2. Titreşim Deney Düzeneği (Vibration Test Setup)

Bu düzenekte ADXL345 marka 3 eksenli bir MEMS tipi dijital ivmeölçer kullanılmıştır.



Şekil 1. Konsol kiriş titreşim deney düzeneği



**Şekil 2.** Metal yüzülü sandviç kirişin titreşim cevabı (a) zaman, ve (b) frekans tanım alanlarında

Şekil 1’de gösterildiği şekilde, numuneler iki metal plaka arasında 4 adet bulon kullanarak mesnetlenmiştir. Mesnetleme sırasında rijit köpük çekirdeğe hasar vermemek için köpük çekirdeğin sıkışma miktarı kumpas ile ölçülerek kontrol edilmiştir. Ayrıca, konsol kirişin serbest ucuna ağırlık asılarak deplasman ölçümü yapılmış ve kirişin ankastre mesnet şartına ne derece uyduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, Garrido vd. [14] tarafından da bildirildiği üzere, rijit köpük malzemede yük uygulandıktan çok kısa süre sonra oluşan sünme deformasyonları sebebiyle sağlıklı netice alınamamıştır. Bu sebeplerden dolayı, ileride yapılacak çalışmalarda mesnetlenme bölgesinde uygulanan kuvvetin de ölçüleceği daha hassas bir mesnetleme düzeneği geliştirilmesi planlanmaktadır.

Deneyler sırasında konsol kiriş serbest ucuna ağır bir metal parça ile vurularak tahrik edilmiş ve örnekleme frekansı 912 Hz olacak şekilde toplam 250 zaman-ivme verisi bir Arduino kartı vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiştir. FFT analizleri Octave programında yazılmış bir program ile yapılmış ve Cooley vd. [15] tarafından geliştirilmiş olan Welch Yöntemi kullanılmıştır.

Programın örnek bir çıktısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2(a)’da gösterilen zaman-ivme verilerine FFT algoritması uygulandığında Şekil 2(b)’de gösterildiği şekilde temel titreşim frekansı elde edilebilir.

### 2.3. Sönüm Oranının Hesabı (Determination of the Damping Ratio)

Konsol kiriş titreşim deney deticelerini kullanarak sönüm oranını belirlemek için logaritmik azalma yöntemi kullanılmıştır; bkz. Chopra [16]. Az sönümlü sistemlerde sönüm oranı  $\xi$ ,

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}, \quad \delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{X_0}{X_n}\right), \quad (0 < \xi < 1) \quad 1$$

formülleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $X_n$  ve  $X_0$  sırasıyla göz önünde bulundurulan ilk ve son tepe noktalarındaki genlikler ve  $n$  ise birbirini takip eden tepe noktası sayısıdır.

Elde edilen deney neticelerini sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olan neticeler ile mukayese edebilmek için sönümsüz titreşim açısal frekansları,  $\omega_n$ ,

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad 2$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $\omega_d$  deneysel olarak elde edilmiş olan sönümlü titreşim hali için açısal frekanstır.

#### 2.4. Sonlu Elemanlar Modeli (The Finite Element Model)

Sandviç kiriş titreşim analizleri toplam 6 adet 3 düğümlü, 1. mertebeden kayma deformasyonlu izoparametrik kiriş elemanı kullanılarak oluşturulmuş bir sonlu elemanlar modeli ile yapılmıştır. Standart eleman formülasyonu Hinton ve Owen [11] tarafından detaylı olarak verilmiştir. Bu çalışmada sandviç kiriş kayma rijitliğinin tamamen köpük çekirdek tarafından sağlandığı varsayımı yapılmış ve kayma düzeltme katsayısı  $k=1$  olarak alınmıştır; bkz. Eşitlik 3.

$$[D] = \begin{bmatrix} AE & & \\ & EI & \\ & & kGA \end{bmatrix} \quad 3$$

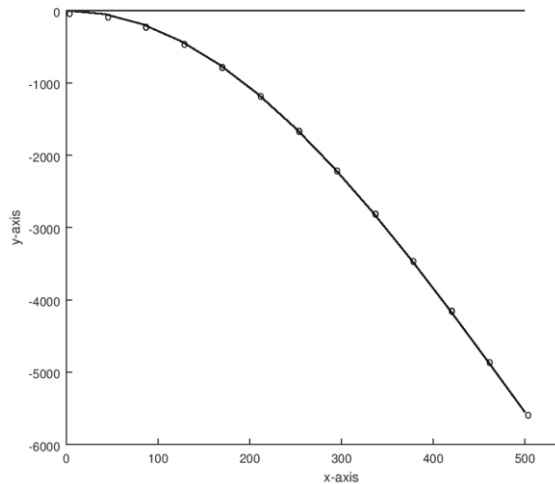
Eşitlik 3'te verilen malzeme rijitlik matrisi  $[D]$  nin elemanları olan aksel rijitlik  $AE$ , eğilme rijitliği  $EI$ , ve kayma rijitliği  $GA$  şöyle hesaplanmıştır;

$$EA \cong 2bt_f E_c,$$

$$EI \cong \frac{E_c bt_f}{6} (3h_c^2 + 6h_c t_f + 4t_f^2),$$

$$GA \cong bh_c G_{12}^{XPS}.$$

İvmeölçer ve bunu kiriş ucuna yapıştırmakta kullanılan yapıştırıcı ağırlığı yaklaşık 2 gr olarak ölçülmüştür. Bu ilave kütle modelde kiriş serbest ucuna denk gelen düğümüne konsantre kütle olarak ilave edilerek göz önünde bulundurulmuştur. Octave programı kullanılarak yazılmış olan program ile elde edilmiş olan örnek bir titreşim mod şekli Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekil 3'de  $x=0, y=0$  noktasında ankastre mesnet bulunmaktadır ve kirişin serbest ucu  $x=500, y=0$  noktasında bulunmaktadır.



Şekil 3.  $L=500$  mm uzunluktaki metal yüzü sandviç kiriş için sonlu elemanlar modelinden elde edilen 1. titreşim mod şekli

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

Bölüm 2.4'te tarif edilmiş titreşim deney düzeneği ile elde edilmiş olan deney neticeleri  $L= 500$ , ve  $550$  mm için sırasıyla Tablolar 1, ve 2'de verilmiştir. Bu tablolarda 'SE' alt indisli sonlu eleman modeli ile elde edilmiş neticelerini göstermektedir. Her bir  $L$  değeri için en az 3 deney yapılmış ve bağıl standart sapmaları en düşük olan ilk 3 deney neticesinin ortalaması alınmıştır. Sönümsüz titreşim frekansı değerleri,  $\omega_{n,deney}$ , Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Fark şöyle hesaplanmıştır;

$$|Fark| = \left| \frac{\omega_{n,SE} - \omega_{n,deney}}{\omega_{n,SE}} \right| \times 100$$

Tablolar 1 ve 2'den görülebileceği üzere, deneysel olarak elde edilmiş olan temel sönümlü titreşim frekansı değerleri,  $\omega_{d,deney}$ , için bağıl standart sapmanın bütün deneylerde sıfıra çok yakın olması yapılan ölçümlerin güvenilir olduğunu göstermektedir.

**Tablo 1.**  $L=500$  mm uzunlukta numuneler için neticeler

| Numune | $\omega_{d,deney}$<br>(Hz) | Bağıl standart sapma |       | $\omega_{n,deney}$<br>(Hz) | $\omega_{n,SE}$ (Hz) | Fark (%) |
|--------|----------------------------|----------------------|-------|----------------------------|----------------------|----------|
|        |                            | $\zeta$ (%)          | (%)   |                            |                      |          |
| 1      | 59.240                     | 0.000                | 2.987 | 59.267                     | 61.818               | 4.352    |
| 2      | 61.035                     | 0.000                | 3.141 | 61.065                     | 61.622               | 0.962    |
| 3      | 61.035                     | 0.000                | 3.560 | 61.074                     | 61.491               | 0.747    |

**Tablo 2.**  $L=550$  mm uzunlukta numuneler için neticeler

| Numune | $\omega_{d,deney}$<br>(Hz) | Bağıl standart sapma |       | $\omega_{n,deney}$<br>(Hz) | $\omega_{n,SE}$ (Hz) | Fark (%) |
|--------|----------------------------|----------------------|-------|----------------------------|----------------------|----------|
|        |                            | $\zeta$ (%)          | (%)   |                            |                      |          |
| 1      | 55.650                     | 0.000                | 2.235 | 55.669                     | 55.801               | 0.246    |
| 2      | 55.623                     | 1.892                | 2.635 | 55.071                     | 55.623               | 0.992    |
| 3      | 57.445                     | 0.000                | 2.531 | 57.463                     | 55.505               | 3.528    |

Tablo 1'den görülebileceği üzere,  $L=500$  mm için sayısal ve deneysel neticeler arasındaki fark 1. numune için yaklaşık %4 ve diğer numuneler için %1'in altındadır. Özellikle 1. numunede ortaya çıkan farkın temel sebebinin numunedeki kusurlar ve/veya mesnetlenmede yapılan hata olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, sönüm oranının %3~3.5 civarında olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2'den görülebileceği üzere,  $L=550$  mm için sayısal ve deneysel neticeler arasındaki fark 1. numune için yaklaşık %0.3 ve 2. numune için %1'in altındadır. Ancak, 3. numune için farkın yaklaşık %3.5 olduğu görülmüştür.

$L=550$  mm uzunluktaki 1. numune için, numune uzunluğundaki artışın hatayı bu denli düşürmesi beklenmeyen bir neticedir. Bu yüzden,  $L=500$  mm için yapılan deneylerde 1. numunenin iyi mesnetlenmemiş olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde 3. numune için  $L$  değerindeki artışın hatayı azaltmamış olması sebebiyle farkın mesnetlenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 2'den  $L=550$  mm için sönüm oranının %2.2~2.5 civarında olduğu ve sönüm oranının da numune uzunluğunun artması ile az da olsa azaldığı gözlemlenmiştir.

$L=500$  ve  $550$  mm dışında, daha düşük  $L$  değerleri için de deneyler yapılmıştır. Ancak, kullanılan örnekleme frekansı için  $912$  Hz'den daha yüksek bir değer alınmadığı için kayda değer neticeler elde edilememiş ve elde edilen deney verileri burada sunulmamıştır.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada düz metal yüzü ve rijit köpük çekirdekli sandviç kirişlerin temel titreşim frekanslarının konsol kiriş titreşim deneyi ile elde edilmesinde numune uzunluğunun neticelere etkisi incelenmiştir. Öncelikle basit bir deney düzeneği kurularak imal edilen konsol kiriş numuneleri üzerinde çok sayıda titreşim deneyi yapılmıştır. Elde edilen deney neticeleri kayma deformasyonlu kiriş elemanları kullanılarak yapılmış bir sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiş olan sayısal neticeler ile mukayese edilmiştir. Elde edilen neticeler ve gözlemler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

*i.* Deneysel ve sayısal neticelerin  $L=550$  mm uzunluktaki numuneler için  $L=500$  mm uzunluktaki numunelere kıyasla genel olarak daha uyumlu olduğu söylenebilir.

*ii.* Her iki  $L$  değeri için de temel frekans için hata oranları düşüktür. Ayrıca, artan numune uzunluğu ile sönüm oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

*iii.* Galvanizli sac dış yüzü sandviç kiriş eğilme ve kayma rijitlikleri için sayısal modelde kullanılmış olan değerler deney neticeleri ile doğrulanmıştır.

*iv.* Düşük maliyetli MEMS tipi dijital ivmeölçerler ile basit titreşim deneylerinin yapılabileceği gösterilmiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılmış olan ivmeölçer ile örnekleme frekansını  $912$  Hz'den daha fazla yükseltmek mümkün olamamıştır. Bu sebeple, deneysel çalışmada daha kısa kiriş numuneleri için kayda değer netice elde edilememiştir. İleride yapılacak çalışmalarda örnekleme frekansı daha yüksek bir ivmeölçer kullanılması planlanmaktadır.

*v.* Bu çalışmada elde edilen en önemli netice ileride yapılacak çalışmalarda daha hassas bir mesnetleme düzeneği geliştirilmesi gerektiğinin anlaşılmış olmasıdır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar Pakmetal A.Ş.'den Harun TAYLAN Bey'e deney düzeneklerinin kurulmasında yardımları sebebiyle şükranlarını sunarlar.



#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ASTM E1876-15, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
- [2] ASTM E756-05, Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2017).
- [3] Hyer, M. W., Anderson, W. J., & Scott, R. A. Non-linear vibrations of three-layer beams with viscoelastic cores, II: Experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 61(1), 25-30, (1978).
- [4] Sokolinsky, V. S., Von Bremen, H. F., Lavoie, J. A., & Nutt, S. R. Analytical and experimental study of free vibration response of soft-core sandwich beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 6(3), 239-261, (2004).
- [5] Rizos P.F., Aspragathos N., Dimarogonas A.D. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, 138(3), 381-388, (1990).
- [6] Baba, B. O., & Thoppul, S. Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond. *Composite Structures*, 91(1), 110-119, (2009).

- [7] Baba, B. O., & Thoppul, S. An experimental investigation of free vibration response of curved sandwich beam with face/core debond. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(21), 3208-3218, (2010).
- [8] Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J. K., & Starr, A. Performance evaluation of MEMS accelerometers. *Measurement*, 42(5), 790-795, (2009).
- [9] Varanis, M., Silva, A. L., Brunetto, P. H. A., Gregolin, R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(1), (2016).
- [10] Varanis, M., Silva, A. L., & Mereles, A. G. On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(1), (2018.)
- [11] Hinton, E., & Owen, D. P. (1977). *Finite element programming*, New York: Academic Press.
- [12] Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R. (2007). *GNU Octave manual: A high-level interactive language for numerical computations*. Network Theory Ltd.
- [13] ASTM C393 / C393M-16, *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [14] Garrido, M., Correia, J. R., Branco, F. A., Keller, T. Creep behaviour of sandwich panels with rigid polyurethane foam core and glass-fibre reinforced polymer faces: Experimental tests and analytical modelling. *Journal of Composite Materials*, 48(18), 2237-2249, (2014).
- [15] Cooley, J. W., Lewis, P. A., & Welch, P. D. Historical notes on the fast Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1675-1677, (1967).
- [16] Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall.



## Automation of the Paint Booth in an Automotive Plant and Improvement of Paint Process by Using Robots

 Oruç AKSOY<sup>1</sup>  Ahmet AKBULUT<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup> Ankara Factory MAN A.Ş. Akyurt/ANKARA

<sup>2</sup> Ankara University Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Eng. Dept., Gölbaşı/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

The factors affecting the paint process in the paint shops in automotive plants are mainly; air flow, humidity, temperature and pressure. In order to bring these factors to most suitable conditions according to the type of paint and the surface to be painted, an automation system and programming has been established. Once the ambient conditions have been optimized, the spray paint process previously performed by the operators manually has been applied with the help of a Cartesian robot. In Cartesian robot programming, the operator's hand movements are referenced. In order to turn the system into a fully automatic system, cabinet automation system, Cartesian robot automation and an RFID tag system in addition to these two are integrated into the whole structure.

### Article Info:

Research article

Received: 17/12/2019

Revision 24/02/2020

Accepted: 26/04/2020

### Highlights

- Paint Booth control.
- Painting quality.
- Automation.

### Keywords

Paint Robot

Motion Control

Speed Control

Paint Shop Industry 4.0



Figure A. Robot arm paint process: test (left), and real application (right)

**Purpose:** In this study, it is aimed to apply metal painting process with industrial robots and to ensure the necessary environment conditions to achieve the best paint quality by using automation systems.

**Theory and Methods:** Siemens Simotion Scout program and Simotion D controller are connected to two 5-axis Cartesian paint robots placed on the right and left of the vehicle to be painted. This controller provides control by connecting to the servo motors and servo drives on each axis through the written PLC program over the Profinet communication protocol. In addition to the control software, a control interface has been created in the WinCC flexible SCADA program. With the help of this interface program, the desired tools or parts were introduced and the paint process was carried out. Simotion Scout and WinCC Flexible programs are used in the Siemens Simatic Manager program infrastructure. Parameters such as supply air pressure, paint flow and distance significantly affect material consumption and dry film thickness. For this reason, various tests were performed gradually in the range of minimum and maximum values specified for each parameter and the values that gave the best results were determined.

**Results:** With this system, a better result has been achieved than an experienced painter. The paint thicknesses were in the target range of 93-105  $\mu\text{m}$  and were of the desired quality prior to the sanding and finishing processes. Direct effects of paint flow, robot arm speed and ambient air flow on film thickness have been observed. In addition, significant energy savings have been achieved.

**Conclusion:** The approach used in the study showed that the most suitable film thickness can be achieved at the specified parameter values. It has been determined that the paint thickness standards of the manufacturers can be achieved by making precise adjustments to the parameters in question.



## Bir Otomotiv Tesisinde Boya Kabininin Otomasyonu ve Boya Prosesinin Robot Kullanılarak İyileştirilmesi

Oruç AKSOY<sup>1</sup> Ahmet AKBULUT<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Fabrikası MAN A.Ş. Akyurt/ANKARA

<sup>2</sup> Ankara University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Gölbaşı/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada; metal boyama yönteminin, endüstriyel robotlarla uygulanması, en iyi boya kalitesi için gerekli olan ortam şartlarının otomasyon sistemleri kullanılarak sağlanması ve sonuçta kalite, verim ve başarımdan oluşan parametreleri iyileştirmek hedeflenmiştir. Hava debisi, nem, sıcaklık ve basınç otomotiv tesislerindeki boyahanelerde boya prosesine etkileyen faktörlerdendir. Bu faktörleri, boya tipine ve boyanacak yüzeye göre en uygun şartlara getirebilmek için bir otomasyon sistemi ve programlanması yapılmıştır. Ortam şartları en uygun seviyeye getirildikten sonra daha önce operatörler tarafından elle yapılan sprey boya işlemi bir kartezyen robot yardımı ile uygulanmıştır. Kartezyen robot programlamada operatörün el hareketleri referans alınmıştır. Sonrasında ise sistemin tam otomatik hale getirilebilmesi için kabin otomasyon sistemi, kartezyen robot otomasyonu ve bu ikisine ilave olarak bir radyo frekans ile kimlik belirleme etiket sistemi tüm yapıya entegre edilmiştir. Bu entegrasyon ile kabinlerin araçları tanıyarak, kabin şartlarını araca ve boya tipine uygun hale getirmesi, robotu aracın konumuna göre doğru başlangıç noktasına iletmesi ve aracı doğru programda ve hatasız boyaması gibi çeşitli geliştirmeler elde edilmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 17/12/2019  
Düzeltilme: 24/02/2020  
Kabul: 26/04/2020

### Anahtar Kelimeler

Boya Robotu  
Hareket Kontrolü  
Hız Kontrolü  
Boyahane Endüstri 4.0

### Keywords

Paint Robot  
Motion Control  
Speed Control  
Paint Shop Industry 4.0

## Automation of the Paint Booth in an Automotive Plant and Improvement of Paint Process by Using Robots

### Abstract

In this study, it is aimed to improve the parameters consisting of quality, efficiency and performance with the application of metal painting method with industrial robots and using the automation systems for the realization of the environment conditions required for ensuring the optimum paint quality and additional improvements to be made throughout the study. The factors affecting the paint process in the paint shops in automotive plants are mainly air flow, humidity, temperature and pressure. An automation system and programming have been realized in order to bring these factors to the most suitable conditions according to the type of paint and the surface to be painted. Once the environmental conditions have been optimized, the spray paint process, which was done manually by the operators before, has been carried out with the help of a Cartesian robot. In Cartesian robot programming, the operator's hand movements have been referenced. In this way, the paint booth has been given the ability to recognize the vehicle and adapt the paint booth conditions to the vehicle and paint type. Furthermore, the robot can be advanced to the correct starting point by determining the current position of the vehicle. As a result, the aim of painting the vehicles without errors has been achieved.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

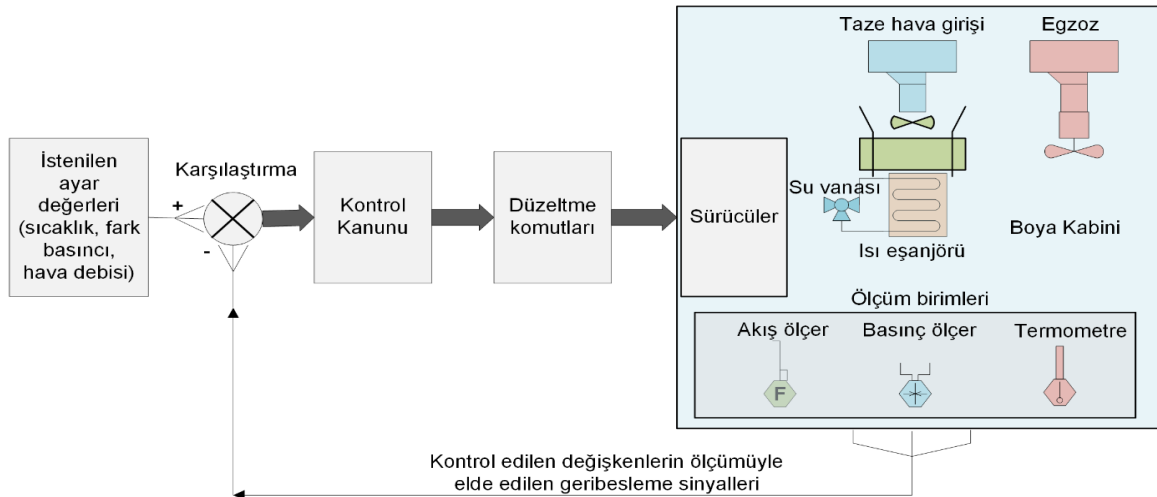
Boyahanelerde çalışan operatörlerin boya prosesi esnasında zehirleyici bir ortamda bulunması ve tedbirlere rağmen ortamın operatörler için tümüyle tehlikesiz hale getirilemediği sabittir. Literatüre bakıldığında, bu problemden kurtulmak amacıyla, boya işleminin robotize edilmesine yönelik bir hidrolik güç ünitesine ve bir kontrol ünitesine bağlı bir robotun tasarımı yapılmıştır [1]. İlerleyen dönemlerde otomotiv boyahanelerinde kaliteli boya yayılımı ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kaliteli yayılım için gerekli parametreler formülize edilip sistem başarımını artırmak için en etkili metotlardan biri olan darboğaz analiz

yöntemi benimsenmiştir [2]. Bunun yanısıra farklı bir çalışmada otomotiv boya proseslerinde yapılan boya işlemlerinin çevreye olan etkileri ve her bir işlem adımında harcanan elektrik enerjisi yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Enerji tüketiminin en yüksek olduğu adımların netleştirilmesinde esinlenilebilecek bir araştırma niteliğindedir [3]. Sprey boya proseslerinde malzeme tüketimi ve kuru film kalınlığı ile ilgili yapılan çalışmalarda tabanca hava basıncının, tabanca nozul çapının ve spreyleme sürelerinin film kalınlığına etkileri incelenirken [4] benzer bir çalışmada ise boya kabinlerindeki Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (heating, ventilating and air conditioning, HVAC) sistemlerinde model tabanlı sıcaklık ve nem kontrolü uygulamaları ele alınmıştır [5]. Sonraki dönemde Verona Üniversitesinde boya teknolojisinin robotlar ile yapıldığındaki sonuçları üzerinde bir araştırma çalışması yapılmıştır [6]. Son yıllarda spreyle yüzey boya tekniklerinde enerji tasarrufu sağlanan, yüzeyin daha hızlı boyanabildiği [7], kendi kendini programlayan boya kabini konsepti yöntemlerinin oluşturulabildiği ve bu tekniklerle otonom boya kabinlerinin imal edilebildiği çalışmalar mevcuttur [8]. En güncel çalışmalardan birinde bulut sisteminin entegrasyonu, geri bildirimli boya prosesi sistemi, tüm sistemi kontrol eden akıllı tampon sistemi (programmable logic controller, PLC ve supervisory control and data acquisition, SCADA) ve uygulama tekniklerinden oluşan entegre bir sistem tasarımı oluşturulmuştur [9].

Bu çalışmada otomotiv boyahanelerinde gelecekte uygulanabilecek geliştirmelere dayanak olacak bir Endüstri 4.0 altyapısının temel bileşenlerini oluşturmak hedeflenmiştir. PLC ile PID (proportional integral derivative) kontrol blokları oluşturularak boya kabini ortam şartlarının en uygun duruma getirilmesi, kartezyen boya robotu ile otobüs ve büyük araçların boyanması ve bu yöntemle kalite hatalarının ve boya dalgalanmalarının en aza indirilmesi, RFID (radio frequency identification) sistemi ile araçların tanınması ve RFID - PLC ve kartezyen boya robotu kontrolörünün Profinet haberleşme sistemi üzerinden haberleştirilerek, araç tipine göre otonom boya prosesinin geliştirilmesi, boya kalitesinin bağlı olduğu tüm etkenlerin anlık olarak raporlanması ve geriye dönük yeniden proses nedenlerinin saptanması, tinerle otomatik boya hattı temizliği, boya debisi kontrolü gibi teknikler operator tecrübelerine de dayalı olarak geliştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar bir araya geldiğinde Endüstri 4.0 Boyahanesi adını verebileceğimiz entegre bir yapı oluşturulmuştur.

## 2. DENEYSSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Temel olarak Siemens PLC ve Profinet haberleşme alt yapısı kullanılarak boya kabini ortam koşullarının kontrolü yapılmıştır. En uygun ortam fark basıncı, sıcaklık ve hava debisinin sağlanabilmesi için kabin hacmi, menfez ve emiş kanallarının çapı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu faktörlerle birlikte tüm sensörlerin, sürücülerin, ısı dağıtıcı ve fanların doğru biçimde modellenmesi güç olacağından iki aşamalı bir yaklaşım izlenmiştir. İlk aşamada ortam koşullarının istenilen basınç farkı, sıcaklık ve hava debisi değerlerinde tutulması için gerekli kontrolcülerin başka deyişle PID parametrelerinin tesbiti yapılmıştır. Fark basıncı, sıcaklık ve hava debisi kontrolleri için blok diyagram Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ortam fark basınç kontrolü, ortam sıcaklık kontrolü, hava debisi kontrolü blok diyagramı

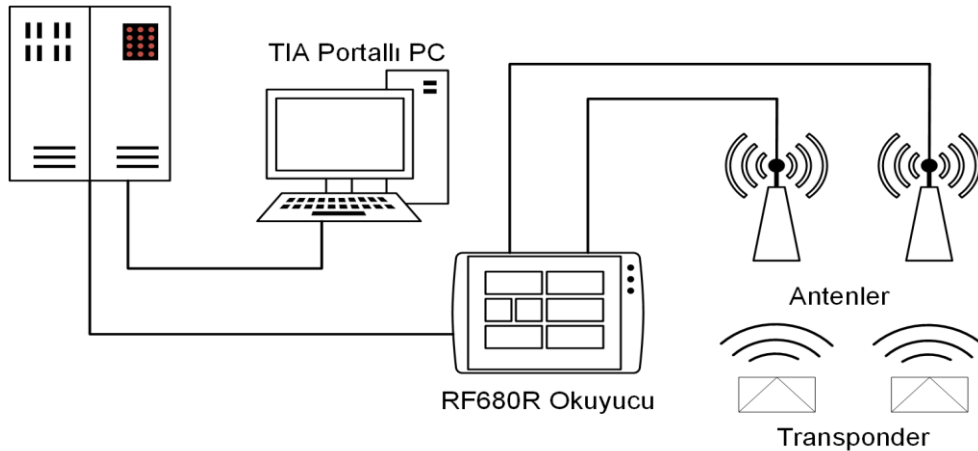
İstenen değerlere ulaşım ve kararlı duruma geçme süreleri gözetilerek her bir kontrolcü için bir değişkenin sabit tutulup diğerlerinin değiştirilmesi yoluyla deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre arama yapılan değerlerin yön ve aralıkları seçilmiş ve nihayi parametre değerleri belirlenmiştir.

Sonraki bölümlerde sırayla, tüm ortam koşulları araç tipine göre özelleşeceğinden aracın tanınması ve bilgilerin ilgili birimlere aktarılması için kullanılan RFID sistemi, ortam koşullarının kontrolü için kullanılan donanım ve yazılımlar, robot kol kontrolü için kullanılan donanım ve yazılımlar ile son olarak tüm sistemin birlikte nasıl çalıştığına yer verilmiştir. Bu amaçla otomotiv tesislerindeki boya proseslerinde en yüksek standartlarda boya kalitesinin sağlanabilmesi için gerekli olan ve aşağıda belirtilen işlevler gerçekleştirilmiştir.

- Boya prosesinin uygulandığı boya kabinindeki ortam şartlarının PLC kullanılarak en uygun duruma getirilmesi,
- PID kontrol yazılımları ile söz konusu ortam şartlarının hassas bir şekilde sürdürülebilirliğinin sağlanması,
- Boya kalitesinin bağlı olduğu etkenlerin raporlanarak geriye dönük yeniden proses nedenlerinin saptanması,
- RFID sistemi ile kabin otomasyonunun haberleştirilmesi,
- Daha önce operatörlerin elle yaptığı boya işleminin bir kartezyen robot ile gerçekleştirilmesi ve bu bağlamda kalite hatalarının ve boya dalgalanmalarının minimize edilmesi,
- RFID sistemi ile kartezyen robot kontrol biriminin haberleştirilerek, başlangıç konumlandırması ve otomatik başlatma işlevi,
- Hassas ve rampa ayarlı servo hız kontrol ile operatörün taklit edilmesi,
- Standart boya tabancasının pnömatik piston ile birleştirilerek otomatiğe çevrilmesi,
- Sürekli boya debisi kontrolü yapılması,
- Boya kalite tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla her proses sonrasında otomatik tinerle temizleme modu yapılması.

## 2.1. RFID Sistemi (RFID System)

Radyo frekans ile kimlik belirleme başka deyişle RFID, nesnelere radyo dalgaları kullanarak tanımlayabilmeyi sağlayan yöntemdir. Bir RFID okuyucu anten, önceden tanımlanmış bir çipin (RFID etiket) içindeki bilgiyi bir başka alıcıya iletilebilmesini sağlar.



**Şekil 2.** S7 CPU, RF680R ve antenlerin haberleşme altyapısı

Okuyucu anten, RFID etiketinden aldığı radyo sinyallerini sayısal verilere çevirerek otomasyon sistemine aktarılmasını sağlar ve bu bilgi bit düzeyinde veri işleme ile birlikte anlamlı hale getirilebilir. Araçların en kolay tanımlanabilmesi için gerekli olan veri şase numaralarıdır. Şase numaraları araç üretim hattına ilk

girdiği andan itibaren verilir ve bu şase numarası RFID etikete de yazılarak etiket aracın üzerine yerleştirilirse, RFID antenler vasıtasıyla proses içerisinde aracın konumu sürekli olarak izlenebilir. RFID etiketlerindeki şase verilerini PLC'ye aktarmak için gerekli olan bağlantılar Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu amaçla kullanılan donanım ve çalışma biçimi kısaca şu şekilde özetlenebilir: Profinet IO özelliğine sahip olan SIMATIC RF680R bir ağ geçidi olarak çalışmaktadır. RF640A ise sahadaki antendir ve ağ geçidi ile haberleşerek okuduğu şase numaralarını ağ geçidi içerisindeki register adreslerine yazmaktadır.

## **2.2. TIA Portal ve S7-1500 CPU ile Boya Kabini Ortam Şartları İyileştirmeleri (Paint Booth Environment Conditions Improvements with Tia Portal and S7-1500 CPU)**

Bir otomotiv tesisi boya kabini boya kalitesine etkiyen en kritik faktörler dört ana başlıkta sıralanabilir. Bunlar ortamın fark basıncı, ortamın sıcaklığı, ortamın hava debisi ve ortamın nemidir.

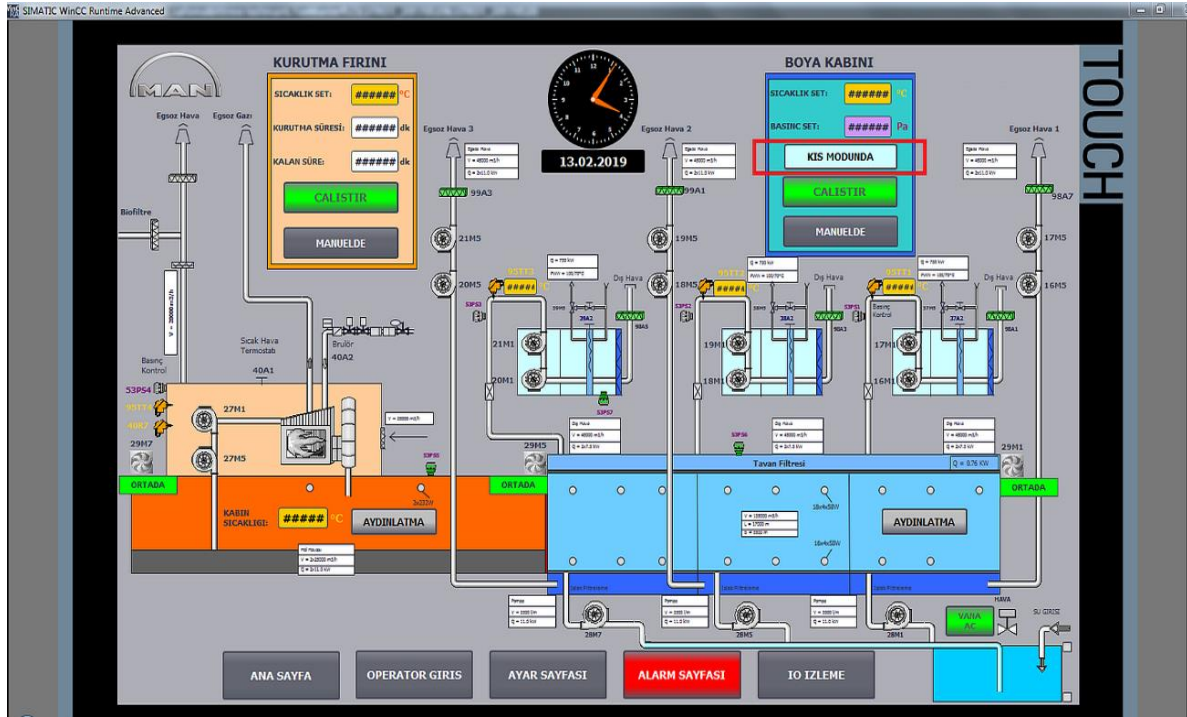
Kaliteli bir boya prosesi için bu faktörler en uygun düzeye getirilmelidir. Bu faktörlerin kontrolünde P, PI, PD veya PID gibi sistemler kullanılabilir. Hassasiyetin istenen düzeyde sağlanabilmesi için bu çalışmada tüm faktörler PID kontrol yazılımı yapılarak sağlanmıştır. PID, Proportional, Integral ve Derivative yani oransal, tümlev ve türev temelli bir kontrol yapısıdır. Bu kontrol yapısı bir sistemdeki çıkış değerini sürekli kontrol ederek istenilen ayar değerine yakınsatan bir yapıdır. Bu işlem, sistemde çıkışa etkiyen parametreler sürekli ayarlanıp ve fark değerine bakılarak sağlanır.

### **2.2.1. Ortamın fark basıncı (Difference pressure of the environment)**

Boya yapılan ortamda yüksek kaliteden söz edebilmek için boya kabini içerisine dışarıdan toz girmemesi sağlanmalıdır. Bu nedenle ortamın fark basıncı eksi değerlere düşmemelidir. Yapılan deneylerde eksi fark basıncı çalışılan kabinlerde kalite hatalarına rastlanılmıştır. Dolayısıyla bir fark basınç ölçer ile kabin fark basıncı kontrol edilmelidir ve değeri pozitif bir değer olarak belirlenmelidir. Bir boya kabini havalandırılması amacıyla taze hava ve egzoz fanları kullanılır. Bu fanlar direk yol verme yöntemi ile 50 Hz şebeke frekansında çalışırsa, kabin fark basıncını ayarlamak güçleşecektir. O yüzden bu çalışmada frekans çeviriciler kullanılmıştır. Bu sürücüler Profinet haberleşme protokolü ile PLC'ye bağlanıp hız kontrolü yapılacak şekilde programlanmıştır.

### **2.2.2. Ortamın sıcaklığı (Temperature of the environment)**

Boya prosesinde kullanılan boyanın yüzeyde tam emiliminin gerçekleşmesi amacıyla uygulanması gereken tekniklerden bir tanesi de sıcaklığın sabitlenmesidir. Yapılan deneyler neticesinde P kontrol tipinde çalışan sıcaklık kontrol sistemlerinde önemli boya kalite problemlerine rastlanmıştır. Bu yüzden yine hassas ayar yapabilmek için PID kontrol tercih edilmiştir. Boya kabinlerinde sıcaklığı sabitleyebilmek için serpantin denilen mekanik ısı eşanjörü kullanılmıştır. PLC programı vasıtasıyla serpantine bağlı olan su besleme hattına entegre edilmiş olan pnömatik 3 yollu oransal vana PID kontrol kullanılarak kontrol edilmiştir. Sonrasında dış ortamdan taze hava fanı ile çekilen hava, serpantine temas eder ve kabine dolar. Kabin içinde istenilen hava sıcaklığına göre serpantinden geçecek olan suyun debisi 3 yollu vana kontrolü ile sağlanır. Bu noktada karşılaşılan en önemli problem mevsim değişikliklerinde yaşanır. Dış ortam hava sıcaklığı mevsimlere göre değiştiğinden, yazın düzgün çalışan PID'nin kışın da düzgün çalışması amacıyla PID'nin kazanç parametresinin terslenmesi gerekmektedir. Bu noktada en iyi kontrolü sağlamak amacıyla sisteme yaz ve kış modları fonksiyonları eklenmiştir. Bu mod, mevsim geçişlerinden kaynaklı ortam ısı dengesi problemlerinin önüne geçmiştir. Şekil 3'te SCADA ve kabin yaz modu kış modu fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 3. Boya kabini otomasyonu SCADA ana sayfası ve mevsim modları

### 2.2.3. Ortamın hava debisi (Air flow rate of the environment)

Boya kabiniinde boya işlemi yapılırken fark basınç 2 Pa (Pascal) değerinde PID yardımıyla tutulsa bile boya kalitesinde en elverişli sonuçları yakalamak, boya dalgalanmalarının, tozuma olaylarının ve boya akması denilen problemlerin önüne geçilmesi amacıyla ortamda ideal bir hava akışı sağlanmalıdır. PLC programla hava debisi kontrolü elde edilmiştir. Debinin sabitlenmesi için standart bir frekans yoktur. Boya kabininin hacmi, menfez ve emiş kanallarının çapı gibi etkenler debiyi etkilemektedir. İdeal ayar yapabilmek için ihtiyaç duyulan ekipman anemometredir. Bu ekipman ile hava debisi gözlemlenerek deneylerde elde edilen en uygun aralıkta tutulmuştur.

### 2.2.4. Ortamın nemi (Humidity of the environment)

Ortamdaki nem kontrolü de benzer şekilde sağlanmıştır. Bir nem ölçer ve spreyleme nozülleri yardımıyla, kabin içerisine gerektiğinde pulverize olarak su verilmesi yöntemi ile yapılmıştır. 2.2.1., 2.2.2. ve 2.2.3.'te kullanılan blokların aynılarını kullanılmıştır.

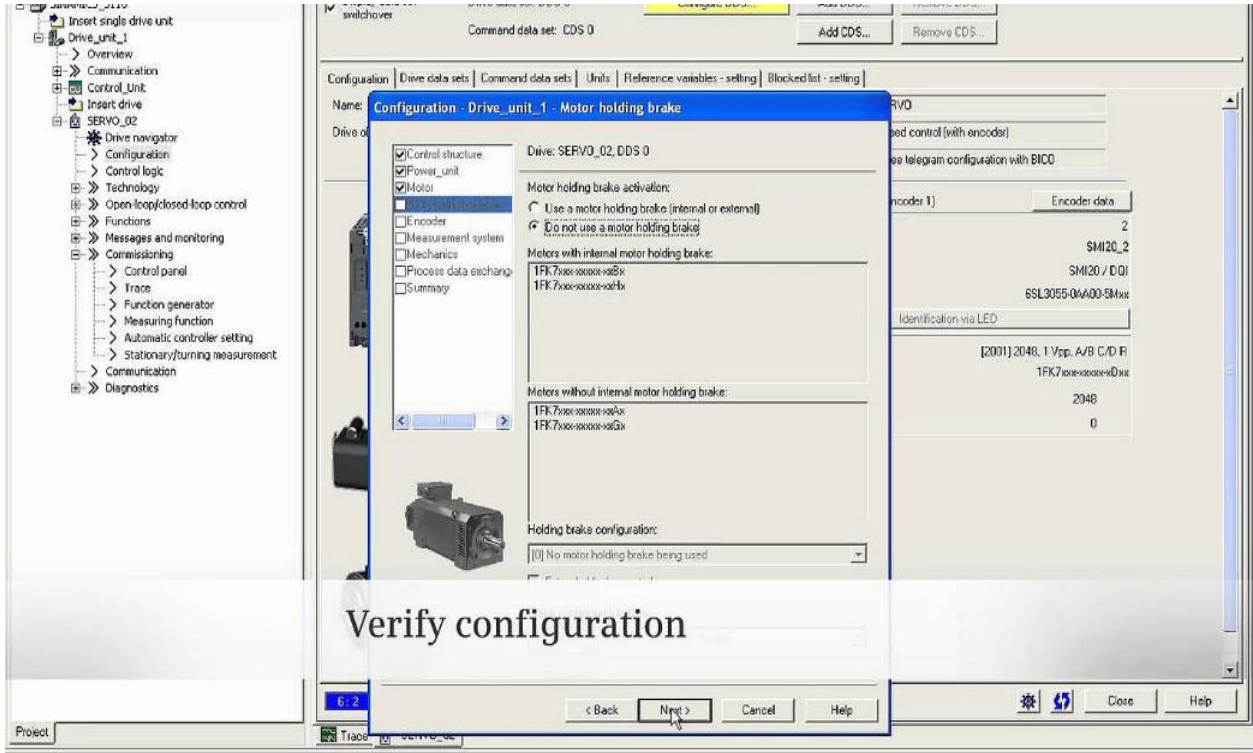
## 2.3. Simotion Scout - Simotion D ile Kartezyen Boya Robotu ve İyileştirmeler (Cartesian Paint Robot with Simotion Scout - Simotion D and Improvements)

Bu bölümde, çalışmada kullanılan kartezyen robotun ve derleyici programının genel tanıtımı ve WINCC insan makine arayüzü (İMA) panelinde yapılan arayüz programının genel yapısı ile ilgili konulara değinilmektedir.

### 2.3.1. Simotion Scout ve WINCC Flexible (Simotion Scout and WINCC Flexible)

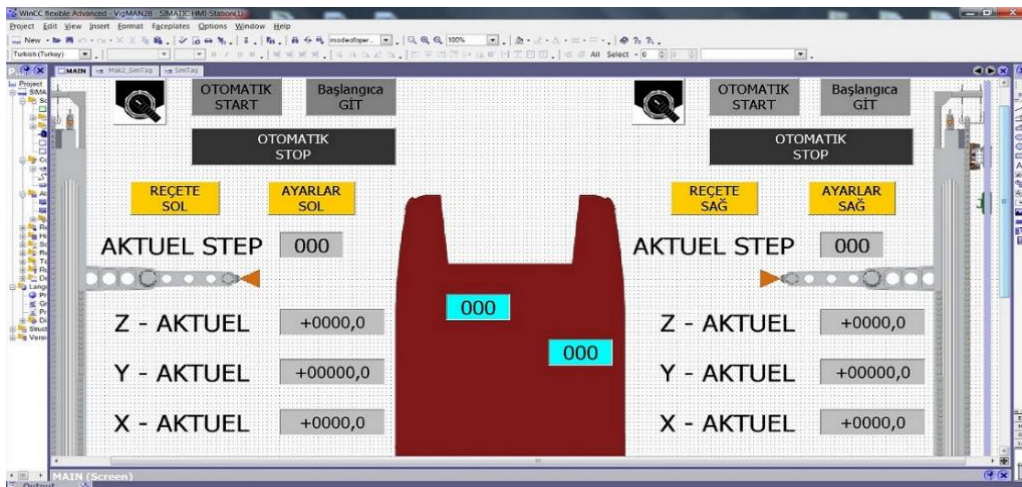
Simotion Scout, Simotion D olarak adlandırılan ve Siemens'in servo motor ve sürücü kontrolü için geliştirilmiş ileri seviye bir hareket kontrol derleme programıdır. Bu program, LADDER ve ST kodlama dillerinde yazılım geliştirmeye olanak sunan ve servo sürücülerin tüm hareket, hız, koruma gibi özelliklerinin konfigüre edilmesini sağlayan bir derleyicidir. Aynı zamanda Simatic Manager ve TIA PORTAL programlarıyla eş zamanlı çalışabilmesi geliştirilen sistemlerin daha kararlı ve entegre olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. WinCC Flexible ise bir SCADA programıdır ve kullanıcılara sistem kontrol için bir arayüz sağlamaktadır. Programın içerisinde oluşturulan etiketler ve bu etiketlere bağlanan register adresleri sayesinde İMA ile PLC arasında veri alışverişi sağlamaktadır. Şekil 4'te Simotion Scout

programının arayüzü görülmektedir ve bu arayüz üzerinden sisteme entegre edilen tüm sürücü ve servo motorların konfigürasyonlarının yapılması mümkündür.



Şekil 4. Simotion scout sürücü ayarları

Kabindeki tüm iyileştirmelerden ve kartezyen robotun programlama safhasından sonra sistemin özelliklerinin etkin bir biçimde kullanılabilmesi amacıyla iyi tasarlanmış bir SCADA yazılımına ihtiyaç bulunmaktadır. Şekil 5'te çalışmanın en önemli kısımlarından biri olan robot kontrol sayfasının tasarımı görülmektedir.





Şekil 5. Robot eksenleri genel izleme ve kontrol sayfası


Şekil 6'da sistemin reçete oluşturma ara yüzü, Şekil 7'de koordinat ve hareket hazırlama ara yüzü ve Şekil 8 'de referanslama ve konfigürasyon sayfası görülmektedir.


SOL BOYAMA KOLU REÇETE No. -----


Hazır

YENİ REÇETE 

REÇETE SİL 

AYARLARI REÇETEYE ÇAĞIR 

REÇETE KAYDET 


REÇETE YÜKLE 

Şekil 6. Boya reçetesi hazırlama sayfası

|    |                          |     |     |     |     |   |    |                          |     |     |     |     |   |                            |            |
|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|---|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|---|----------------------------|------------|
| 2  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 18 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | AŞAĞI                      | YUKARI     |
| 3  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 19 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | EKSEN X ( KOL )            |            |
| 4  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 20 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | MAN.HIZ 0                  | A.POZ. 0,0 |
| 5  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 21 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | GERİ                       | İLERİ      |
| 6  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 22 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | EKSEN Y                    |            |
| 7  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 23 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | MAN.HIZ 0                  | A.POZ. 0,0 |
| 8  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 24 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | SOLA                       | SAĞA       |
| 9  | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 25 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | TABANCA                    |            |
| 10 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 26 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | MAN.HIZ 0                  | A.POZ. 0,0 |
| 11 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 27 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | SOLA                       | SAĞA       |
| 12 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 28 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | STEP HIZ 0                 |            |
| 13 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 29 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | HIZ ve AKTUEL POZISYONLARI |            |
| 14 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 30 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0. ADIMA <b>AKTAR</b>      |            |
| 15 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 31 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | -1 STEP +1                 |            |
| 16 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 32 | <input type="checkbox"/> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 |                            |            |

MAIN ALARM STEP PAGES-L STEP PAGES-R <- GERİ İLERİ ->

Şekil 7. Reçete koordinat hazırlama sayfası

REFERANSLAR 

Z offset #####

Y offset #####

KOL REFERANS POZİSYONU KOL REFERANSLA

a1 ##### a2 ##### a3 #####

KOL1-CW KOL2-CW KOL3-CW

KOL1-CCW KOL2-CCW KOL3-CCW

STEP DEĞERLERİNİ KAYDIRMA

####. STEPTEN İTİBAREN DEĞERLERİ **KAYDIR**

-1 #### +1

STEP DEĞERLERİNİ RESETLE **RESET**

BOYA VALFİ MANUEL **PUSKURT**

MAIN ALARM STEP PAGES-L STEP PAGES-R

Şekil 8. Kinematik manuel ayarları ve referanslama

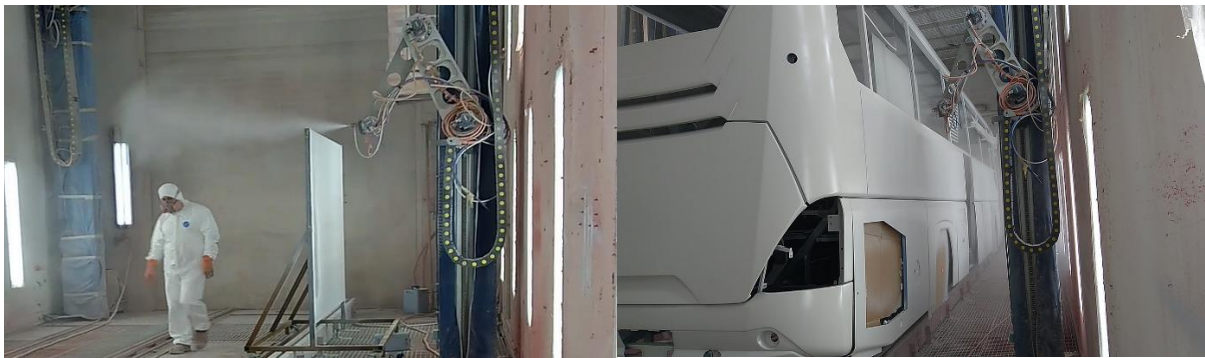


### 2.3.2. Sistemin çalışması (System operation)

Sistemde Simotion D CPU kontrol birimini kontrol edebilmek amacıyla mevcut olan İMA panelin Şekil 7’de görülen koordinat hazırlama sayfasında, boya kabini içerisine aldığımız araç, panel gibi metalik aksamın otomatik olarak boyanabilmesi için ekipmanın koordinatlarının gezdirilerek öğrenme yöntemiyle tanıtılması gereklidir. Bu süreçte adım adım tanıma yapılır. Her bir adımda eksenlerin yeni konumu belirlenir. Böylece istenen sayıda adım içeren bir boya işlemi otomatikleştirilmiş olur (Şekil 8). İstenilen bir sonraki konuma boya tabancası getirilir ve “AKTAR” butonu ile adım sabitlenir. X eksen kinematik kol, Y eksen kabin boyunca uzanan eksen, Z eksen yerden kabin tavanına kadar olan eksen ve T eksen ise boya tabancasının 360 derecelik eksenidir. Tüm araç veya yüzey gezdirilerek adım adım aktarılır. Bu tanıma işlemine reçete hazırlama işlemi denir. Reçete tamamlandıktan sonra Şekil 6’daki reçete hazırlama sayfasına gelinir. Yeni reçete oluşturulup isim verilir. Artık bu model bu aracın boya koordinatlarını içeren bir doküman niteliğindedir. Aracı hiç kabine almadan teknik resmi üzerindeki koordinatlar kullanılarak da araç tanımlanabilir. Araç bu şekilde tanımlandıktan sonra tek dikkat edilmesi gereken konu, araç kabine alınıp gerçek bir boya işlemi yapılacağına aracın en arka noktasının kabinde doğru konumda olmasıdır. Aksi takdirde önceden tanımladığımız başlangıç noktası gerçekte olması gereken başlangıç noktasıyla uyuşmayacağı için boya işleminde problemler yaşanacaktır.

Yeni reçete oluşturulduktan sonra Şekil 6’daki reçete hazırlama sayfasında önceden tanımlanan koordinatlar için ayarları reçeteye çağır ve reçeteyi kaydet butonlarına basılır. Bu reçete İMA panelin C sürücüsü içerisinde saklanır. Farklı bir PC veya İMA üzerinden kontrol edilmek istendiğinde bu reçete dosyasının kopyalanması mümkündür. Bu yöntemlerle oluşturulan reçeteler istenirse aynı sayfa üzerindeki reçete sil butonu yardımıyla silinebilir veya farklı bir araç için reçete çağırarak gerektiğinde reçete yükle işlemi manuel olarak yapılabilir. Daha sonra Şekil 5’teki izleme ve kontrol sayfası üzerinde “başlangıç konumuna git” ve “otomatik start” butonları sırası ile tıklanır. Başlangıç konumuna git denildiğinde robot ilk tanımlanan koordinata gider. Otomatik start tıkladığında ise boya işlemi başlar ve bitene kadar beklenilir.

Şekil 9 (a)’da deneme uygulamalarındaki bir yan yüzey boyama görüntüsünden örnek verilmiştir. Araç yerine bir deneme plakası kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar ve denemeler neticesinde istenen boya kalınlık seviyeleri elde edilerek gerçek araçlarda da uygulaması yapılmıştır. Gerçek araç boya uygulaması Şekil 9 (b)’de görülmektedir.



(a)

(b)

**Şekil 9.** Yan yüzey boyamada robot kol konumu (a), gerçek araçta kartezyen boya robotu ile boya uygulanması (b)

### 2.3.3. Endüstri 4.0 uygulamaları (Industry 4.0 Applications)

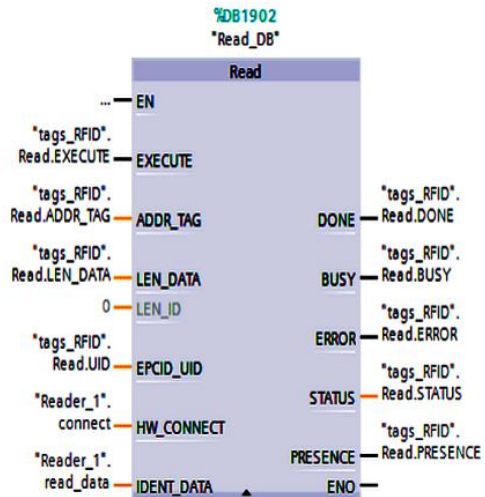
RFID sistemi burada bir yenilik getirmektedir. S7-1500 CPU RFID anten vasıtasıyla araç üzerindeki etiketi ve ona bağlı şase numarasını okuyarak register üzerine kaydeder. Şase numarasını tutan register değiştiğinde yükselen kenar tetikleme yöntemi ile şase numarasının Simotion D üzerine aktarımı sağlanır. Dolayısıyla reçete otomatik olarak yüklenir. Şekil 10’da TIA Portal RFID Read Bloğu yardımı ile RFID

üzerinden byte cinsinden alınan veriler S7-1500 ile aynı profinet ağ üzerinde olan Simotion D CPU'ya aktarılır. Şase numaraları sürekli karşılaştırma bloğu ile karşılaştırılır ve yükselen kenar tetikleme ile değişim esnasında yeni şase reçete olarak yüklenir. Böylece kabin içerisindeki araç değiştiğinde İMA üzerinde otomatik start anahtarı açık konumunda iken otomatik başlangıç konumuna gidilir ve istenen şartlar sağlandığında sistem yeni araç şasesine göre boya prosesine başlar.

Simotion D CPU'nun RFID üzerinden gelen veri ile şaseyi tanıyıp uygun reçeteyi otomatik olarak başlatması güvenlik ve kalite açısından riskler barındırmaktadır. Bu nedenle bir ana denetleyicinin tüm şartları kontrol etmesi kritiktir. Kontrol edilecek faktörler:

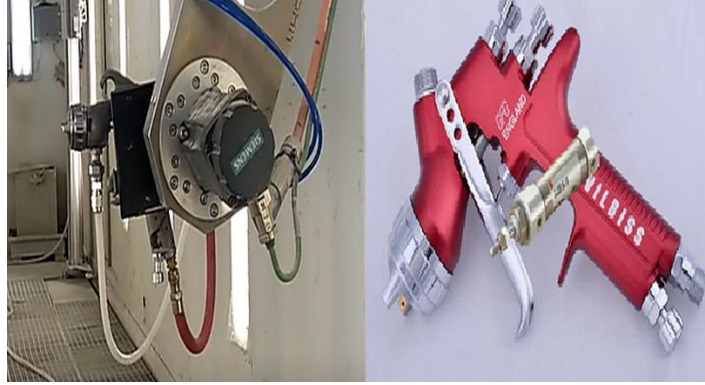
- Sıcaklık: Kabin sıcaklık verisi 21-25 derece aralığında ise Sıcaklık tamam biti ayarlanır.
- Fark basıncı: Kabin iç ortam basıncı dış ortama göre +1 Pa ile +5 Pa değer aralığında ise Fark Basıncı tamam biti ayarlanır.
- Fan çalışması: Kabin içi havalandırmayı sağlayan taze hava ve egzoz fanları devrede ise Fanlar tamam biti ayarlanır.
- Tiner temizliği: Bir önceki boya prosesi tamamlandıktan sonra renklerin karışmasının engellenmesi için boya tabancasına gelen hava hattındaki tüm partiküllerin temizlenmesi gereklidir. Tiner temizleme modu boya prosesinin ardından robotun otomatik olarak başlangıç noktasına gidip tabancasının ağızını logar kanalına çevirmesiyle 5 dakika boyunca yürütülür. Bu işlemin ardından robot yeni bir boya prosesine hazırdır. Bu aşama sonrasında Tiner Temizlik tamam biti ayarlanır.

| Block |          |           |            | Data |             |          |            |
|-------|----------|-----------|------------|------|-------------|----------|------------|
|       | Name     | Data t... | Monitor... |      | Name        | Data ... | Monitor .. |
| 1     | Static   |           |            | 1    | Static      |          |            |
| 2     | send     | Array...  |            | 2    | receive     | Array... |            |
| 3     | send[1]  | Byte      | 16#00      | 3    | receive[1]  | Byte     | 16#00      |
| 4     | send[2]  | Byte      | 16#00      | 4    | receive[2]  | Byte     | 16#00      |
| 5     | send[3]  | Byte      | 16#00      | 5    | receive[3]  | Byte     | 16#00      |
| 6     | send[4]  | Byte      | 16#00      | 6    | receive[4]  | Byte     | 16#00      |
| 7     | send[5]  | Byte      | 16#AA      | 7    | receive[5]  | Byte     | 16#00      |
| 8     | send[6]  | Byte      | 16#BB      | 8    | receive[6]  | Byte     | 16#00      |
| 9     | send[7]  | Byte      | 16#CC      | 9    | receive[7]  | Byte     | 16#00      |
| 10    | send[8]  | Byte      | 16#DD      | 10   | receive[8]  | Byte     | 16#00      |
| 11    | send[9]  | Byte      | 16#EE      | 11   | receive[9]  | Byte     | 16#00      |
| 12    | send[10] | Byte      | 16#00      | 12   | receive[10] | Byte     | 16#AA      |
| 13    | send[11] | Byte      | 16#00      | 13   | receive[11] | Byte     | 16#BB      |
| 14    | send[12] | Byte      | 16#00      | 14   | receive[12] | Byte     | 16#CC      |
| 15    | send[13] | Byte      | 16#00      | 15   | receive[13] | Byte     | 16#DD      |
| 16    | send[14] | Byte      | 16#00      | 16   | receive[14] | Byte     | 16#EE      |
| 17    | send[15] | Byte      | 16#00      | 17   | receive[15] | Byte     | 16#00      |
| 18    | send[16] | Byte      | 16#00      | 18   | receive[16] | B...     | 16#00      |



Şekil 10. TIA Portal RFID read bloğu

Boya hattında boyanın istenen debi değerinin korunması boyanın film kalınlığının dengeli dağılımı açısından elzemdir. Bu nedenle herhangi bir nedenden dolayı boya debisi değişirse ve bu durum fark edilmez ise tüm boya prosesi tekrarlanmak zorunda kalacaktır. Bu duruma engel olmak için boya hattına manyetik debimetre takılmamıştır. İstenen boya debi aralığı sisteme tanımlanarak boya prosesi başladıktan sonra bu sınır aralık değerleri aşırsa ana CPU'nun Simotion D'ye kesme göndermesi ve boya prosesini sonlandırması sağlanmıştır. Boya prosesinin bir insan elinin en hatasız halini benzetebilmesi için hız kontrolü kritik bir aşamadır. Simotion Scout üzerinden duruş ve kalkış rampalarında robotun salınım yapmasını engelleyerek boya dalgalanmasına ve hatalarına engel olunmuştur. Bunun yanı sıra otomatik boya tabancalarının yerine bu çalışmada manuel bir boya tabancası kullanılmıştır. Bu tabancanın tetiğine bağlanan küçük bir pnömatik piston yardımı mevcut boyama işlemlerinde kullanılan tabancalar kullanılabilmiştir. Otomatik bir tabancaya sahip olunmadığında bu problemin nasıl aşılacağı konusuna da bir çözüm sunulmuştur. Şekil 11'de çalışmada kullanılan boya tabancası ve bu tabancaya entegre edilen piston görülmektedir.



**Şekil 11.** Manuel boya tabancası ve tetik piston

Yapılan geliştirmelere ek olarak, boyama prosesindeki boya kabinlerinin enerji tüketimi konusunda da iyileştirmeler yapılmıştır. Enerji tüketiminin önemli bir kısmı boya prosesi için harcanmakta ve bu alanda elde edilecek tasarruf önem arz etmektedir [10]. Boyama prosesinde 24 saat aktif olarak çalışan kabinde fanların, boya havuzu sirkülasyon pompalarının, kabin aydınlatmalarının toplam enerji tüketimi ölçülerek günlük tüketimin 2300-2400 kWh aralığında olduğu belirlenmiştir. Yapılan iyileştirmenin ve tasarruf edilen enerjinin kaynağı şöyle özetlenebilir:

- Boya kabini içerisinde araç olmadığında veya boya prosesi yürütülmediğinde operatörün bir buton yardımıyla bunu belirtmesi

- Bu sayede fanların %40 frekansa düşmesi, aydınlatmaların %50 azalması ve boya havuzu sirkülasyon pompalarının durması senaryosunu gerçekleştiren bir program yazılmıştır. Tekrar bir boya prosesi başlayacağında operatörün “araç\_var” butona basması yeterli olacak şekilde bir tasarım yapılmıştır. FB\_Tasarruf bloğu PLC’ye entegre edildikten sonra yazılım ARAÇ\_VAR mühür bobini, (kabin içinde boya prosesi var anlamına gelen) boya kabini giriş kapısının açılmasını da engeller hale getirilmiştir ve ARAÇ\_YOK mühür bobini de boya prosesinin ve boya emilim süresinin tamamlanmasından sonra fırına yani kurutma bölümüne giriş kapısına izin verir hale getirilmiştir. Fırın kapısı açık iken ne boya giriş kapısı ne de fırın çıkış kapısı açılmaz durumdadır. Bu ortak kilit sistemi araç kabinde iken herhangi bir kapının yanlışlıkla açılmasını ve dış ortamdan toz, partikül gibi istenmeyen maddelerin boyaya yapışmasını engellemektedir.

Enerji tasarruf bloğu sayesinde hem iç ortam sıcaklığının korunmasından dolayı tasarruf sağlanmış hem de elektrik tüketimi 1500-1600 kWh/gün değerlerine ulaşmıştır. Bu tasarrufun sağladığı ekonomik fayda yıllık 300 çalışma günü için  $800 \times 300 = 240.000$  kWh enerjiye tekabül etmektedir. 16 adet manuel boyama yapılan diğer kabinlere de aynı sistem uygulanmıştır ve toplam boyahane enerji tasarrufu yıllık  $240.000 \times 16 = 3840000$  kWh/yıl olarak gerçekleşmiştir.

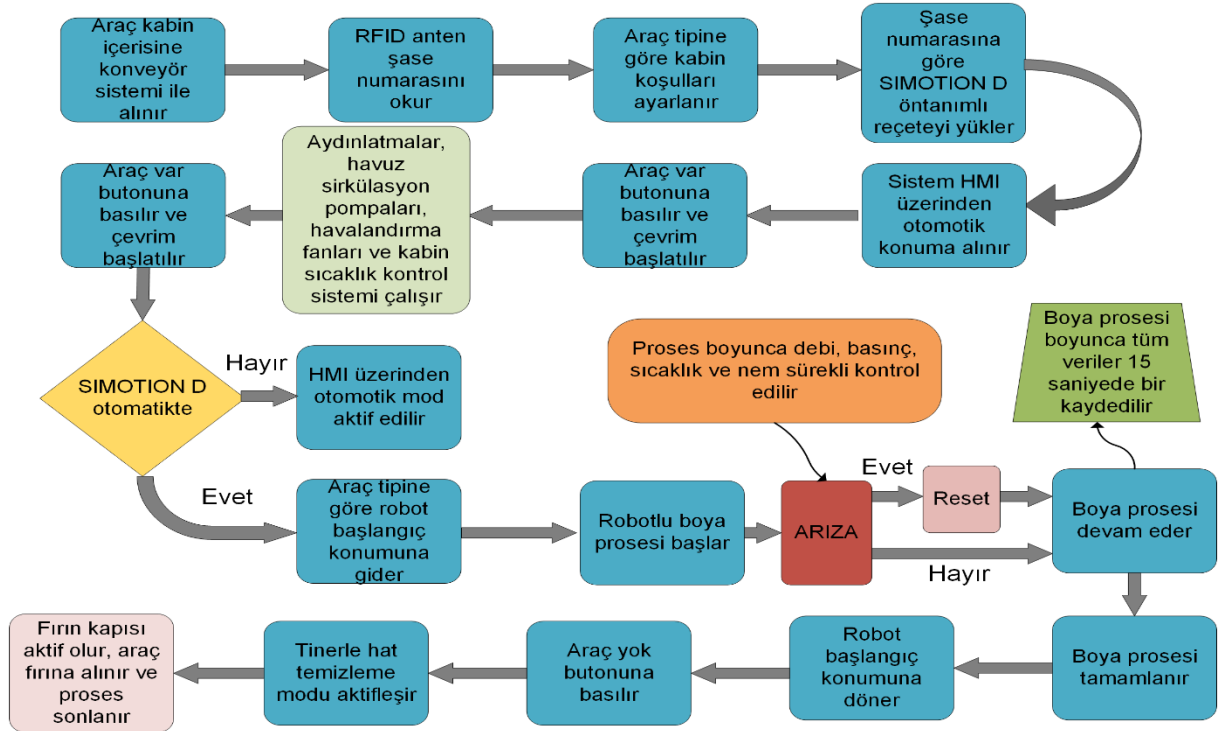
Tablo 1’de elde edilen enerji tasarrufu karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

**Tablo 1.** Eneji tasarrufu verileri

| <i>Uygulamadan önce ortalama enerji tüketimi (günlük)</i> | <i>Uygulamadan sonra ortalama enerji tüketimi (günlük)</i> | <i>Tasarruf miktarı (günlük)</i> |
|---|--|----------------------------------|
| 2300-2400 kWh   | 1500-1600 kWh  | 800 kWh                          |
| <i>Yıllık tasarruf (300 iş günü) :</i>                    |  | 240000 kWh                       |

#### 2.4. İyileştirmelerin Akış Şeması (Flow Chart of Improvements)

Sistemdeki tüm iyileştirmeler yapıldıktan sonra önceden manuel yapılan işlemler tamamen otomatik olarak yürütülür. Tüm kritik parametreler kontrol edilir ve boya kalitesine etkiyen tüm veriler her 15 sn’de bir arşivlenir. Bu sayede kalite hataları önemli ölçüde azaltılmıştır. Akış şeması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. İyileştirmelerin akış şeması

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

Bu çalışmada, ilgili püskürtme işleminin etkileri, kaplama malzemesi sarfiyatı ve kuru film üzerindeki parametreler incelenmiştir. Kaplanacak malzeme 0,8 mm olan sacdır. Kullanılan boyanın (BA08 Seri Epoksi Astar) spesifikasyonları Tablo 1’de verilmiştir. En iyi boya kalitesinin elde edilmesi ve operatörün elle boyadığından daha kararlı ve hatasız bir proses yürütülmesi amacıyla denemeler yapılmıştır (Şekil 13).



Şekil 13. Elle boyama ve patern aralığı

Önemli parametrelerden, besleme havası basıncı, boya debisi ve mesafe gibi parametreler önemli miktarda malzeme sarfiyatını ve kuru film kalınlığını etkilemektedir. Bu nedenle, her parametre için Tablo 2’de belirtilen minimum ve maksimum değerler aralığında kademeli olarak çeşitli deneyler yapılmıştır.

**Tablo 2.** Boya verileri

| <b>Faktörler</b>               | <b>Değerler</b> |
|--------------------------------|-----------------|
| Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,55            |
| Katı madde (%)                 | 68              |
| Uygulama viskozitesi (sn)      | 18-20           |
| İstenen ortam sıcaklığı (Co)   | 20-30           |
| Uygulanan kabin nemi (%)       | 50-70           |
| Uygulama debisi (cc/dk)        | 400-700         |
| Karışım donma süresi (saat)    | 4               |
| Karışım oranı (hacimce)        | 1,7/1           |

Tablo 3'teki verilerden bir değeri değiştirip diğerlerini sabit tutarak denemeler yapılmıştır.

**Tablo 3.** Boya prosesi aralıklar

| <b>Faktörler</b>         | <b>Min.</b> | <b>Maks.</b> |
|--------------------------|-------------|--------------|
| Spreyleme basıncı (bar)  | 3,5         | 4            |
| Boya debisi (cc/dk)      | 400         | 500          |
| Mesafe (m)               | 0,19        | 0,21         |
| Patern (m)               | 0,3         | 0,4          |
| Perde aralığı (m)        | 0,1         | 0,125        |
| Kabin sıcaklığı (Co)     | 20          | 25           |
| Kabin fark basıncı (Pa)  | -5          | +10          |
| Kabin hava debisi (m/sn) | 0,2         | 0,4          |
| Robot kol hızı (mm/sn)   | 200         | 450          |

İlk boya deneme işleminde kullanılan parametreler Tablo 4'te ve boyama işlemi sonucunda sac üzerinde oluşan görüntü Şekil 14 (a)'da görülmektedir.

**Tablo 4.** Başarısız bir boya prosesine ait değerler

| <b>Faktörler</b>         | <b>Değerler</b> |
|--------------------------|-----------------|
| Spreyleme basıncı (bar)  | 4,2             |
| Boya debisi (cc/dk)      | 450             |
| Mesafe (m)               | 0,2             |
| Patern (m)               | 0,35            |
| Perde aralığı (m)        | 0,12            |
| Kabin sıcaklığı (Co)     | 24              |
| Kabin fark basıncı (Pa)  | +1              |
| Kabin hava debisi (m/sn) | 0,4             |
| Robot kol hızı (mm/sn)   | 350             |

Yapılan boyamada bir miktar akma problemine rastlanmıştır. Daha düşük debi ile denenmesinde veya kol hızının artırılmasında problemin giderilebileceği düşünülmüştür. Kabin içi hava hızının fazlalığından dolayı boyada yer yer dalgalanmalar saptanmıştır.

Bir diğer deneme işleminde kullanılan parametreler Tablo 5'te ve boyama işlemi sonucunda sac üzerinde oluşan görüntü Şekil 14 (b)'de görülmektedir. Daha düşük debi ile denenmesinde veya kol hızının artırılmasında akma problemi giderilmiştir fakat ortam hava debisinin bir önceki denemeye göre artırılması ve perde aralığının 3 cm artırılması sonucunda kısmi dalgalanma problemleri görülmüştür. İstenilen dolgun görüntü elde edilememiştir. Kuru ve kötü yayımlı bir görüntü vardır.

**Tablo 5.** Başarısız bir boya prosesine ait değerler

| <b>Faktörler</b>         | <b>Değerler</b> |
|--------------------------|-----------------|
| Spreyleme basıncı (bar)  | 4,2             |
| Boya debisi (cc/dk)      | 320             |
| Mesafe (m)               | 0,2             |
| Patern (m)               | 0,35            |
| Perde aralığı (m)        | 0,15            |
| Kabin sıcaklığı (Co)     | 24              |
| Kabin fark basıncı (Pa)  | -1              |
| Kabin hava debisi (m/sn) | 0,4             |
| Robot kol hızı (mm/sn)   | 450             |



(a)

(b)

**Şekil 14.** Tablo 4'teki değerlerle elde edilen sonuç (a), Tablo 5'teki değerlerle elde edilen sonuç

Denemelerden elde edilen en başarılı değerler Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'daki veriler kullanılarak gerçekleştirilen proseste elde edilen istenilen özelliklerde bir boyanın yaş halinde az miktarda portakal kabuğu görüntüsü beklenmektedir. Parlak ve yoğun bir görüntünün yanında akma, tozuma, kuma gibi sorunların olmaması ve boya yayılımının dengeli olması istenir. Bu sistemle bir insan elinin yapabileceğinden daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Şekil 15 (a) ve 15 (b)'de farklı açılardan fırında pişirilmiş araçların son görüntüleri mevcuttur. Boya kalınlıkları hedef 93-105 mikron aralığındadır ve zımpara ve son kat boya işlemlerinden önce istenilen kalitededir.

**Tablo 6.** En başarılı boya prosesi değerleri

| <b>Faktörler</b>         | <b>Değerler</b> |
|--------------------------|-----------------|
| Spreyleme basıncı (bar)  | 4,1             |
| Boya debisi (cc/dk)      | 380             |
| Mesafe (m)               | 0,2             |
| Patern (m)               | 0,35            |
| Perde aralığı (m)        | 0,125           |
| Kabin sıcaklığı (Co)     | 23,5            |
| Kabin fark basıncı (Pa)  | +3              |
| Kabin hava debisi (m/sn) | 0,35            |
| Robot kol hızı (mm/sn)   | 400             |

Şekil 15 (a) ve 15 (b)'de farklı açılardan fırında pişirilmiş araçların son görüntüleri mevcuttur. Boya kalınlıkları hedef 93-105 mikron aralığındadır ve zımpara ve son kat boya işlemlerinden önce istenilen kalitededir.



(a)

(b)

**Şekil 15.** Fırın 1 (a), Fırın 2 (b)

Boya ve kurutma işlemlerinin ardından yapılan film kalınlık ölçüm sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

**Tablo 7.** Yüzeydeki Boya Film Kalınlıkları (mikron) (Ölçümler 10 cm aralıklarla yapılmıştır)

| <b>Sac yatay uzunluğu (140 cm) boyunca 10 cm aralıklardaki ölçümler</b> |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Sac dikey uzunluğu (80 cm)</b>                                       | 104 | 98  | 97  | 97  | 93  | 103 | 104 | 95 | 98  | 105 | 96  | 102 | 104 | 95  |
|   | 95  | 97  | 105 | 98  | 104 | 99  | 99  | 95 | 94  | 100 | 102 | 93  | 102 | 98  |
|   | 105 | 103 | 97  | 97  | 104 | 105 | 99  | 96 | 104 | 104 | 97  | 104 | 99  | 99  |
|   | 104 | 102 | 104 | 97  | 103 | 105 | 94  | 93 | 99  | 93  | 103 | 99  | 104 | 103 |
|   | 100 | 94  | 101 | 96  | 105 | 105 | 96  | 98 | 98  | 102 | 103 | 98  | 95  | 103 |
|   | 95  | 97  | 95  | 102 | 101 | 101 | 93  | 98 | 105 | 97  | 101 | 100 | 99  | 97  |
|   | 100 | 103 | 98  | 96  | 96  | 102 | 105 | 95 | 104 | 93  | 97  | 97  | 99  | 105 |
|   | 102 | 95  | 96  | 95  | 100 | 94  | 98  | 95 | 96  | 95  | 93  | 98  | 97  | 102 |

Çalışma sonucunda astar boyası, 0,8 mm kalınlığındaki sac yüzeye kartezyen boya robotu yardımı ile kararlı bir şekilde püskürtülmüştür. Boya işlemi tamamlandıktan sonra, kalınlıkların 93-105 mikron arası değiştiği görülmüştür ve boya debisinin, robot kol hızının, ortam hava debisinin film kalınlığı üzerinde direkt olarak etkileri gözlemlenmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; metal boyama yönteminin, endüstriyel robotlarla uygulanması ve en iyi boya kalitesinin sağlanması için gerekli olan ortam şartlarının otomasyon sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ortam şartları en uygun seviyeye getirildikten sonra daha önce operatörler tarafından elle yapılan spreyci boya işlemi bir kartezyen robot yardımı ile uygulanmıştır. Kartezyen robot programlamada operatörün el hareketleri referans alınmıştır. Boyanacak parça veya aracın sağına ve soluna yerleştirilmiş olan 2 adet 5 eksenli Kartezyen boya robotu kullanılmıştır. Hazırlanmış olan kontrol yazılımına ilave olarak WinCC flexible SCADA programında bir kontrol arayüzü oluşturulmuştur. Bu arayüz programı yardımıyla istenilen araçlar veya parçalar tanıtilip boya işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı ürünler için kayıtların geri çağırılması ile aynı boyama işleminin yapılabilmesi sağlanmıştır. Sonrasında ise sistemin tam otomatik sistem haline getirilebilmesi için kabin otomasyon sistemi, kartezyen robot otomasyonu ve bu ikisine ilave olarak bir RFID etiket sistemi tüm yapıya entegre edilmiştir. Çalışma sonucunda en elverişli film kalınlığının belirlenen parametre değerlerinde tutturulabildiği görülmüştür ve üretici firmaların boya kalınlığı standartlarının söz konusu parametrelerde hassas ayarlamalar yaparak elde edilebileceği tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşımlar ile elle boyamaya kıyasla daha tutarlı ve sürdürülebilir bir kalite elde etmek mümkün olmuştur. Sağlanan enerji tasarrufu ile de verimlilik artırılmıştır. Proses boyunca tüm parametrelerin ve sonuçta oluşan ürün değerlendirmelerin raporlanması ile daha detaylı analizler yapılabilir hale gelmiştir. Böylelikle daha fazla iyileştirme amaçlı çalışmalar için de material sağlanmıştır.



#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Haugan, K. M. (1974). Spray Painting Robots: Advanced Paint Shop Automation. *Industrial Robot*, 1 (6), 270-272. <https://doi.org/10.1108/eb004453>.
- [2] Feng, J., Jingshan, L., Guoxian, X., Jorge, A. (2013). Modeling Quality Propagation in Automotive Paint Shops: An Application Study. *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (9), 1890-1895. <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00084>.
- [3] Rivera, J. L. Reyes-Carrillo, T. (2014). A framework for Environmental and Energy Analysis of the Automobile Painting Process. *Procedia CIRP*, 15, 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.022>.
- [4] Luangkularb, S., Prombanpong, S., Tangwarodomnukun, V. (2014). Material Consumption and Dry Film Thickness in Spray Coating Process. *Procedia CIRP*, 17, 789-794. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.046>.
- [5] Alt, S., Sawodny, O. (2015). Model-Based Temperature and Humidity Control of Paint Booth HVAC Systems. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Nagoya, Japan, 160-165. doi: 10.1109/ICMECH.2015.7083966.
- [6] Geretti, L., Muradore, R., Bresolin, D., Fiorini, P., Villa, T. (2017) Parametric Formal Verification: The Robotic Paint Spraying Case Study. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 9248-9253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1287>.
- [7] Moe, S., Gravidahl, J. T., Pettersen, K. Y. (2018). Set-Based Control for Autonomous Spray Painting. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15 (4), 1785-1796. doi: 10.1109/TASE.2018.2801382.



- [8] Edelvik, F., Tiedje, O., Jonuscheit, J., Carlson, J. S. (2018). SelfPaint - A Self-Programming Paint Booth, *Procedia CIRP*, 72, 74-479. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.167>.
- [9] Bysko, S, Krystek, J., Bysko, S. (2018). Automotive Paint Shop 4.0, *Computers & Industrial Engineering*, 105546, ISSN 0360-8352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.056>.
- [10] Çanka Kılıç, F., Eyidoğan, M., Sapmaz, S. (2018). Bir Otomobil Montaj İşletmesinde Enerji Verimliliği Artırıcı Çözümlerin İrdelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6 (1), 149-162. DOI: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.331104.

## Effect of Phase Changing Material use on The Efficiency of Photovoltaic Modules

 Ramazan KAYABAŞI<sup>1,\*</sup>  Metin KAYA<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Kayseri University Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Vocational School, Melikgazi/KAYSERİ

<sup>2</sup> Karabük University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, KARABUK

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 04/11/2019

Revision 10/02/2019

Accepted: 26/04/2020

#### Highlights

- Solar Radiation
- PV/T/FDM
- $CACl_2 \cdot 6H_2O$

#### Keywords

 Solar Energy  
 Photovoltaic Module  
 Photovoltaic/Thermal  
 Renewable Energy  
 Phase Change Material

In this study, an experimental study was conducted to reduce the efficiency loss caused by the increase in temperature in photovoltaic (PV) modules that operate independent of the grid. The experiment was carried out by using a pair of polycrystalline and a pair of monocrystalline PV modules. A reference/control module was selected from each type of PV modules and these control modules were added to the system as traditional PV modules. Heat pipe and phase changing material were applied to the back surface of other PV modules.

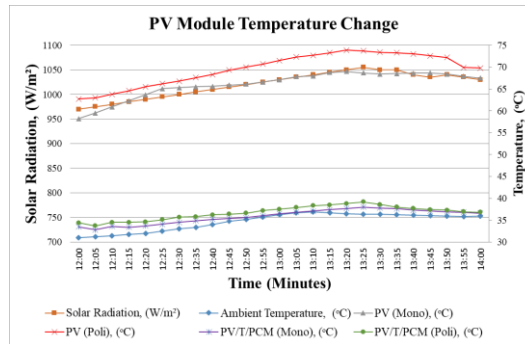


Figure A. Module Temperature Change Due to Solar Radiation

**Purpose:** In this study, we examined how the change of PV module temperature affects panel output parameters. Instantaneous changes in the module temperature were reduced by using heat pipe and PCM. The modules were kept at a low operating temperature with the methods applied, allowing them to operate at high efficiency.

**Theory and Methods:** The average temperature of PV modules was lowered using the heat pipe and phase-changing substance. One module from the monocrystalline and One module from the polycrystalline modules were placed on the measurement table as reference modules. For the other 2 modules, the double layer was fixed to the back surface of the panel by placing the heat pipe between the macro capsules. The heat pipe was manufactured from copper pipe using the U-type method. FDM was fixed by placing copper tubes between the macro capsules. The experiments were conducted under the conditions of Kayseri province.

**Results:** The temperature measured on the surface of the reference/control module was 30-80°C during the day, while the temperature ranged between 30-40°C in the experimental modules with phase changing substance. We found that the performance loss caused by increase in surface temperature in reference/control modules reaches up to 20%. Whereas, the performance loss in the experimental modules is only as high as 1% under the same conditions.

**Conclusion:** Module temperature tends to increase due to solar radiation and environmental conditions. Although the module temperature tends to increase, the heat pipe and FDM balance the temperature. They subsequently lower the mean temperature, thus, reducing the loss of performance caused by the increased temperature.

GU J Sci, Part C, 8(2): 262-278 (2020)



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


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

## Fotovoltaik Modüllerde Faz Değiştiren Madde Kullanımı ve Verimlerine Etkisi

Ramazan KAYABAŞI<sup>1</sup>,\* Metin KAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, Melikgazi/KAYSERİ

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, KARABÜK

### Öz

Bu çalışmada, fotovoltaik (PV) modüllerde sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim kaybının azaltılması için deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmanın amacı sistemde anlık sıcaklık değişimlerini azaltmak, ortalama sıcaklık değerini düşürmek ve ayrıca modül sıcaklığının kontrol dışı artışını engelleyerek sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim kaybını azaltmaktır. Çalışmada iki adet polikristal ve iki adet monokristal PV modül kullanılmıştır. PV modüller 10W gücünde ve aynı özelliklere sahiptir. Modüllerden birer modül referans modül olarak seçilmiş ve referans modüller geleneksel fotovoltaik modül olarak sisteme eklenmiştir. Diğer PV modüllerin arka yüzeyine, ısı borusu ve faz değiştiren madde uygulanmıştır. Faz değiştiren madde PV modül yüzeyinde ısı depolamak ve depolanan ısıyı ısı borusuna aktarmak amacıyla kullanılmıştır. Sistemde faz değiştiren madde olarak Kalsiyum Klorür Heksahidrat tercih edilmiştir. Sistemde ısı borusu içerisinden su geçirilerek sistem sıcaklığı kontrol altına alınmıştır. Referans modül yüzeyinde gün içinde 30-80°C sıcaklık ölçülürken, faz değiştiren madde kullanılan modüllerde 30-40°C sıcaklık aralığı görülmektedir. Referans modüllerde yüzey sıcaklığına bağlı verim kaybı %20 seviyelerine ulaşmaktadır. Isı borulu faz değiştiren madde kullanılan modüllerde ortalama sıcaklık artışı nedeniyle verim kaybı %1 olmaktadır. Sonuç olarak, aktif PV modüllerin ortalama sıcaklığı, ısı borusu ve faz değiştiren madde kullanılarak düşürülmüştür. Modül sıcaklığının düşürülmesi sıcaklık artışına bağlı verim kaybını azaltmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/11/2019  
Düzeltilme: 10/02/2019  
Kabul: 26/04/2020

### Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi  
Fotovoltaik Modül  
Fotovoltaik/Termal  
Yenilenebilir Enerji  
Faz Değiştiren Madde

### Keywords

Solar Energy  
Photovoltaic Module  
Photovoltaic/Thermal  
Renewable Energy  
Phase Change Material

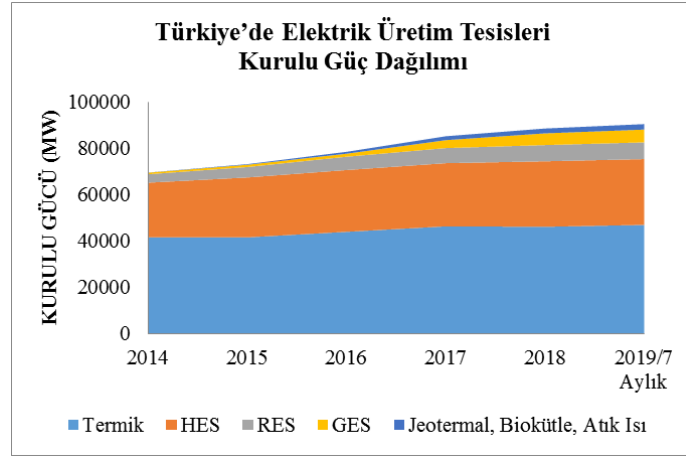
## Effect of Phase Changing Material use on The Efficiency of Photovoltaic Modules

### Abstract

An experimental study has been conducted to reduce the loss of efficiency caused by the increase in temperature in photovoltaic (PV) modules. The aim of this study is to decrease the instantaneous temperature changes and overall mean temperature in the system to prevent the uncontrolled increase of the module temperature, while reducing the loss of performance caused by the increase in temperature. The experiment was carried out by using a pair of polycrystalline and a pair of monocrystalline PV modules. Both types of the PV modules had 10W power and exact same features. A reference/control module has been selected from each type of PV modules and these control modules has been added to the system as traditional PV modules. Heat pipe and phase changing material were applied to the back surface of other PV modules. The phase changing material was used to store heat on the PV module surface and to transfer the stored heat to the heat pipe. Calcium Chloride Hexahydrate was the preferred material to use as the phase change materials in the system. The system temperature was then brought under control by passing water through the heat pipe in the system. The temperature measured on the surface of the reference/control module was 30-80°C during the day, while the temperature ranged between 30-40°C in the experimental modules with phase changing substance. We found that performance loss caused by increase in surface temperature in reference/control modules reaches up to 20%. Whereas, the performance loss in the experimental modules is only as high as 1% under the same conditions. The mean temperature of the active PV modules has been reduced by using heat pipes and phase changing material. Lowering the mean temperature subsequently reduced the loss of performance caused by the increased temperature.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yirminci yüzyılda olduğu gibi yirmi birinci yüzyılda da fosil yakıtlar enerji kaynağı olarak önemini korumaktadır. Dünyadaki nüfus artışı ve insanların yaşamlarında görülen refah artışına bağlı olarak enerji taleplerinde artış yaşanmakta, dolayısıyla fosil yakıt kullanımı giderek artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı 2017 verilerine göre, fosil enerji kaynakları küresel enerji talebinin %81'ini oluşturmaktadır [1]. Fosil yakıtlar, çevreci olmayan enerji kaynakları arasında sayılmaktadır. Kullanımı esnasında alıcı ortamlara zararlı atıklar bırakması nedeniyle, çevre sorunları oluşturmaktadır. Fosil yakıtların ekosisteme verdiği zararlar kabul edilemez seviyelere ulaşmıştır. Dünyada yaşanan iklim değişiklikleri nedeniyle doğal afetler çok sık yaşanmaya başlamıştır [2]. Bu nedenle ülkeler, gelecekteki enerji tüketimini planlamak, küresel ısınmayı durdurmak için sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yönelmelidir.



**Şekil 1.** Türkiye'deki elektrik üretim tesisleri toplam kurulu güç dağılımı [EİGM, 2019]

Türkiye elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için termik, hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biokütle santrallerini kullanmaktadır. Son yıllarda ise, alternatif enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payını arttırmak için çalışmalara hız vermiştir. Bu çalışmalara bağlı olarak son beş yılda güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin, toplam üretilen elektrik enerjisine oranında artış görülmüştür (Şekil 1.)

PV modüller atmosfere açık şartlarda elektrik üretirken, üzerine gelen güneş ışınları hücre sıcaklığını artışına neden olmaktadır. Fotovoltaik hücre verimine bağlı olarak, gelen güneş enerjisinin sadece bir kısmını elektrığe çevirebilir [3]. PV hücresi tarafından kullanılmayan güneş enerjisinin geri kalan kısmı, panel yüzey ve malzemesine bağlı ısı olarak emilmektedir [4].

Güneş enerjisinden mekanik sisteme ihtiyaç duyulmadan direk olarak PV teknolojisi ile enerji üretmenin avantajlı yönleri olmakla birlikte, sistemin kullanımı esnasında verimi düşüren nedenlerde bulunmaktadır. PV modül verimlerini düşüren nedenler arasında gölgelenme, yansıma, tozlanma, kablo ve invertör kayıpları yer almaktadır. Modüllerin atmosfer şartlarında çalışması esnasında çevresel nedenler ve güneş ışınları nedeniyle sıcaklığı yükselmeye başlar. Güneş ışınlarının bir kısmı modüllerde yararlı enerjiye dönüşürken diğer kısmı, ısı enerjisi olarak modül sıcaklığını arttırmaktadır.

Güneş pilinin çalışma sıcaklığı arttıkça, P-V karakteristiğinde modül gücüne karşılık gelen gerilimi azaltmaktadır. PV modüllerde sıcaklığın artması nedeniyle modül gerilim değeri düşerken akım değeri artmaktadır. Işınım şiddeti arttıkça, PV modül çıkış gücü yükselmektedir. Işınım şiddetine bağlı çıkış gücü ile modül gerilimi ve modül akımı artmaktadır. PV modüllerde sıcaklık değişimlerinin oluşturduğu değişim az iken, ışınım şiddetine bağlı değişim daha fazladır. PV modüller sıcaklıktan olumsuz etkilendiği için sıcaklık arttıkça modülün çıkış gerilimi ve gücü azalmaktadır. Işınım şiddeti modüllerin temel enerji kaynağı olması nedeniyle güneşli-soğuk alanlar PV modüllerin ideal konumlarıdır [5].

PV modüller güneş doğarken çevre sıcaklığındadır, gün içinde ise hücre sıcaklıkları artmaktadır. Işınım şiddetine ve aktif soğutma sistemine bağlı olarak hücre sıcaklığı değişmektedir. Güneş hücrelerinin siyah veya koyu mavi yüzeyi ısı için iyi bir emme tabakasıdır yüzey sıcaklığı (80 °C'ye kadar) ulaşabilmektedir. PV sıcaklığının yükselmesi modül verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Hücre sıcaklığındaki bir

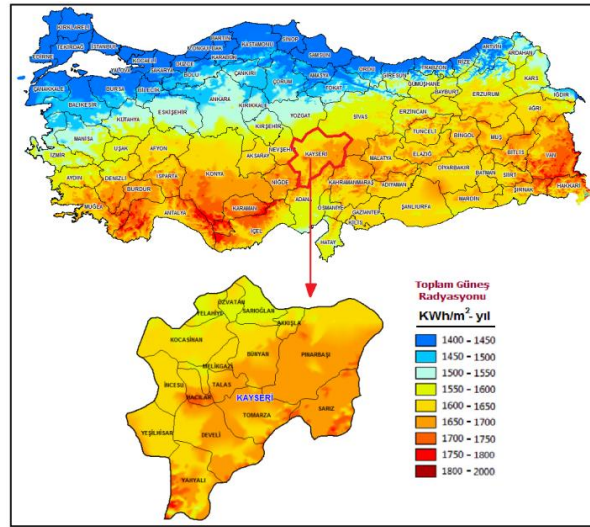
derece yükseliş %0,04 ile %0,065 verim kaybına neden olmaktadır [6]. FDM'ler faz değişimi sırasında gizli ısıyı, sonrasında duyulur ısıyı emerek hücre sıcaklığını sınırlamak için PV modüllerde kullanılabilir [7]. FDM seçimi yapılırken erime sıcaklıkları dikkate alınmalıdır. Gizli ısı depolama kapasitesi yüksek olmalı ve sistemin alt ile üst sıcaklık değerlerine uyumlu olmalıdır. Seçilen FDM kimyasal olarak kararlı ve ucuz olmalıdır. Ayrıca toksik ve aşındırıcı özelliğe sahip olmamalıdır [5].

PV panellere soğutma yapılmadığında, hücre sıcaklığına bağlı olarak panelin elektrik üretimi ve elektriksel verimi düşmektedir. Deneysel çalışmalarda PV yüzey sıcaklığı 50 dakika içerisinde 80°C sıcaklığa çıkmaktadır. Yüzey sıcaklığının artışı PV panelin elektriksel verimini %11,9 iken %8 seviyelerine düşürmektedir [8].

### 1.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli (Solar Energy Potential)

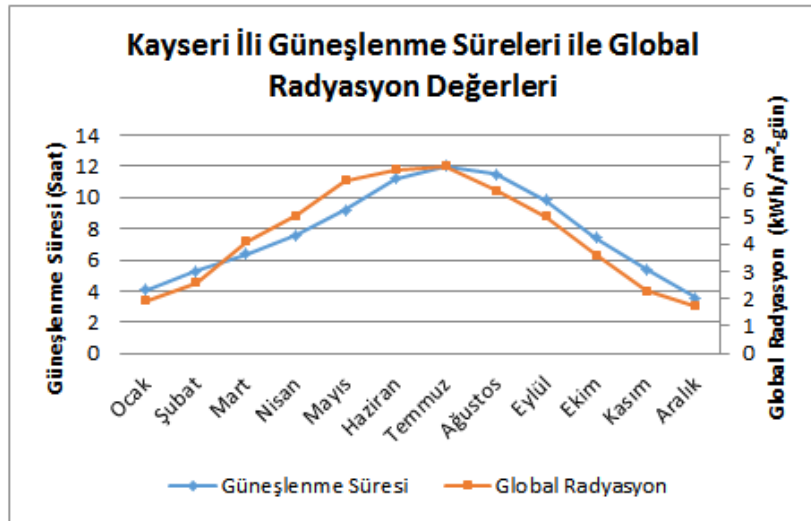
Tarih boyunca güneş ve güneş enerjisini insanlığın yararına kullanmak için çalışmalar yapılmıştır. Geçmişte güneşten atmosfer şartlarında kurutma yapılırken, günümüzde atmosfer şartlarından bağımsız modern şartlarda kurutma işlemleri yapılmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanma yöntemleri arasında en yaygın olarak ısıl sistemler kullanılmaktadır. Evlerin çatılarında termal kolektörler kullanılarak kullanım suları ısıtılmakta ve yoğunlaştırıcı ısı sistemleri ile güneş santrallerinde elektrik üretilmektedir. Isıl yöntemler dışında, güneş enerjisinden doğrudan elektrik elde etmek için PV sistemler kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları sürekliliği olan, tükenmez ve çevreci enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi bu yenilenebilir enerji kaynaklarından olmakla birlikte, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına da kaynak olmaktadır. Enerji kaynağı güneşten gelen ışınlar olması nedeniyle, temiz ve çevreci bir enerji kaynağıdır. Yeryüzünün yüzey şekillerine ve yükseltilerine bağlı olarak ortalama güneş enerjisi potansiyeli (0-1100) W/m<sup>2</sup> 'dir [9].



Şekil 2. Türkiye-Kayseri ili güneş enerji potansiyeli (YEGM, 2019)

Türkiye konumu nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye geneli ortalama güneşlenme süresi 2737 saat/yıldır. Türkiye geneli ortalama güneş enerjisi potansiyeli 1527 kWh/m<sup>2</sup>-yıldır [10]. Kayseri ili ise güneş ışınımı miktarı 1500-1700 KWh/m<sup>2</sup>-yıl olarak yüksek potansiyele sahiptir (Şekil 2). Kayseri ilinde günlük güneşlenme süresi yaz aylarında 12 (saat) seviyelerinde olmakla birlikte, global güneş radyasyonu ise 7 kWh/m<sup>2</sup>-gün seviyelerindedir (Şekil 3). Bu nedenle yapılan çalışmada deney düzeneği Kayseri ilinde yer alan Erciyes Üniversitesi kampüsü içerisinde kurulmuştur.



Şekil 3. Kayseri ili güneşlenme süreleri ile global radyasyon değerleri [EİGM, 2019]

Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle güneş enerjisine eğilimin arttığı görülmektedir [11]. PV hücre teknolojisinde görülen yeni gelişmeler, ayrıca sistem bileşenlerinde kayıpların azaltılması, toplam verim artışını sağlamaktadır. Sistemlerde görülen kurulum kolaylığı, zaman içerisinde düşen maliyetler, PV sistemlerini avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca ülkelerin güneş enerjisine yönelik sağladıkları teşvikler ve lisans muafiyeti, fotovoltaik sistemlerin cazip hale gelmesini sağlamaktadır [12].

## 1.2. Faz Değiştiren Madde (Phase Changing Material)

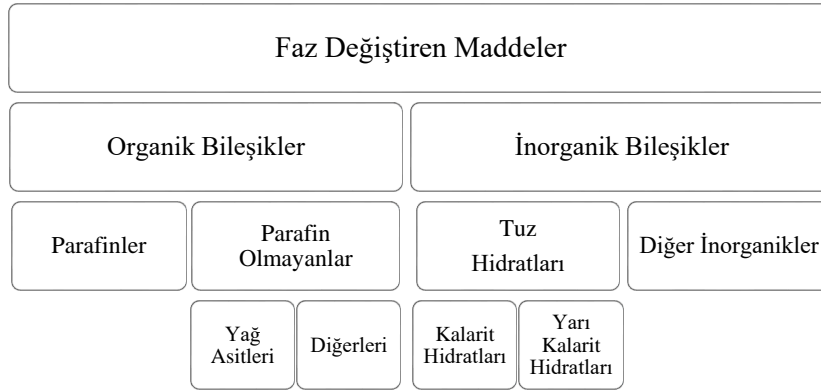
PV modüllerin yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması modül verimlerini ve modül ömürlerini olumsuz etkilemektedir. Modül sıcaklığının yükselmesini engellemek için pasif veya aktif soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Pasif soğutma, tabii olarak sistemde hava akışı sağlanarak yapılmaktadır. Aktif soğutma, cebri olarak suyla veya havayla yapılabilmektedir. Son yıllarda PV panelleri için hava kaynaklı ısı pompasıyla modül sıcaklığını düşürmek için çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca ısı borusu kullanarak aktif su soğutma tekniği kullanılmaktadır. PV modüllerin sıcaklık kontrolünde FDM kullanmak birçok araştırmacı tarafından denenmeye başlanmıştır [13-14-15]. FDM kullanılarak yapılan çalışmalarda sistemin ekonomik uygulanabilirliği sorgulanmaya devam etmektedir.

FDM'ler ısıya maruz bırakıldığında iç enerjilerinde artış görülmeye başlamaktadır. Isı verilmeye devam edilirse iç enerjileri artmaya devam eder ve maddenin sıcaklığı faz değişim sıcaklığına kadar yükselmeye başlar. Faz değişim sıcaklığına ulaşan FDM'ye ısı verilmeye devam ederse sabit sıcaklıkta faz değişimi gerçekleşir. Faz değişimi esnasında madde, gizli ısıyı depolarken madde sıcaklığı sabit kalır. Faz değişimi tamamlanması sonrasında FDM'ye ısı verilmeye devam edilirse, sıcaklığı artmaya devam eder. Sistemde kullanılacak FDM önceden incelenmelidir. Maddenin faz değişim sıcaklığı ve ısı kapasitesi kullanılacak sistem için uygun olmalıdır. Isı depolamak için kullanılabilen FDM türlerine örnek maddeler ve özellikleri (Tablo 1)'de verilmiştir.

Tablo 1. FDM Türleri ve Özellikleri

| FDM                         | Moleküler Formül   | Erime Noktası (°C) | Erime Isısı (kJ/kg) |
|-----------------------------|--|--------------------|---------------------|
| Kalsiyum Klorür Hekzahidrat | CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O                             | 29,7               | 171                 |
| Oktadekan                   | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub> | 24,4               | 244                 |
| Trimetilolitan Tetrahidrat  | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub> 4H <sub>2</sub> O  | 29,8               | 185                 |
| Parafin                     | MERWAX B4-F  | 44-46              | 155                 |
| Tuz Hidratı                 | CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O                              | 30                 | 171                 |

FDM'ler organik ve inorganik olarak ikiye ayrılırlar. Parafinler ve yağ asitleri organik FDM sınıfında yer alırken, tuz ve klatrat hidratları inorganik FDM sınıfında yer almaktadır. Organik FDM'lerin kararlı olmaları, toksik olmamaları, korozif özellik göstermemeleri, düşük buhar basıncına sahip olmaları ve aşırı soğuma göstermemeleri avantajlarıdır. Organik FDM'lerin termal iletkenliğinin düşük olması, yanıcı olmaları ve çalışma şartlarında faz değişimi esnasında büyük hacim değişimi göstermeleri dezavantajlarıdır. İnorganik FDM'lerin termal iletkenliklerinin iyi olması, ergime ısısının yüksekliği, yanıcı olmaması ve ucuz olmaları avantajlı yönleridir. İnorganik FDM'lerin aşırı soğuma göstermesi, korozif olmaları, düşük faz dönüşüm sayısı dezavantajlı yönleridir. FDM'ler sistemde ısı enerjisi gereksinimi bulunmadığı durumlarda ısı depolama işlemi gerçekleştirirken, ısı ihtiyacı oluştuğunda sisteme ısı verebilmektedir. FDM'ler kapsülendirilerek kullanılması halinde, kullanıldığı sisteme avantajlar sağlamaktadır. FDM'ler kapsülendirirken sistemin yapısına bağlı olarak makro, mikro veya nano kapsülleme yöntemlerinden biri kullanılabilir. FDM'ler ısı depolamak ve ısı aktarmak amacıyla kapsülendirilerek kullanılması halinde, maddelerin çevrim sayısı artmaktadır [16].



**Şekil 4.** Faz değiştiren materyallerin sınıflandırılması [17].

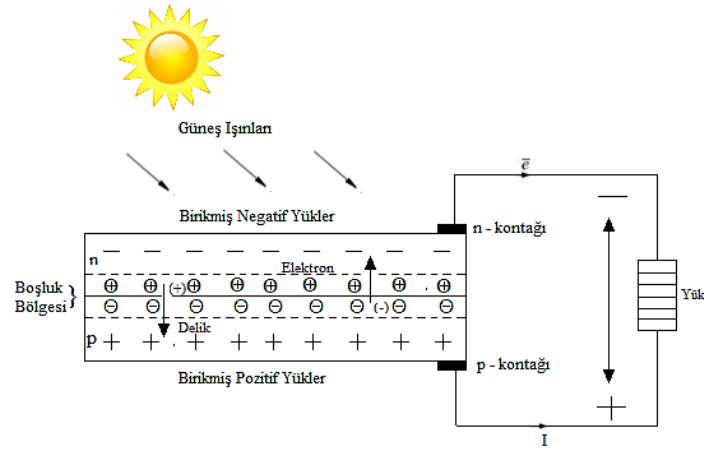
Sistemde FDM olarak Kalsiyum Klorür Heksahidrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) kullanılmaktadır. Normal şartlarda ( $25^\circ\text{C}$ ) katı fazda bulunan FDM sistemde ısıya maruz kaldığında,  $29,7^\circ\text{C}$ , sıcaklıkta erimeye başlamaktadır. Katı-sıvı faz değişim ısısı  $171 \text{ kJ/kg}$ 'dır.

FDM tercihi yapılırken, seçilen madde tasarlanan sisteme uygun olmalıdır. Seçilen FDM, sistemden beklenen ısı depolama kapasitesini karşılayabilmelidir. FDM'lerin ısı tutma kapasiteleri, faz değiştirme süreleri ve ısı transferi katsayıları tasarlanan sistem için uygun olmalıdır [18]. İnorganik maddeler organik maddelerle kıyaslandığında, birim hacimde iki kattan fazla ısı depolama kapasitesine sahiptir [19]. FDM'ler Fotovoltaik ve Hibrit sistemleri istenen sıcaklıkta tutmayı sağlayabilmektedir. Sistem istenen sıcaklıkta tutulduğunda daha fazla elektrik enerjisi üretebilmektedir. FDM kullanılan fotovoltaik modüllerin diğer modüllere kıyasla sıcaklık ortalamaları, yaklaşık  $30^\circ\text{C}$  azalmaktadır [20].

PV modüllerde FDM kullanımı, hücre sıcaklığının yükselmesini önlemektedir. Bu sisteme sağladığı pozitif bir durumdur. PV modüllerde FDM kullanımı sonrası negatif durumlarda ortaya çıkmaktadır. Modül ağırlığının artması, izolasyon problemlerinin yaşanması, ışık ve maliyetin artması negatif yönler olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 1.3. Güneş Pilleri (Solar Cells)

Güneş enerjisinden direk elektrik enerjisi elde etmek için geliştirilen sistemlerin temelini, güneş pilleri oluşturmaktadır. Güneş pilleri, güneşten üzerine düşen ışınları (fotonları) direk olarak elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Modül yüzeyine gelen güneş ışınları, güneş pilinin katmanları arasında elektrik akımı oluşmasını sağlamaktadır. Doğru akım olarak elektrik üretim yapan güneş pilleri, imalat ve bağlantı şekillerine göre çeşitli güçlerde imal edilebilmektedirler. Sistemden elde edilen enerji doğrudan kullanılabilir gibi, akülerde depolanabilmekte veya inverter vasıtasıyla şebekeye verilebilmektedir [21].



**Şekil 5.** Güneş pilinin çalışma prensibi [5].

Güneş hücrelerinin birbirlerine bağlanmasıyla, istenen çıkış gücüne sahip PV modüller oluşturulmaktadır (Şekil 5). Modüller birbirlerine bağlanarak panelleri ve paneller birbirlerine bağlanarak panel dizilerini oluşturmaktadır. Tasarımı yapılan sistemin gücünü karşılamak için modüller ve paneller birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanabilmektedir.

PV modüllerin verimleri modül malzeme bileşimine, ışınım şiddetine, ortam sıcaklığına ve modül sıcaklığına bağlıdır. PV modül yüzey sıcaklığı  $14,9^{\circ}\text{C}$  iken modül verimi %12,07 ve modül yüzey sıcaklığı  $51,3^{\circ}\text{C}$  iken modül verimi %10,7 olmaktadır. PV modüllerde sıcaklık artışı, modüllerde sıcaklık artışına bağlı verim düşümüne neden olmaktadır [22].

Modül arka yüzeyi kış şartlarında modüllerin bulunduğu ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu değerlerine bağlı, soğutmaya ihtiyaç duymamaktadır. Yaz şartlarında ise hava hızı artırıldığında modül sıcaklığı azalır buna bağlı olarak açık devre voltajı artmaktadır [23]. Yoğunlaştırıcı modüllerde ise panel sıcaklığı  $80^{\circ}\text{C}$  ile  $100^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Bu sıcaklıklar panel verimliliğini %10'a kadar düşürmektedir. Panellerin arkasındaki sıcaklık, ortam sıcaklığına ve konsantre güneş radyasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle modüllerin sıcaklığının düşürülmesi ihtiyaç haline dönüşür [24]. PV modüllerde geleneksel modüller ile FDM (parafin-balmumu) uygulanan, nanoparçacıklı (parafin) karışımı kullanılan modüller kıyaslandığında yüksek güneş radyasyonunda nanoparçacıklı parafin karışımı olan panelin yüksek elektriksel ve termal verime sahiptir. Ekserji analizlerine bakıldığında nanoparçacıklı parafin karışımı olan panelin ortalama ekserji verimliliği %10, parafinli panelin %9,2 olduğu belirlenmiştir [25].

#### 1.4. Fotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi (Energy Balance of Photovoltaic System)

Termodinamiğin birinci yasası enerji korunumu kanunudur. Bu yasada “Kapalı bir sistemde bir hal değişimi sırasında toplam enerjisindeki net değişimi, sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan toplam enerjinin farkına eşittir” diye ifade edilmektedir. Enerji korunarak bir formdan başka bir forma dönüşmekte toplam enerji miktarı değişmemektedir. Bu nedenle bir sistemde enerji dengesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (1)$$

Denklemden ifade edilen sistem içinde meydana gelecek değişiklik, sisteme giren ( $E_{giren}$ ) enerjiden, sistemden çıkan ( $E_{çıkan}$ ) enerjinin çıkarılmasıyla hesaplanabilmektedir. Fotovoltaik sistemde enerji dengesi PV sisteminin elektrik üretimi ve PV sisteminin ısı kayıplarının toplamından oluşmaktadır.

$$En_{PV} = En_{PV,e} + En_{PV,ısı} \quad (2)$$



Sistemin açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) bilinmesi halinde sistemin üreteceği elektrik enerjisi ( $En_{PV,e}$ ) hesaplanabilmektedir.

$$En_{PV,e} = V_{oc}I_{sc} \quad (3)$$

Sistemde meydana gelen ısı kayıpları ( $En_{PV,ısı}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$En_{PV,ısı} = h_{ca}A_c(T_c - T_a) \quad (4)$$

Denklemden verilen ( $h_{ca}$ ) taşınım ve ışıma nedeniyle oluşan ısı kaybını ( $W/m^2K$ ) ve ( $T_c$ ) hücre sıcaklığını (K) ifade etmektedir. PV hücrede meydana gelen ısı kaybı rüzgâr hızına, modül yüzey malzemesine, nem oranına bağlı değişmektedir.

$$En_{PV} = V_{oc}I_{sc} + h_{ca}A_c(T_c - T_a) \quad (5)$$

Denklemin 2’de verilen eşitlik PV sisteminin toplam enerji dengesini ifade edecek şekilde yukarıdaki şekilde tekrar yazılabilmektedir.

PV sisteminin enerji verimliliği sistemden çıkan enerjinin, yüzeye ulaşan güneş enerjisine oranı olarak tanımlanabilmektedir.

PV sistemlerde modül sıcaklığı değişimi hücre verimini etkilemektedir.

$$\eta_h = \eta_{stk}[1 - \beta(T_h - 25)] \quad (6)$$

Eşitlikte yer alan ( $\eta_h$ ) hücre verimini, ( $\eta_{stk}$ ) test koşullarındaki verimi, ( $T_h$ ) hücre sıcaklığını, ( $\beta$ ) hücre sıcaklık katsayısıdır. PV modüllerin saatlik enerji üretim miktarı güneş ışınımına bağlı olarak değişmekle birlikte, modül verimi, sistem verimi ve diğer verim parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.

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

Bu çalışmada, PV modüllerin elektrik üretimi esnasında sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen olumsuz etkilerin azaltılması için deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmada 4 adet PV modül kullanılmıştır. Modüllerden 2 tanesi monokristal, 2 tanesi polikristaldir. Monokristal ve polikristal modüllerden birer modül referans modül olarak ölçüm tablasına yerleştirilmiştir. Diğer 2 modül için çift katman makro kapsül arasına ısı borusu yerleştirilerek panel arka yüzeyine sabitlenmiştir.



**Şekil 6.** Deney düzeneği sıcaklık ölçme sistemi kalibrasyonu

Yapılan çalışmada PV modül sıcaklık ölçümleri SCN100 veri analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. SCN100 içerisinde istasyonlardan sıcaklık ölçüm ayarı yapılarak K tipi termokupl uçlara bağlanmıştır. Cihaz buzlu su ’da ( $0^{\circ}C$ ) ölçümleri yapılarak kalibrasyonu kontrol edilmiştir (Şekil6).

Deney düzeneğinde kullanılan monokristal ve polikristal modüller 10W gücündedir. Modüllerin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2). Modüllerin ebat ve boyutları aynı özelliktedir. Modüllerin üretici tarafından test edilen verimleri %15,15, açık devre voltajı 21,6V, kısa devre akımı 0,61A olarak verilmiştir.

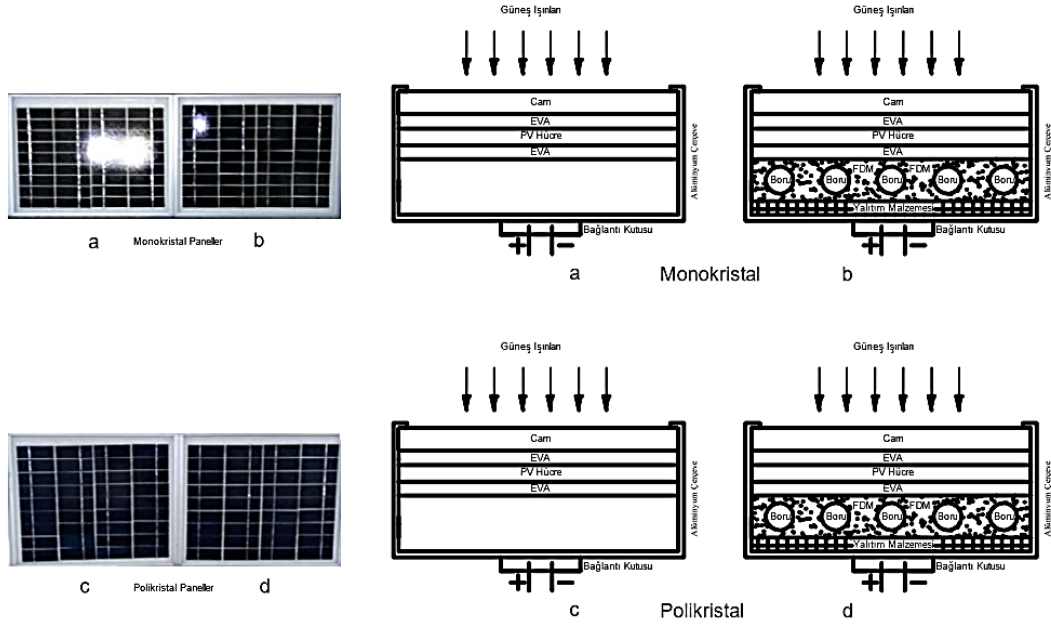
**Tablo 2.** PV Modüllerin Elektriksel ve Fiziksel Özellikleri

| Özellikleri                | Monokristal Özellikleri  | Polikristal Özellikleri  |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Maksimum güç (PM)          | 10 W                     | 10 W                     |
| Güç Toleransı              | Sadece Pozitif           | Sadece Pozitif           |
| Açık Devre Voltajı (VOC)   | 21.6 V                   | 21.6 V                   |
| Kısa Devre Akımı (ISC)     | 0.61 A                   | 0.61 A                   |
| Yükteki Maks. Voltaj (VPM) | 17.38 V                  | 17.38 V                  |
| Yükteki Maks. Akım (IMP)   | 0.56 A                   | 0.56 A                   |
| Maksimum Sistem Voltajı    | 600 V                    | 600 V                    |
| Modül Verimi               | 15.15%                   | 15.15%                   |
| Hücre tipi                 | Monokristal              | Polikristal              |
| Boyutlar / Çerçeve         | (355x305x20)mm/Alüminyum | (355x305x20)mm/Alüminyum |
| Ağırlık                    | 1.5 kg                   | 1.5 kg                   |
| Bağlantı Kutusu            | IP65 67                  | IP65 67                  |

Deney düzeneğinde kullanılan monokristal ve polikristal modüller ile ölçme cihazlarının belirsizlik analizi (Uncertainty Analysis) yapılmıştır (Tablo 3). Modüllerin çıkış parametrelerini güneş radyasyonu, modüllerin hata oranı, ölçüm cihazlarının hata oranı belirlemektedir. Ölçüm cihazlarının belirsizlik analizi yapılırken standart test koşullarındaki ölçümlerde belirtilen hata değerleri alınmıştır. Sonuçlar laboratuvar sonuçlarına göre kıyaslandığında sapmaların olması sistemde etki eden diğer bilinmeyen parametrelerin varlığı nedeniyle ortaya çıkabilmektedir.

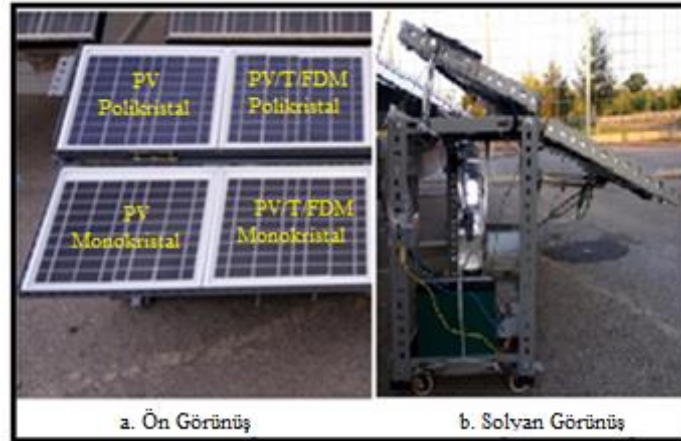
**Tablo 3.** Ölçme Sisteminde Kullanılan Cihazların Özellikleri ve Belirsizlik Analizi

| Cihaz Adı              | Ölçme Türü | Birimi           | Verim (%)                     | Ölçülen Verim (%) | Oran  |
|------------------------|------------|------------------|-------------------------------|-------------------|-------|
| <b>PV Modüller</b>     |            |                  |                               |                   |       |
| Monokristal PV         | Güç        | W                | 15,15 (25°C)                  | 14,34             | ±3,33 |
| Polikristal PV         | Güç        | W                | 15,15 (25°C)                  | 14,31             | ±3,33 |
| Monokristal PV/T/FDM   | Güç        | W                | 15,15 (25°C)                  | 14,33             | ±3,33 |
| Polikristal PV/T/FDM   | Güç        | W                | 15,15 (25°C)                  | 14,32             | ±3,33 |
| <b>Ölçüm Cihazları</b> |            |                  |                               |                   |       |
| Cihaz Adı              | Ölçme Türü | Birimi           | (%) Oran                      | Ölçülen Değer     | Oran  |
| SCN100                 | Sıcaklık   | °C               | 0,2                           | 25                | ±1,03 |
| Termokupl              | Sıcaklık   | °C               | 0,2                           | 25                | ±0,28 |
| Piranometre            | Işınım     | W/m <sup>2</sup> | 1000 W/m <sup>2</sup><br>±1.5 | 1000              | ±1,51 |
| Multimetre             | Gerilim    | V                | ±1.2                          | 19,40             | ±1,21 |
| Ampermetre             | Akım       | A                | ±1.2                          | 0,495             | ±2,16 |



**Şekil 7.** PV, PV/T Olarak Kullanılan Modüllerin Detay Şekilleri

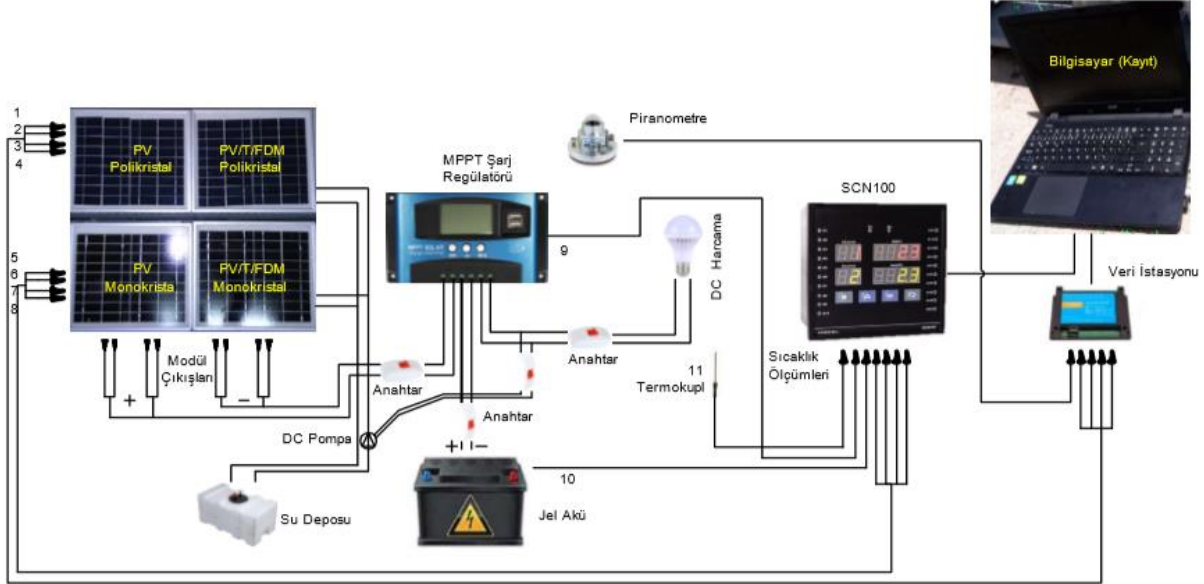
Deney düzeneği Kayseri ili Melikgazi ilçesi sınırlarında bulunan Erciyes Üniversitesi kampüsü içerisine yerleştirilmiştir. Sistemin verileri bir yıl süre ile gözlemlenerek verilerin güvenilirliği kontrol edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan modüllerin şekilleri ve tasarımları yukarıda gösterilmiştir (Şekil 7). Şekilde (a) geleneksel monokristal PV modülü ifade etmekte, (b) yüzeyine FDM uygulanmış içerisinden ısı borusu geçirilen yalıtımlı PV/T/FDM monokristal modülü göstermektedir. Şekilde (c) geleneksel polikristal PV modülü ifade etmekte, (d) yüzeyine FDM uygulanmış içerisinden ısı borusu geçirilen yalıtımlı PV/T/FDM polikristal modülü göstermektedir. Isı borusu U tipi kullanılarak bakır borudan imal edilmiştir. FDM makro kapsülleri arasına bakır borular yerleştirilerek sabitlenmiştir. FDM kapsülün üzeri EPS (Genleştirilmiş Polistren) termoplastik kapalı gözenekli strafor (yoğunluğu  $10\text{kg/m}^3$ , ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ )  $0.039\text{W/m}^2\text{K}$ ) ile kaplanmıştır. Bakır borular soğuk büküm ile şekillendirilmiş olup eksiz olarak ısı borusuna dönüştürülmüştür.



**Şekil 8.** Deney Sistemi Genel Görünüşleri.

FDM PV'lerdeki sıcaklık artışını sınırlamak amacıyla ısı çekmektedir. Isı borusu ise FDM tarafında çekilen ısıyı, suya transfer etmek amacıyla kullanılmaktadır. PV tarafından emilen ısı, taşıyıcı akışkan olan suya transfer edilmektedir. Su ısı taşıyıcı akışkan olarak sistemde kullanılmakta ve cebri olarak sirküle edilmektedir. Modüller sistemde  $15^\circ$  ile  $30^\circ$  arasında açılarda ayarlanmıştır. Modül açıları Kayseri ilinin enlem derecesine ( $38,731$ ) göre hesaplanmıştır. Modüller tüm yıl kullanıldığında ağustos ayı için panel eğim açısı ( $30-31^\circ$ ) çıkmaktadır. Modüller yaz aylarında kullanıldığında ağustos ayı için panel eğim açısı

(15-16)° çıkmaktadır. Deneysel sonuçlarının verildiği ağustos ayı için modül açıları 16° alınmıştır. Modül açıları değiştirilerek, eğim açısı yanlış uygulanması sonucunda verim kaybı oluşmaktadır. Eğim açısı değeri hatası artırıldığında verim kaybı artmaktadır.

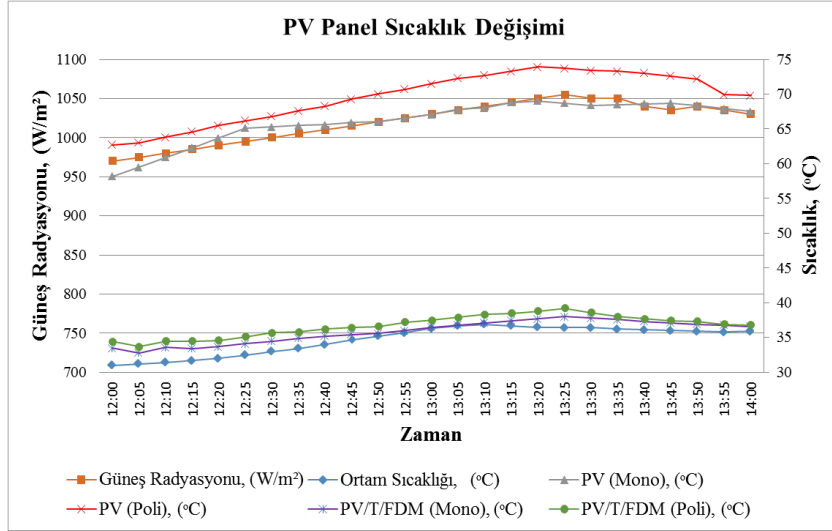


**Şekil 9.** PV-PCM sisteminin deneysel tasarımı.

Deneysel sisteminin tasarımı (Şekil 9)'da verilmiştir. PV modül sıcaklıklarını ölçmek için K tipi termokupl (1-2-3-4) kullanılmıştır. Sistemde çalışan devre elemanlarının sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı SCN100 ile K tipi termokupl yardımıyla ölçülmüştür (9-10-11). Modüller polikristal PV, polikristal PV/T/FDM, monokristal PV, monokristal PV/T/FDM olarak gösterilmiş olup; modüllerden sağlanan gerilim çıkışı (5-6-7-8) ile veri istasyonuna bağlanmış ve bilgisayara kaydedilmiştir. Modüllerin çıkışları paralel bağlanarak bir anahtar üzerinden MPPT Şarj Regülatörüne bağlanmış, şarj regülatörünün harcama ucu DC lambaya ve şarj ucu jel aküye bağlanmıştır. Böylelikle sistem şebekeden bağımsız güneş enerji sistemi olarak çalışmaya başlamıştır. Polikristal ve monokristal modüllerden PV/T/FDM olarak çalıştırılan (b-d) modüller su deposundan alınan suyun ısı borusu içerisinden geçirilerek cebri olarak dolaştırılmasıyla soğutulmaktadır. Sirkülasyonun devam etmesiyle birlikte modül sıcaklıkları yükselmesi engellenmiş ve düşmeye başlamıştır. Bu durum verim düşüşüne neden olan sıcaklığın etkisini ortadan kaldırmaktadır.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

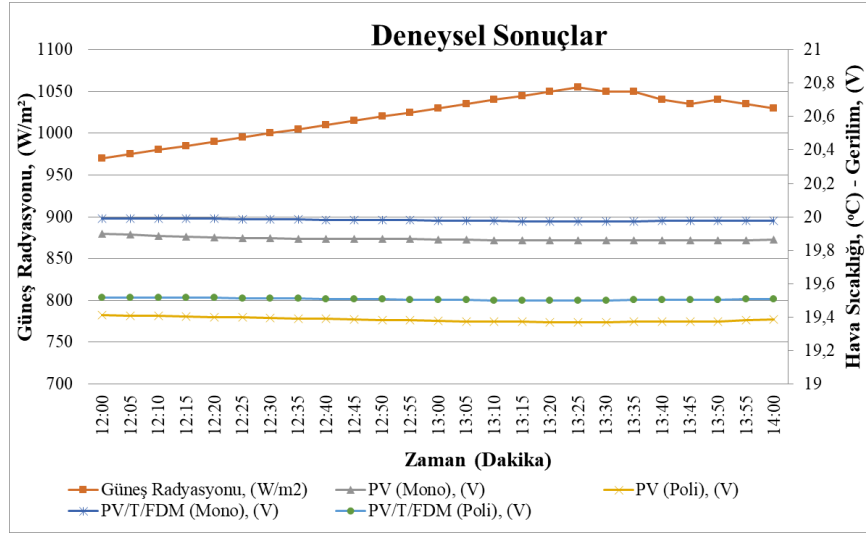
Yapılan bu çalışmada PV modüllerde modül verimini etkileyen parametrelerden biri olan sıcaklığın etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada PV modüllere ısı borusu ve FDM uygulanmıştır. Modül yüzeyinde yapılan uygulamaların modül çalışma sıcaklığını nasıl değiştirdiği, akım, gerilim ve güç çıkışını nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda modül sıcaklık değerlerinin test koşullarına yakın tutulması, modül verimlerini olumlu olarak etkilediği görülmüştür.



**Şekil 10.** Güneş radyasyonuna bağlı modül sıcaklığı değişimi (26.08.2019)

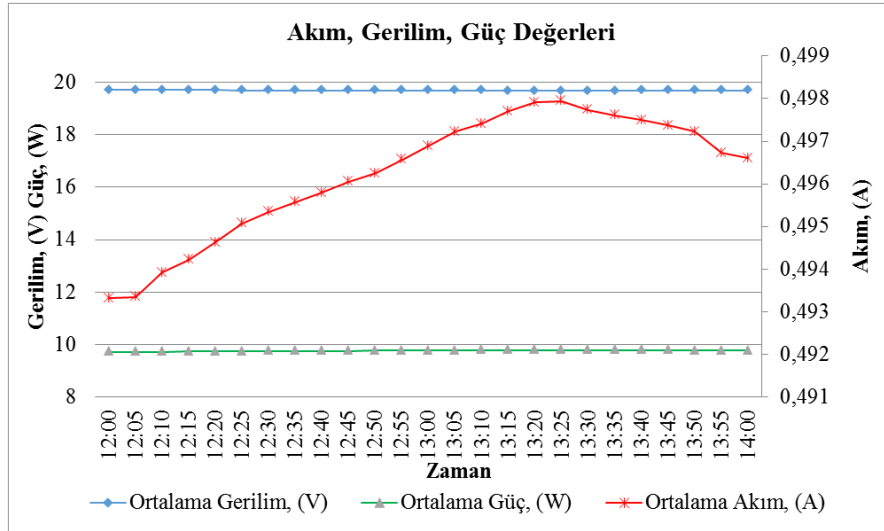
Güneş radyasyonu ve çevresel şartlar nedeniyle modül sıcaklıkları sürekli değişmektedir (Şekil 10). Güneş ışınım değerleri 12:00-14:00 saatleri arasında 970-1055W/m<sup>2</sup> aralığında değişmektedir. Deney verileri incelendiğinde, ışınım miktarına bağlı olarak PV (Polikristal), PV (Monokristal), PV/T/FDM (polikristal), PV/T/FDM (monokristal), modüllerin yüzey sıcaklıkları ışınım miktarına bağlı olarak 33°C ile 74°C aralığında değişmektedir. Deneyde ölçülen en yüksek modül sıcaklığı polikristal modüle ait olup 73,9°C seviyelerine ulaşmaktadır. Deneyde ölçülen en düşük modül sıcaklığı PV/T/FDM (monokristal) modüle ait olup 33,5°C seviyelerindedir. Işınım değerlerine ve modül yüzey sıcaklığına bağlı olarak çıkış gerilimi değişmektedir.

FDM sistemden ısı çekmek amacıyla modül arka yüzeyine ilave edilmiştir. İki adet makro kapsül içerisine (360+360) ml, toplam 720 ml Kalsiyum Klorür Hekzahidrat enjekte edilerek kapsülleme yapılmıştır. İki makro kapsül arasından ısı borusu geçirilmiştir. Sistemde kullanılan FDM faz değişim sıcaklığı 29,7°C olduğu için katı fazda bulunmaktadır. Faz değişim sıcaklığına kadar ısı çeken FDM bu sıcaklıkta faz değiştirmekte ve sıvı hale dönüşmektedir. Sıvı haldeki FDM ısı alarak sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Fakat bu sıcaklık buharlaşma sıcaklığının çok altındadır. Bu nedenle sistemde buharlaşma faz değişimi yaşanmamaktadır. FDM'nin sıcaklığının çevre sıcaklığının üzerine yükselmesi için gerekli ısı kaynak sistemde bulunan PV modüllerdir. Yaz aylarında güneş doğuşunda sistem sıcaklığı 13°C ile 18°C arasında değişmektedir. Başlangıç noktası sıcaklığına bağlı olarak faz değişiminin başlaması için 12-17°C arasında bulunan FDM ısı almalıdır. FDM katı-katı sıcaklık değişimi esnasında 26,1kj duyulur ısı ile sıcaklığı faz değişim sıcaklığına yükselmektedir. FDM katı-sıvı faz değişimi esnasında 184,7kj gizli ısı ile sıcaklığı sabit kalarak sıvı hale gelmektedir. FDM sıvı-sıvı sıcaklık değişimi esnasında 12kj duyulur ısı ile sıcaklığı 35°C'ye kadar yükselmektedir. FDM katı-katı, katı-sıvı, sıvı-sıvı işlemlerinde toplam 223kj ısı alarak son durumda sıvı halde 35°C sıcaklıkta bulunmaktadır. Isı borusundaki sirkülasyonun devam etmesi ve çevresel etkenler sıcaklığın daha fazla yükselmesine izin vermemektedir. Bu durumda modül sıcaklığının yükselmesi durmaktadır. Modül sıcaklığı sistemde bulunan FDM sayesinde anlık olarak değişmemektedir. Modül sıcaklığının test koşullarında tutulması ve anlık değişimlerin azaltılması PV modüllerin çıkış parametrelerini olumlu etkilemektedir.



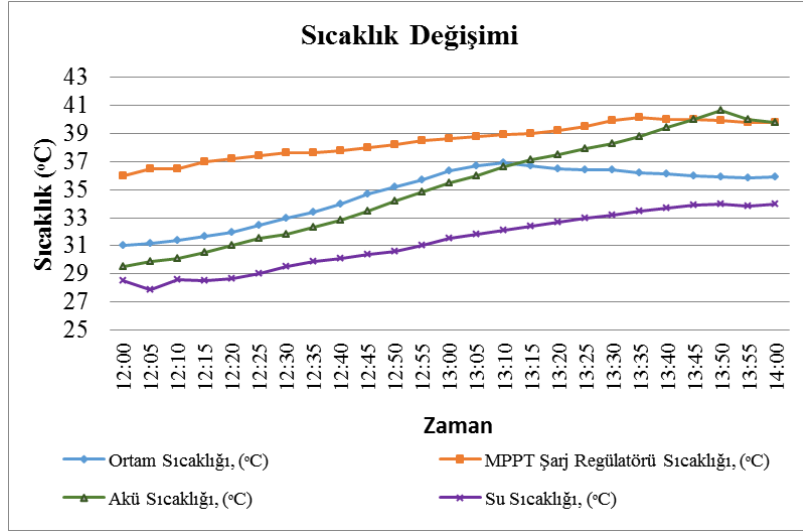
**Şekil 11.** Güneş radyasyonuna bağlı gerilim değerleri

Güneş radyasyonuna bağlı olarak gerilim değerleri değişmektedir (Şekil 11). Deney ölçümlerinden elde edilen veriler incelendiğinde, ışınım değerinin en yüksek olduğu zaman dilimi gün ortasıdır. Işınım miktarına bağlı olarak ortam sıcaklığı, saat 13:00-13:30'da 37°C seviyelerinde bulunmaktadır. Işınım miktarına bağlı olarak PV (Polikristal), PV (Monokristal), PV/T/FDM (Polikristal), PV/T/FDM (Monokristal), modüllerin gerilim çıkışları ışınım miktarına ve modül sıcaklığına bağlı olarak 19 ile 20 volt aralığında değişmektedir. Deneyde ölçülen en yüksek gerilim seviyesi, PV/T/FDM (Monokristal) panel çıkışından 19,97V olarak elde edilmiştir. Sistemde modüllerin ortalama güç değerler 9,5W ile 9,8W arasında değişmektedir. Sistem içerisinde modüller tek çıkış ile şarj regülatörüne bağlandığında, şarj gerilimi ortalama 14,2V ve sistem tüketim güç çıkışı 12,6V ile 13,6V aralığında değişmektedir. Sistemde 5W gücünde iki adet DC LED lamba bulunmakta ve bir adet DC sirkülasyon pompası 35W güç harcamaktadır. Aydınlatma devresi 24 saat temmuz ve eylül ayı boyunca kapatılmamış, kesintisiz enerji ihtiyacı sistemden karşılanmıştır.



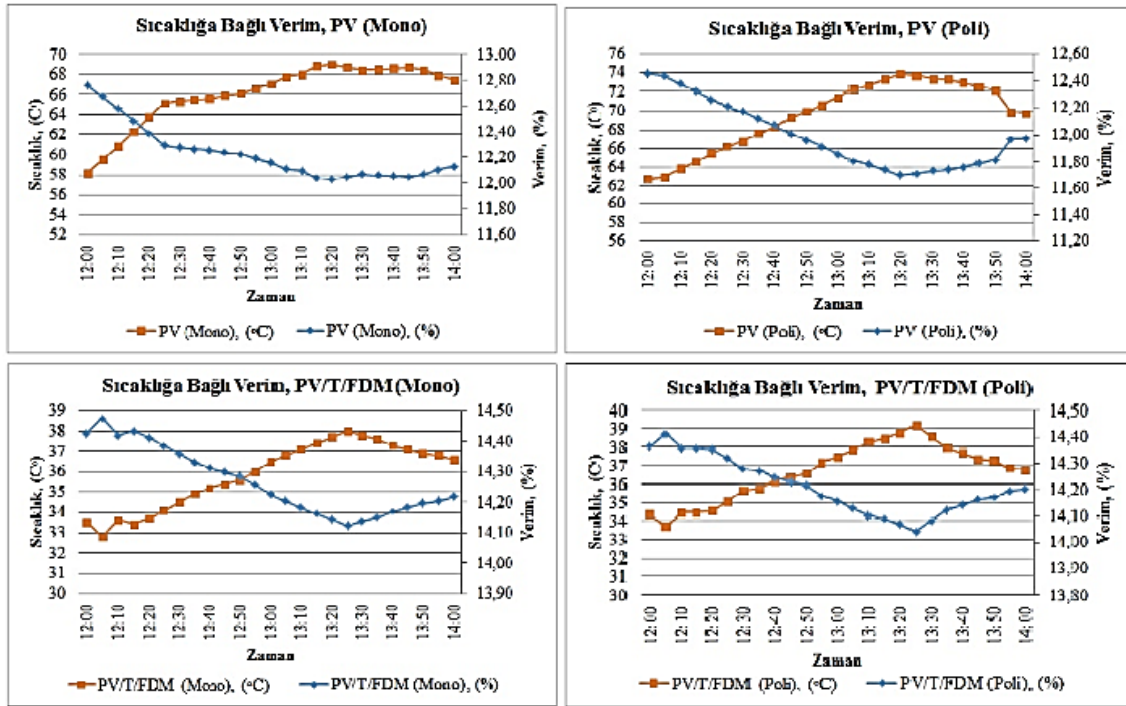
**Şekil 12.** Modüllerde ortalama akım, gerilim ve güç değerleri

PV modüllerin çıkış gerilimi güneş ışınım miktarına bağlı olarak değiştiği gibi modül sıcaklığına bağlı verim düşümü nedeniyle de değişmektedir. Modül yüzey sıcaklığı artmasıyla birlikte modül çıkış gerilim değerleri azalmaktadır (Şekil 12). Modül akımları modül sıcaklığına bağlı olarak yükselmektedir. Modül akımlarındaki artış, gerilim düşümüne oranla 1/5-1/10 seviyelerinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle modül çıkış gücü sıcaklık artışı nedeniyle azalmaktadır.



Şekil 13. Sistem bileşenlerinin sıcaklık dağılımı

Sistem atmosfer şartlarında çalışırken bulunduğu ortamdan kaynaklı çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Güneş ışınım değeri, ortam sıcaklığı, nem miktarı, rüzgâr hızı vb. nedenlerden dolayı sistem elemanlarının sıcaklıkları değişmektedir. Sistem çalışır durumda iken sistem bileşenleri çalışma şartlarından etkilenmektedir. Bu nedenle sistem elemanları sıcaklıkları ölçülerek kayıt altına alınmıştır (Şekil 13). Güneş ışınım değerinin arttığı ve çevre sıcaklığının yükseldiği zaman diliminde sistem elemanlarının sıcaklığı artmaktadır. Güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı azaldığında sistem elemanları ısı kaybettiği için çalışma sıcaklığı azalmaktadır. Sistem elemanlarının çalışma sıcaklığı aşırı seviyelere ulaşmaması nedeniyle harici soğutma uygulamalarına ihtiyaç duymamaktadır. Sistem bileşenleri sıcaklığı 40°C üzerine çıkmamaktadır. Bu nedenle sistem elemanlarına yönelik harici soğutma yapılmamıştır. Sonuç olarak modül verimlerine etkisi düşük olması nedeniyle yok kabul edilerek verim hesabı yapılmıştır.



Şekil 14. Modüllerde sıcaklığına bağlı verim değişimi

PV modüller çalışma şartlarında değişken güneş ışınımına maruz kalmaktadır. Işınım değerleri ve çevresel etkiler nedeniyle modül sıcaklıkları sürekli değişmektedir. Modül sıcaklıklarına bağlı modül verimleri de değişmektedir (Şekil 14). Geleneksel monokristal ve polikristal modüllerde ışınım değerlerine bağlı ve

çevresel koşullar nedeniyle modül 70°C sıcaklığa hızla yükselmektedir. Modül sıcaklığının artmasına bağlı olarak modül verimleri %10 düşmektedir. Gün içerisinde geleneksel modüllerin yüzeyi 80°C sıcaklığa ulaşmaktadır. Geleneksel modüllerde test koşullarının 55°C üzerine çıkan sıcaklık nedeniyle modül çalışma verimleri %15'ten %11,30'a düşmektedir. Bu oran verim kaybını %20'nin üzerine çıkarmaktadır. PV/T/FDM monokristal ve polikristal modüllerde ışınlam değerlerine bağlı ve çevresel koşullar nedeniyle modül sıcaklığı artma eğiliminde olmasına rağmen ısı borusu ve FDM sıcaklığı dengelemektedir. Modül sıcaklıkları test koşullarının (25°C) üzerine artı olarak 12°C çıkmaktadır. PV/T/FDM monokristal ve polikristal modüllerde ortalama sıcaklık artışı nedeniyle verim kaybı %1 olmaktadır.

PV panellerde FDM kullanımının arttırılabilmek için, sistem teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilmelidir. Sistemde yüksek ısı iletkenlik ve gizli ısı kapasitesine sahip düşük maliyetli FDM'ler kullanılmalıdır. Ayrıca FDM'ler nanopartikül ile karıştırılabileceği gibi ısı iletkenliğini arttırmak için diğer yöntemler araştırılmalıdır [26, 27]. Yeni yöntemler kullanılarak PV modül çalışma sıcaklığını düşürülmeye çalışılmalı ve sıcaklık artışı nedeniyle oluşan verim kaybının önüne geçilmelidir. PV modül verimlerini arttırmak için yeni yöntemler geliştirilirken yapılacak çalışmalar, sistem için fazla yük, fazla maliyet ve fazla işçilik getirmemelidir. Enerji yatırımları için bahsedilen durumlar bir sistemi avantajlı durumdan dezavantajlı hale dönüştürebilmektedir.

Bu çalışmada modül sıcaklığının azaltılması için PV modüllere uygulanan FDM ve ısı borusu monokristal ve polikristal modüller için yararlı olmuştur. Modül sıcaklıklarında anlık değişimler engellenmiş ve modül sıcaklığı test koşullarının maksimum 15°C üzerine ulaşmıştır. Referans PV modüllere göre üzerine FDM ve ısı borusu uygulanan modüller, 30°C- 50°C arasında ortalama sıcaklığı azalmıştır. Bu durum sıcaklık artışı nedeniyle meydana gelen verim düşüşünü engellemiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Karabük Üniversitesi, BAP Koordinasyon Birimi tarafından KABÜBAP-17-DR-435 no'lu Doktora Projesi kapsamında desteklenmiştir.

## SİMGE ve KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

|              |   |
|--------------|---|
| Mopt         | : Optimal Verim                           |
| $\eta$       | : Verim                                   |
| $\eta_{stk}$ | : Modülün Test Koşullarındaki Verimi      |
| $\beta$      | : Hücre Sıcaklık Katsayısı                |
| $T_h$        | : Çalışma şartlarındaki hücre sıcaklığı   |
| R            | : Elektrik direnci                        |
| V            | : Gerilim                                 |
| I            | : Akım                                    |
| W            | : Güç                                     |
| EMK          | : Elektro Motor Kuvvet                    |
| DC           | : Doğru Akım                              |
| FDM          | : Faz Değiştiren Madde                    |
| PCM          | : Phase Change Material                   |
| PV           | : Fotovoltaik                             |
| PV/T         | : Fotovoltaik/Termal                      |
| PV/T/FDM     | : Fotovoltaik/Termal/Faz Değiştiren Madde |

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cabeza, L.F., Palacios, A., Serrano, S., Üрге-Vorsatz, D., Barreneche, C. (2018). Comparison of Pastprojections of Global and Regional Primary and Final Energy Consumption with Historical Data, Renewable and Sustain Energy Reviews, 82, 681–688.



- [2] Yılmaz, F., Goncu, S. (2019). Yerküremiz Kaynaklarının Kullanımı, Refah ve Türkiye, Uluslararası Mühendislik Doğal Bilimler ve Mimarlık Sempozyumu, 2-4 Mayıs, Kocaeli.
- [3] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Levi, D.H., et al. (2017). Solar Cell Efficiency Tables (Version 50), Prog Photovoltaics Res Appl, 25 (7) 668-676.
- [4] Shang, A., Li, X. (2017). Photovoltaic Devices: Opto-Electro-Thermal Physics and Modeling, Adv. Mater, 29, 1-8.
- [5] Altaşı, İ.H. (1998). Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 47, :66-71.
- [6] Ewa, K.R., Patrycja, W.K. (2017). Photovoltaic Module Temperature Stabilization with the use of Phase Change Materials, Solar Energy, 150, 538-545.
- [7] Malvi, C.S., Dixon-Hardy, D.W., Crook, R. (2011). Energy Balance Model of Combined Photovoltaic Solar-Thermal System Incorporating Phase Change Material, Solar Energy, 85, 1440-1446.
- [8] Ömeroğlu, G., (2018). Fotovoltaik - Termal (PV / T) Sistemin Sayısal (CFD) ve Deneysel Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30 (1), 161-167.
- [9] Anonim, (2009). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Raporu, 001, 1-246.
- [10] Külücü, R., Cihanalp, C., Süslü, A., Yılmaz, D. (2016). Adana’da Global Aylık Ortalama Günlük Güneş Işınımının Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [11] Oğuz, M., Akkurt, Ş. (2017). Kayseri İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6, (2), 362-374.
- [12] Karakaş, U.C. (2019). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımındaki Gelişmeler; Güneş Enerji Sistemleri ve Finansman Modelleri, ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi, 6(13), 65-84.
- [13] Brinkworth, B.J., Sandberg, M. (2006). Design Procedure for Cooling Ducts to Minimise Efficiency Loss due to Temperature Rise in PV Arrays, Solar Energy, 80, 89–103.
- [14] Sahay, A., Sethi, V.K., Tiwari, A.C., Pandey, M.A., (2015). Review of Solar Photovoltaic Panel Cooling Systems with Special Reference to Ground Coupled Central Panel Cooling System (GC-CPCS). Renew Sustain Energy Rev, 42, 306–12.
- [15] Nizetic, S., Coko, D., Yadav, A., Grubisic-Cabo F. (2016). Water Spray Cooling Technique Applied on a Photovoltaic Panel: The Performance Response, Energy Convers Manage, 108, 287–96.
- [16] Konuklu Y., (2008). Mikro Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana Türkiye.
- [17] Kayabaşı, R., Kaya, M. (2019). Fotovoltaik Modüllerin Atık Isılarından Termoelektrik Jeneratör ile Elektrik Üretimi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (16), 310-324.
- [18] Eslamnezhad, H. Rahlimi, A.B., 2017. Enhance Heat Transfer for Phase-Change Materials in Triplex Tube Heat Exchanger with Selected Arrangements of Fins, Applied Thermal Engineering, 113, 813-821.
- [19] Mohamed, S. A., Al-Sulaiman, F. A., Ibrahim, N. I., Zahir, M. H., Al-Ahmed, A., Saidur, R., Yılbaş, B.S., Sahin, A., (2017). A Review on Current Status and Challenges of Inorganic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1072-1089.

- [20] Yin, E., Li, Q., Li, D., Xuan, Y. (2018). Experimental Investigation on Effects of Thermal Resistances on a Photovoltaic-Thermoelectric System Integrated with Phase Change Materials, *Energy*, 169, 172-185.
- [21] Karafil, A., Özbay, H. (2018). Design of Stand-Alone PV System on a Farm House in Bilecik City, Turkey, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(3), 909-916.
- [22] Gedik, E. (2016). Modül Sıcaklığının Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 19 (4), 569-576.
- [23] Ceylan, İ., Yılmaz, S., İnanç, Ö., Ergün, A., Gürel, A. E., Acar, B., & Aksu, A. İ. (2019). Determination of the Heat Transfer Coefficient of PV Panels. *Energy*, 175, 978-985.
- [24] Ceylan, İ., Gürel, A. E., & Ergün, A. (2017). The Mathematical Modeling of Concentrated Photovoltaic Module Temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(31), 19641-19653.
- [25] Ergün, A., Eyiç, H. (2019). Performance Assessment of Novel Photovoltaic Thermal System Using Nanoparticle in Phase Change Material. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29(4), 1490-1505.
- [26] Yang, X., Yu, J., Guo, Z., Jin, L., He, Y.L. (2019). Role of Porous Metal Foam on the Heat Transfer Enhancement for a Thermal Energy Storage Tube, *Applied Energy*, 239, 142-15.
- [27] Yang, X., Yu, J., Guo, Z., Jin, L., He, Y.L. (2019). Effect of Inclination on the Thermal Response of Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, *Applied Energy*, 238, 22-33.
- [28] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Enerji İstatistik Raporları, <https://www.eigm.gov.tr>, E.T. 07.08.2019.
- [29] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, <http://www.yegm.gov.tr>, E.T. 07.08.2019.

## Modelling of a Serial Hybrid Vehicle with HCCI Range Extender Engine

 Hamit SOLMAZ<sup>1</sup>  Tolga KOCAKULAK<sup>2,\*</sup> 
<sup>1</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> Mehmet Akif Ersoy University, Vocational High School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, Merkez/BURDUR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 05/01/2020

Revision: 13/03/2020

Accepted: 26/04/2020

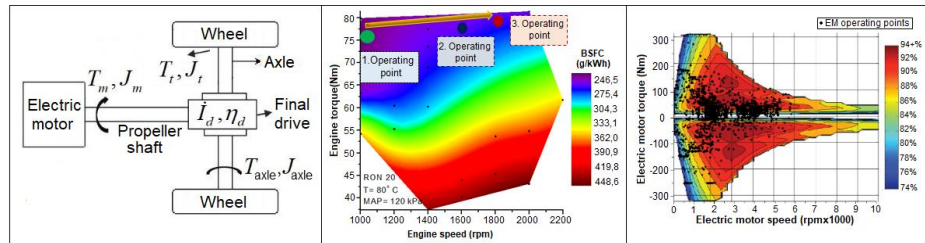
#### Highlights

- Serial Hybrid Vehicle
- Modelling
- Matlab-Simulink

#### Keywords

Serial Hybrid  
 Electric Vehicle  
 HCCI  
 Simulation  
 Range Extender

The serial hybrid vehicle using HCCI range extender engine consists of electric drive system and generator system. Figure A shows the vehicle power system, internal combustion engine and electrical engine maps operating on the principle of HCCI combustion.



**Figure A.** Serial hybrid vehicle power system shema, HCCI engine and electric motor maps used in the system

**Purpose:** In this study, it is aimed to create a model of a hybrid vehicle with HCCI range increasing engine, to examine the fuel consumption under different driving cycle conditions and to compare it with a conventional gasoline type vehicle. The saving values provided by the regenerative braking used on the serial hybrid vehicle were examined.

**Theory and Methods:** Serial hybrid vehicle model using HCCI range extender was created with the mathematical equations of vehicle system and subsystems in MATLAB / Simulink simulation program environment. As the internal combustion engine model used on the vehicle, the torque / speed / specific fuel consumption map of the engine operating with the HCCI combustion principle has been used. As the electric motor model, the torque / speed / efficiency map of the DC motor, which can produce maximum 320 Nm torque, is used. The generator system of the serial hybrid vehicle is provided by the thermostat control strategy. Vehicle throttle and brake pedal control was done with PID controls (Proportional, integral, derivative controller).

**Results:** Serial hybrid vehicle using HCCI range increasing engine has been provided to be used in different driving cycle conditions. In different driving cycle conditions, the fuel saving rates provided by the serial hybrid vehicle compared to a conventional vehicle. The electric motor efficiency of the serial hybrid vehicle was observed to vary between 76% and 95% at different speeds and power ratings. The effect of serial hybrid vehicle mass on fuel consumption was investigated. It is determined that if the vehicle is used with NEDC and US06 driving cycles with the increase of 500 kg of serial hybrid electric vehicle mass, there is a 1 liter increase in the amount of fuel consumed by the vehicle at 100 km. . Regenerative braking was more effective in urban use of the vehicle, and it was found to be compatible with the evaluations encountered in the literature. It has been observed that the state of battery charge performs charge and discharge processes among the targeted values.

**Conclusion:** The serial hybrid vehicle with HCCI engine has been found to fuel save 45.7% in ECE-15 fuel consumption, 2.7% in EUDC fuel consumption and 24.9% in NEDC fuel consumption compared to conventional gasoline vehicle. Using regenerative braking on the serial hybrid electric vehicle, it was determined that the vehicle saved 20.63% in ECE-15 condition, 12% in EUDC condition, 24.9% in NEDC condition and 16.34% in use in US06 condition.



## HCCI Menzil Arttırıcı Motor Kullanılan Seri Hibrit Bir Aracın Modellenmesi

Hamit SOLMAZ<sup>1</sup> Tolga KOCAKULAK<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Merkez/BURDUR

### Öz

Bu çalışmada, menzil arttırıcı olarak, homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motoru kullanılan seri hibrit bir elektrikli aracın modellenmesi yapılmıştır. Araca etki eden direnç kuvvetleri ile güç aktarma organları modeli, batarya ve enerji tüketim modeli, jeneratör modeli (GENSET) oluşturularak enerji tüketiminin ve üretiminin anlık olarak izlenebilmesine imkân sağlanmıştır. Elektrik motoru (EM) ve jeneratör modeli için iki farklı alternatif akım ile çalışan EM karakteristik eğrileri kullanılmıştır. Çalışmada maksimum 320 Nm tork üretebilen Remy markasına ait HVH250 model elektrik motorunun karakteristik özelliklerinden faydalanılmıştır. HCCI motorlar daha yüksek termik verim ve daha düşük NO<sub>x</sub> ve PM emisyonları ile çalışabilmektedirler. Bu nedenle içten yanmalı motorun modellenmesinde GM 2.0L Ecotec motorundan deneysel olarak elde edilen bir HCCI motor haritası kullanılmıştır. Modelin test edilmesi ve enerji tüketimlerinin belirlenmesinde Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) ve ABD Yüksek Hız Çevrimi (US06) kullanılmıştır. Günümüzde Türkiye’de kullanılmakta olan bir otomobil modelinin boyut, aerodinamik katsayı, ağırlık vb. teknik özellikleri simülasyon girdisi olarak kullanılmıştır. Bu konvansiyonel aracın yakıt tüketim değerleri ile seri hibrit elektrikli araç modellenmesinden elde edilen şehir içi, şehir dışı, ortalama ve yüksek hızlarda kullanımına ait yakıt tüketim değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. HCCI motor kullanılan seri hibrit elektrikli aracın, konvansiyonel araca göre, Avrupa Şehir İçi Sürüş çevrimi (ECE-15) koşulunda %45,7, Avrupa Şehir Dışı Sürüş Çevrimi (EUDC) koşulunda %2,7, karma hız eğrilerine sahip NEDC sürüş koşulunda ise %24,9 oranında yakıt tasarrufu sağladığı görülmüştür.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 05/01/2020*  
*Düzeltilme: 13/03/2020*  
*Kabul: 26/04/2020*

### Anahtar Kelimeler

*Seri Hibrit*  
*Elektrikli Taşıt*  
*HCCI*  
*Simülasyon*  
*Menzil Arttırıcı*

### Keywords

*Serial Hybrid*  
*Electric Vehicle*  
*HCCI*  
*Simulation*  
*Range Extender*

## Modelling of a Serial Hybrid Vehicle with HCCI Range Extender Engine

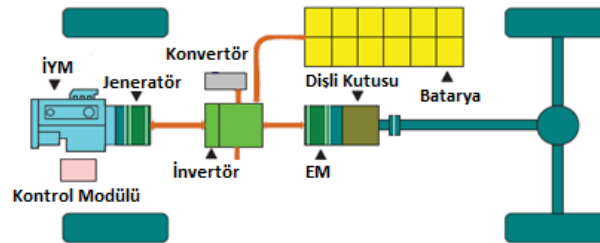
### Abstract

In this study, modelling of a serial hybrid electric car having homogenous charge compression ignition (HCCI) engine was conducted as a range extender. With the resistance forces acting on the vehicle, the powertrain model, battery and energy consumption model, generator model (GENSET) were created to allow instant monitoring of energy consumption and production. For electric motor (EM) and generator model, EM characteristic curves, which can operate with two different alternative currents, were used. In the study, the HVH250 electric motor of Remy brand, which can produce a maximum torque of 320 Nm, has been used. HCCI engines are capable to work with higher thermal efficiency and lower NO<sub>x</sub> and PM emissions. Therefore, an HCCI engine map, which was obtained experimentally by using GM 2.0 L Ecotec engine, was used for modelling of internal combustion engine (ICE). New European Driving Cycle (NEDC) and US High Speed Cycle (US06) were used to test the model and determine the energy consumption. Technical properties such as dimensions, aerodynamic properties, weight, and so on of a conventional car that currently on the road in Turkey were used as simulation inputs. Fuel consumption values of this conventional vehicle and the values obtained from the serial hybrid electric vehicle were compared in terms of fuel consumption at urban, suburban, average, and high-speed usage. It was determined that the serial hybrid electric vehicle with HCCI engine provided fuel saving of 45,7% at European urban driving cycle (ECE-15), 2,7% at european suburban driving cycle (EUDC), and 24,9% at NEDC driving condition with mixed speed curves by comparing to a conventional vehicle.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde çevre kirliliğinin artması, petrol rezervlerinin azalması ve enerji problemlerinin ortaya çıkması sebebi ile enerjide verimlilik ve enerji tasarrufu alanları önem kazanmıştır. Bununla birlikte geleceğin motorlu araçları için farklı çözüm arayışları başlamıştır. İçten yanmalı motorlar (İYM) ile çalışan geleneksel araçlar, petrol kaynaklı yakıtların yüksek enerji yoğunluğundan faydalanarak, iyi performans ve uzun çalışma menzili sağlamaktadırlar. Fakat bu araçlar, yüksek yakıt tüketimi ve çevre kirliliği gibi dezavantajlar barındırmaktadır [1]. Elektrikli araçlar ise, İYM ile tahrik edilen araçlara göre; düşük emisyon, daha sessiz çalışma, yüksek verim ve bakım maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlara sahiptir. Buna karşın ilk alım maliyetinin yüksek, şarj istasyonlarının yetersiz, batarya değişim maliyetlerinin yüksek, şarj çevrim ömürlerinin düşük, enerji yoğunluklarının az ve buna bağlı olarak araç menzilin düşük olması gibi dezavantajları bulunmaktadır [2]. Elektrikli araçların menzil sorunu, hibrit elektrikli araçların geliştirilmesi ile büyük oranda giderilmiştir. Hibrit elektrikli araçlar, İYM ve elektrik motoru ile çalışan araçların avantajlarına sahiptir ve bu araçların dezavantajlarını da en aza indirmektedir. Hibrit elektrikli araçlar hibritleşme derecesine ve yapılarına göre sınıflara ayrılmaktadır [3]. Hibrit elektrikli araçlar, hibritleşme derecesine göre tam, hafif ve mikro hibrit olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, araç üzerinde kullanılan elektrik motor gücünün, elektrik ve içten yanmalı motorların toplam gücüne oranlanması ile yapılmaktadır. Hibrit aracın hibritleşme oranı arttıkça araca ait konvansiyonel araç karakteristik özellikleri azalmakta ve elektrikli araç karakteristik özellikleri artmaktadır. Yapılarına göre sınıflandırmada İYM ile elektrik motorunun aktarma organları ile bağlantıları ve yerleşimi temel alınmaktadır. Hibrit araçlar, yapılarına göre seri, paralel ve seri-paralel şeklinde üç grupta incelenmektedir. Bu sistemlerde kullanılan kontrol stratejilerinde de farklılıklar bulunmaktadır [4]. Paralel hibrit yapılarda, araç tahriki elektrik motoru (EM) ve İYM ile yapılmaktadır. Paralel yapılarda araç tahrikinin İYM ile de gerçekleşmesi araçta transmisyon kullanma zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir. Paralel hibrit yapılarda tahrik İYM ve elektrik motoru arasında tork paylaşımı gerektirdiğinden kontrol işlemi seri hibrit yapılara göre kontrolü karmaşıktır. Ancak bu tork paylaşımının bir avantajı olarak seri hibrit yapılara göre daha küçük elektrik motoru kullanılabilir [5]. Seri-paralel hibrit elektrikli araçlar, hem seri hem de paralel hibrit elektrikli araçların avantajlı yönlerinin verimli bir şekilde kullanıldığı yapılardır [4].

Seri hibrit elektrikli araçların yapıları basittir ve tahrik gücü kolay kontrol edilebilmektedir. Düşük hacimli İYM kullanımı uygulanabilmektedir. Daha sessiz ve titreşimsiz olduklarından sürüş konforu daha yüksektir. İYM ile araç tahrik sistemi arasından bir bağlantı olmadığından rejeneratif frenleme en etkin şekilde kullanılabilir. Elektrik motorunun tork karakteristiğinin uygun olması nedeni ile vites kutusu kullanımına gerek kalmamaktadır. Kısmen düşük torca sahip elektrik motoru kullanılması durumunda daimi bir dişli oranı kullanılabilir [6]. Aracın duraklama ve bekleme süresince elektrik motoru enerji tüketmediğinden şehir içi kullanımda daha fazla yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Tekerlek içi (hub) motor kullanımı kolay bir şekilde uygulanabilmektedir [7].



Şekil 1. Seri hibrit elektrikli araç yapısı [4]

Seri hibrit elektrikli araçlar, elektrikli sürüş için tasarlanmıştır. Şekil 1'de seri hibrit bir aracın genel yapısı görülmektedir. Seri hibrit yapısının, İYM ile tekerlekler arasında hiçbir mekanik bağlantı bulunmaması, tüm yol yükü elektrik motoru tarafından karşılanmaktadır. Seri hibrit araçları elektrikli araçlardan ayıran tek fark, aracın elektrik enerjisinin karşılanması ve bataryaların şarj edilmesi için İYM ve jeneratör sisteminin bulunmasıdır. Batarya şarj oranı belirli bir seviyenin altına düştüğü zaman İYM çalışmakta ve jeneratöre hareket aktararak batarya şarj edilmektedir. Batarya istenilen şarj durumuna getirildikten sonra

İYM durmaktadır. Seri hibrit araçtaki içten yanmalı motorun yol yükünden bağımsız hale getirilmesi ile İYM'nin istenen noktalarda çalıştırılması sağlanabilmektedir [6].

Bulgu [1] tekerlek içi motorların kullanıldığı bir seri hibrit elektrikli aracı, MATLAB/Simulink ortamında modellemiş ve bu model üzerinde bulunan jeneratör sistemine (GENSET) aç-kapa kontrol stratejisi uygulamıştır. Aracın yakıt tüketimini, konvansiyonel araç, tek çekiş motorlu ve tekerlek içi motorlu seri hibrit araç için hesaplamıştır. ECE-15 sürüş çevrimi üzerinde, yakıt tüketim değeri konvansiyonel araç için 1088 mL, tek çekiş motorlu seri hibrit araç için 930,5 mL ve tekerlek içi motorlu araç için 896,6 mL olarak bulunmuştur. Alkan [8] Mercedes-Benz tarafından üretilen ve şehir içi alçak tabanlı otobüs olan Conecto'nun, ADVISOR simülasyon programı üzerinde konvansiyonel ve seri hibrit olarak modellenmesini yapmıştır. Simülasyonda şehir içi otobüsler için tasarlanmış olan "CBD14" sürüş çevrimini kullanmıştır. Seri hibrit sisteme dönüşüm sayesinde yakıt sarfiyatında konvansiyonel araca göre %27, egzoz emisyonlarında ise yaklaşık %50 oranında azalma görülmüştür. Otlu [10] AVL CRUISE simülasyon programında konvansiyonel ve seri hibrit aracın modellemesini yapmıştır. Simülasyon programında ECE-15, FTP-75 ve İstanbul seyir çevrimlerini kullanmıştır. Farklı araç tipi ve sürüş çevrimleri ile yakıt ve emisyon değerleri hesaplayıp karşılaştırılmasını yapmıştır. Konvansiyonel aracın seri hibrit elektrikli araca dönüşmesi sonucunda ortalama yakıt tüketim değerinde yaklaşık %50 azalma görülmüştür. Uyulan [11] seri hibrit elektrikli aracı MATLAB/Simulink simülasyon programı ortamında modellemiş ve bulanık mantık kural tabanlı güç yönetim algoritmasını geliştirmiştir. Farklı sürüş çevrimleri kullanılarak konvansiyonel araç ile seri hibrit aracın yakıt tüketimleri karşılaştırılmıştır. Seri hibrit araç yakıt tüketiminin, konvansiyonel araca göre; ECE-15 çevrimi için %9,5, EUDC çevrimi için %37,59 ve NEDC çevrimi için %27,38 oranında daha düşük olduğu saptanmıştır. Hofman ve Dai [12] elektrikli araçlar verim analizi ve farklı tipteki vites kutularının enerji tüketimini incelemek amacı ile elektrikli araç modeli oluşturmuştur. Model üzerinde Volkswagen firmasına ait "Lupo 3L" aracına ait parametreler, NEDC ve FTP-75 sürüş çevrimleri kullanılmıştır. Elektrik aracı güç aktarma organları üzerinde sabit dişli sistemi, manuel vites kutusu ve CVT vites kutusu kullanıldığı durumları incelemiştir. NEDC ve FTP75 sürüş çevrimi ile sabit dişli, manuel ve CVT güç aktarma organları karşılaştırılmış ve en az enerji tüketimi sabit dişli kullanımında sağlandığı görülmüştür. Pacheco vd. [13] HCCI motorların kullanılma sebeplerini anlatmıştır. Bir araç simülasyon programı ile üzerinde HCCI ve benzin motor kullanılan otomobil sınıfı bir araç için NEDC sürüş çevrimi referansı ile yakıt tüketim ve emisyon sonuçları elde edilmiştir. Simülasyon sonucuna göre araç üzerinde benzin motor kullanımı yerine HCCI motor kullanılması ile yakıt tüketiminde %21 azalma sağlanmaktadır. Yakıt tüketimi yanı sıra  $\text{No}_x$  gazı salınımında %53, CO salınımında %30,  $\text{CO}_2$  salınımında %21 azalma görülmektedir. HCCI motor kullanımının tüm bu avantajlarının yanında, HC salınımında %5 oranında bir artış görülmektedir. Sonuç olarak araç üzerinde HCCI motor kullanımının yakıt tüketimi ve egzoz gaz emisyonları bakımından avantajlı olduğu görülmüştür. Lv vd.[14] taşıt üzerinde rejeneratif frenlemenin taşıt menziline etkisini incelemiştir. Enerji verimliliğini arttırmak için yaptıkları çalışmalar tanıtılmıştır. Seri hibrit araç ve paralel hibrit araç için şasi dinamometresi üzerinde NEDC sürüş çevrimi referansı ile deney yapılmıştır. Deney sonucunda rejeneratif frenleme seri hibrit araç üzerinde, paralel hibrit araca göre daha etkili kullanıldığı saptanmıştır. NEDC sürüş çevrimi şartlarında rejeneratif frenlemenin, seri hibrit elektrikli araç üzerinde oluşturduğu yakıt tasarrufu, paralel hibrit elektrikli araç üzerinde oluşturduğu yakıt tasarrufundan %27,28 daha fazla olduğu saptanmıştır. Solouk, Solmaz vd. [15] optimum yakıt ekonomisini gözlemleyebilmek için LTC (Düşük Sıcaklık ile Yanmalı), çoklu mod (Konvansiyonel SI ve HCCI) kullanıma uygun 2 litrelik bir motora sahip seri hibrit aracı temsil eden bir test düzeneği üzerinde deney yapmışlardır. Deney sonucunda SI ve HCCI modda tüketilen yakıt saptanmış ve sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. 2 litrelik LTC motorun SI modda kullanım yerine HCCI modda kullanım %12 yakıt tasarrufu sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmada seri hibrit bir elektrikli taşıt modellemesi yapılmıştır. Seri hibrit araçta kullanılan içten yanmalı motor olarak, düşük emisyon ve yüksek termik verim gibi özelliklere sahip olan homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli modda çalışan bir motor seçilmiştir. Araç parametreleri piyasada kullanılmakta olan sedan bir araçtan referans alınmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen veriler, standart aracın katalog yakıt tüketim değerleri ile karşılaştırılarak yakıt tasarruf oranları belirlenmiştir.

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

### 2.1. Menzil Arttırıcı İçten Yanmalı Motor ve Kontrolü (Range Extender Internal Combustion Engine and Control)

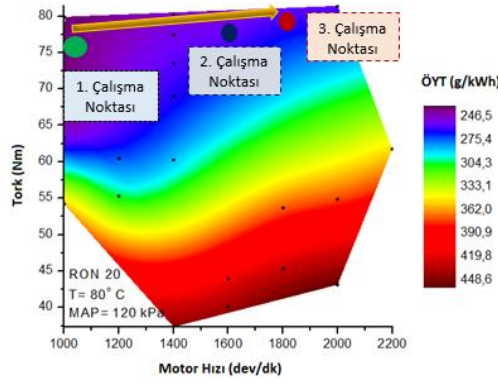
Hibrit araca ait menzil arttırıcı jeneratör sistemi üzerinde, fosil yakıt ile mekanik enerji üretilmesi İYM tarafından sağlanmakta ve jeneratör sisteminde elektrikli üretimi gerçekleşmektedir. Bu amaçla kullanılan İYM, “menzil arttırıcı İYM” olarak adlandırılmaktadır. Hibrit araçlar üzerinde kullanılan İYM’a ait en önemli kriterler, enerji verimliliği ve emisyon değerleridir. Hibrit araç üzerinde bu kriterler, yüksek hacimli ve farklı yanma prensipleri ile çalışan içten yanmalı motorların kullanılması ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, seri hibrit elektrikli araç üzerinde jeneratörün tahrik sağlaması amacı ile HCCI yanma prensibi ile çalışan İYM kullanılmıştır. HCCI motor kullanılmasının amacı, dizel ve benzinli motorlara göre termik veriminin yüksek ve zararlı gaz salınımının düşük olmasıdır [16]. HCCI yanma modunda dolgu silindir içerisinde veya emme portunda hazırlanarak, herhangi bir kısılmaya uğratılmadan direk olarak silindir içerisine gönderilmektedir. Silindir içerisinde bulunan homejen dolgunun sıkıştırılması ile birçok bölgede eş zamanlı yanma gerçekleşmektedir. Bu yanma sonucunda yanma odasında oluşan yüksek sıcaklık bölgeleri kaldırılmakta ve is partiküllerinin oluşumu engellenmektedir [17].

HCCI motora ait çalışma haritası, benzinli GM Ecotec 2.0 L Turbo motoru kullanılarak elde edilmiştir. Motora ait teknik özellikler tablo 1’de verilmiştir. Motorun HCCI modunda çalıştırılabilmesi için motor kontrol ünitesi devre dışı bırakılmış ve tüm motor kontrolü dSPACE MicroAutoBox ve RapidPro kontrol ekipmanları ile Matlab/Simulink üzerinden gerçekleştirilmiştir. Motorun direkt enjeksiyon sistemi yerine homojen karışım oluşumunu garanti edebilmek amacıyla emme manifoldu üzerinde sekiz adet yakıt enjektörü yerleştirilmiştir. Simulink arayüzü ile kontrolü gerçekleştirilen PFI enjektörlerden dördü izooktan diğer dördü ise n-heptan püskürtecek şekilde tasarlanmış ve böylece enjektörlerin pulse genişliğini değiştirerek istenilen oktan sayısındaki yakıt silindire püskürtülebilmesi mümkün hale getirilmiştir. Bu çalışmada yakıtın araştırma oktan sayısı 20 olacak şekilde, hacimsel olarak %20 2,2,4 Trimetilpentan ve % 80 n-heptan enjektörler tarafından motorun farklı hız ve yük durumuna göre istenilen miktarda püskürtülmüştür. Emme havası giriş sıcaklığı 80 C° ve emme manifoldu basıncı 120 kPa olarak tüm hız ve yük koşullarında sabit tutulmuştur. Deneyler Michigan Teknoloji Üniversitesi Enerji Mekatroniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** GM Ecotec 2.0L Turbo motorun teknik özellikleri

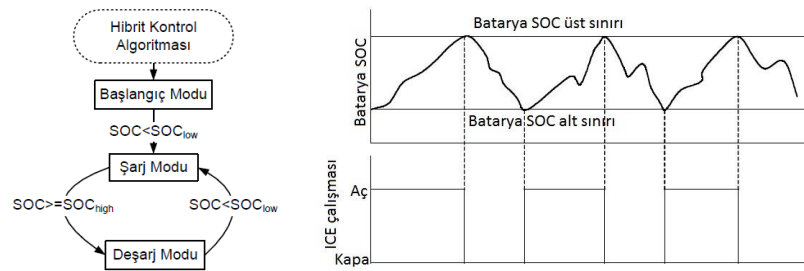
|                                   |         |                                     |                                  |
|-----------------------------------|---------|-------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Silindir çapı x strok [mm]</b> | 86 x 86 | <b>Maksimum güç[kW @5300 d/d]</b>   | 164                              |
| <b>Silindir sayısı</b>            | 4       | <b>Maksimum tork [Nm @2400 d/d]</b> | 353                              |
| <b>Silindir hacmi [cc]</b>        | 1998    | <b>Yakıt enjeksiyon sistemi</b>     | Benzinli direkt                  |
| <b>Sıkıştırma oranı [mm]</b>      | 9.2:1   | <b>Supap sistemi</b>                | 4 supaplı, üstten çift eksantrik |
| <b>Biyel kolu uzunluğu [mm]</b>   | 145.5   | <b>Supap lifti [mm]</b>             | 10.3                             |

Şekil 2’de HCCI modunda çalıştırılan motorun ÖYT (özgül yakıt tüketimi) haritası görülmektedir. HCCI motorlarda motor çalışma aralığı vuru ve tekleme sınırları nedeniyle daralmaktadır. Haritada motor yükü bakımından üst sınır vuru sınırını ifade ederken alt sınır tekleme sınırınıdır. Motorun maksimum devri de yine tekleme nedeniyle sınırlanmaktadır. Şekil 2 incelendiğinde motorun 1000-2200 rpm aralığında 40-80 Nm’lik bir tork aralığına sahip bir çalışma alanının olduğu görülmektedir. Seri hibrit elektrikli araca uygulanabilmesi için harita üzerinde özgül yakıt tüketimi en düşük olan üç nokta motorun çalışma noktaları olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. HCCI motorun özgül yakıt tüketimi haritası

İYM'nin çalışma koşulları, jeneratör sistemi kontrol stratejisi ile doğrudan bağlantılıdır. Jeneratör sisteminin kontrolü için maksimum şarj durum kontrol stratejisi ve aç kapa kontrol stratejisi olmak üzere iki farklı yöntem uygulanabilmektedir. Maksimum batarya şarj durumu (SOC) kontrol stratejisinde ana hedef, bataryaların doluluk oranını mümkün olan en yüksek seviyede tutmaktır. İtten yanmalı motorun sürekli çalıştırılması motorun verimsiz olduğu bölgelerde de kullanılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle İYM'nin sürekli çalıştırılması yerine aç-kapa kontrolü gerçekleştirmek daha uygun olmaktadır [6]. Şekil 3'te aç-kapa strateji algoritması ve batarya SOC değişimi görülmektedir.



Şekil 3. Kontrol algoritması genel akış şeması [9], Kontrol stratejisinin gösterilimi [6]

Bu çalışmada kullanılan HCCI motor aç-kapa stratejisi ile kontrol edilmiştir. HCCI motor sabit üç farklı tork ve devir noktasında çalıştırılmaktadır. Güç ihtiyacı arttıkça HCCI motorun çalışma noktası 1 noktasından 2 ve 3 noktalarına doğru kaydırılmaktadır. Bu çalışma noktaları belirlenirken aracın ihtiyaç duyduğu enerji miktarı dikkate alınmıştır. Araç bataryasının şarj durumu %60 seviyesine geldiğinde HCCI motor devreye girmekte ve birinci kademedeki çalıştırılmaktadır. Enerji tüketiminin daha fazla olduğu durumlarda ise HCCI motorunun birinci kademedeki ürettiği güç bataryanın yeteri kadar şarj olmasını sağlamadığı için batarya şarj seviyesi %60 oranının altına düşmektedir. Bu durumda HCCI motor ikinci kademedeki çalıştırılarak daha fazla güç üretmektedir. Batarya şarj durumunun %40 oranının altına düştüğü durumda İYM üçüncü kademedeki çalıştırılarak batarya şarjının istenen seviyede tutulması sağlanmaktadır. HCCI motorun birinci, ikinci ve üçüncü çalışma noktalarında ÖYT sırasıyla 237, 256 ve 265 g/kWh, Tork değeri sırasıyla 76, 77 ve 79 Nm, hız değeri ise sırasıyla 1000, 1400 ve 1800 dev/dk olarak belirlenmiştir.

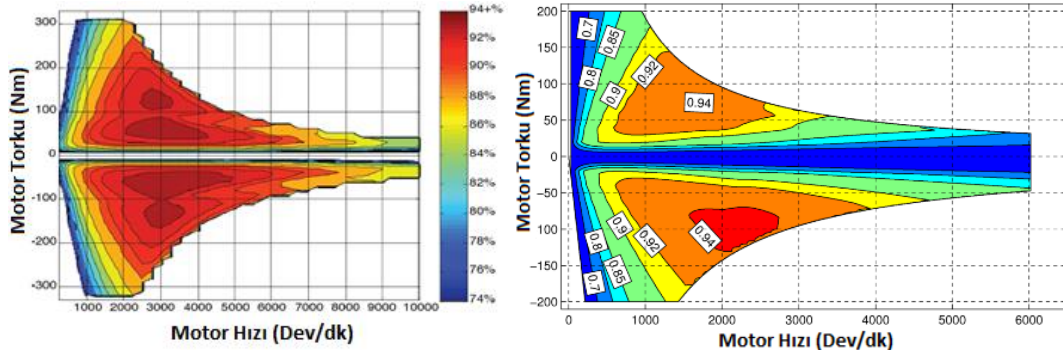
## 2.2. Elektrik Motoru ve Jeneratör Modeli (Electric Motor and Generator Model)

Bu modelde, maksimum 320 Nm tork üretebilen REMY markasına ait "HVH250" model elektrik motoruna ait haritalar kullanılmıştır. Elektrik motoru seçiminde motor veriminin yüksekliğine ve motor torkunun araç için uygunluğuna dikkat edilmiştir. Çalışmada kullanılan elektrik motorunun tork ve verim haritası Şekil 4'de görülmektedir. Elektrik motorunun karakteristik özelliğinin uygunluğundan dolayı, araçta vites kutusu kullanımına gerek kalmamaktadır [18].

EM Simulink modelinde, EM modeline girdisi sağlanan motor hızı bilgisi doğrultusunda, EM'nin o anki hızı için üretebileceği maksimum tork belirlenmektedir. Belirlenen maksimum tork, gaz ve fren pedalı ile kontrol edilerek araç güç aktarma organlarına iletilmektedir. EM modeline motor tork ve hız girdisi sağlanarak, motorun o anki tork ve devri için verimi belirlenmektedir.



Seri hibrit araç üzerinde kullanılan jeneratör, İYM'nin çalışması ile tahrik edilerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Yapılan modellemede jeneratör olarak alternatif akım motoru kullanılmıştır. Simülasyonda jeneratör olarak kullanılan elektrik motorunu temsil eden daha önceki çalışmalarda elde edilerek literatüre geçen elektrik motorlarına ait tork ve verim haritası Şekil 4'de görülmektedir.

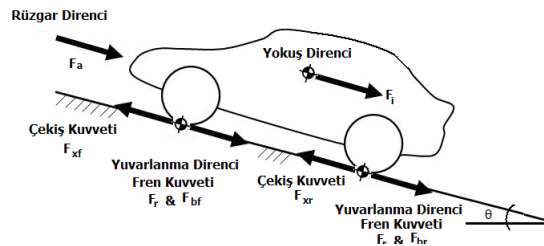


Şekil 4. Elektrik motoru verim haritası [19], Jeneratör verim ve karakteristik eğrisi [20]

Konvansiyonel araçlarda, frenleme esnasında, aracın hareketinden kaynaklı üzerinde taşıdığı kinetik enerji ısı enerjisine çevrilerek atmosfere atılmakta olup büyük enerji kayıpları oluşmaktadır [21]. Hibrit ve elektrikli araçlarda enerji kayıplarının en aza indirilmesi için, rejeneratif frenleme geliştirilmiştir. Rejeneratif frenleme hibrit ve elektrikli araçlarda ciddi verim artışları sağlamaktadır. Rejeneratif frenleme, seri hibrit elektrikli araçlarda paralel hibrit elektrikli araçlara göre daha etkili kullanılmaktadır [22]. Bu çalışmada aracın frenlemesi rejeneratif ve mekanik frenler ile gerçekleşmektedir. Frenleme süresince aracın yavaşlaması için gerekli olan fren gücü maksimum seviyede rejeneratif frenleme ile bataryaya elektrik enerjisi olarak kazanımı sağlanmaktadır. Fren gücünün, rejeneratif frenleme gücünü aştığı durumlarda ise mekanik fren devreye girerek araç hızının istenilen seviyeye düşürülmesi sağlanmaktadır.

### 2.3. Doğrusal Araç Dinamiği (Longitudinal Vehicle Dynamics)

Seri hibrit aracın modellenebilmesi için güç aktarma organları ve direnç kuvvetlerini içeren doğrusal araç dinamiği modeli oluşturulmuştur. Araç hareketi esnasında, aracın hareketine ters yönde, çeşitli faktörlerden dolayı direnç kuvvetleri oluşmaktadır. Aracın etkisi altında olduğu direnç kuvvetleri yuvarlanma, aerodinamik, yokuş ve ivmelenme dirençleri olmak üzere dört çeşittir [23]. Şekil 5'de bir araca etki eden direnç kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 5. Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri [23]

Araca etki eden direnç kuvvetlerinden olan yuvarlanma direnci,

$$F_r = mgC_r \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada  $C_r$ , yuvarlanma direnç katsayısını ifade etmektedir. Araca etki eden aerodinamik direnç,

$$F_a = 0.5\rho C_d A_f V^2 \quad (2)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. İvmelenme direnci ise,

$$F_i = ma \quad (3)$$

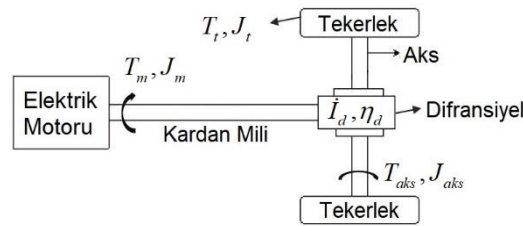
ifadesi ile belirlenebilir. Bu çalışmada araca etki eden toplam direnç kuvveti,

$$F_{Load} = F_i + F_a + F_r \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanan yuvarlanma, aerodinamik ve ivme dirençlerinin toplamından oluşmaktadır.

Araç güç aktarma sistemi motorda üretilen gücün tekerlere iletilmesini sağlayan sistemdir. Araç güç aktarma sisteminin blok şeması şekil 6'da görülmektedir. Modelde değişken parametre olarak EM torku tanımlanmaktadır. Elektrik motorundan alınan tork gaz pedalı ile kontrol edilerek araç güç aktarma sistemine uygulanmaktadır. Araç doğrusal hızının hesaplanabilmesi için teker hızının, teker hızının hesaplanabilmesi için ise güç aktarma organları hızının bilinmesi gerekmektedir. Motor çıkış mil hızının hesaplanması için güç aktarma sisteminin transfer fonksiyonunun çıkarılması gerekmektedir.

Dönme hareketi yapan parçaların kütlelerinden dolayı atalet kuvveti oluşmaktadır. Bir mile etkiyen net torkun, mil atalet momentine oranlanması ile milin açısal ivmesi bulunmaktadır. Açısal ivmenin zamana göre integrali alınarak milin açısal hız bulunmaktadır. Transfer fonksiyonu bir mil için bu kadar kolay hesaplanmaktadır fakat bir sistem için hesaplanmak istendiğinde karmaşık durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu karmaşık durumların ortaya çıkmasının en büyük sebebi güç aktarma sisteminde bulunan döner elemanların birçoğunun farklı atalet momentlerine sahip olması ve redüksiyona uğratıldıkları için farklı hızlarda dönmeleridir.



Şekil 6. Güç aktarma sisteminin şematik gösterimi

Modeli yapılan seri hibrit elektrikli araç için güç aktarma sistemi kardan mili, diferansiyel ve akslardan oluşmaktadır. Transfer fonksiyon hesabında kardan mili motora direk bağlı olduğu için atalet momentleri, motor atalet momentini olarak alınmaktadır. Güç aktarma sisteminde diferansiyelin sağ ve solunda olmak üzere iki tane aks ve dört teker bulunmaktadır. Bir mile ait açısal ivme, tork ve atalet momentleri ilişkisi;

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_{net}}{J_{toplam}} \quad (5)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Burada  $T_{net}$  mile etkiyen net torku,  $J_{toplam}$  milin toplam atalet momentini,  $d\omega/dt$  ise açısal ivmeyi belirtmektedir. Motorda üretilen torkun, diferansiyel giriş ve çıkış, aks ve teker üzerinde oluşturduğu tork hesaplanır. Eşitlik 6'da verilen denklemlerde bulunan kısaltmalardan  $T_{dg}$  diferansiyel giriş torku,  $T_{dc}$  diferansiyel çıkış torku,  $T_a$  akslara etkiyen torku,  $T_t$  ise tekerlerin yola uyguladığı torku tanımlanmaktadır.

$$T_{dg} = T_m - J_m \dot{\omega}_m \quad (6)$$

$$T_{dc} = T_{dg} i_d \eta_d \quad (7)$$

$$T_a = T_{dc} - 2J_a \dot{\omega}_a \quad (8)$$

$$T_{dc} = T_a + 2J_a \dot{\omega}_a \quad (9)$$

$$T_t = T_a - 4J_t \dot{\omega}_t \quad (10)$$

$$T_a = T_t + 4J_t \dot{\omega}_t \quad (11)$$

Motor torku ve tekerlerde oluşan direnç torku yalnız bırakılıp net tork hesaplanacaktır. Motor tarafından üretilen tork 5 numaralı eşitlikte bulunan denklemden çekilerek 12 numaralı eşitlik elde edilmiştir.

$$T_m = T_{dg} + J_m \dot{\omega}_m \quad (12)$$

$$T_m = T_{dç} / (i_d \eta_d) + J_m \dot{\omega}_m \quad (13)$$

$$T_m = (T_a + 2J_a \dot{\omega}_a) / (i_d \eta_d) + J_m \dot{\omega}_m \quad (14)$$

$$T_m = (T_t + 4J_t \dot{\omega}_t + 2J_a \dot{\omega}_a) / (i_d \eta_d) + J_m \dot{\omega}_m \quad (15)$$

$\dot{\omega}_{dç} = \dot{\omega}_a = \dot{\omega}_t = \dot{\omega}_m / i_d$  ve  $T_t = T_{yük}$  eşitlikleri bilinmektedir. Bu eşitlikler 15 numaralı denklemde yerine konularak, 16 numaralı denklem elde edilmiştir.

$$T_m = T_{yük} / (i_d \eta_d) + (4J_t + 2J_a) \dot{\omega}_m / (i_d^2 \eta_d) + J_m \dot{\omega}_m \quad (16)$$

Şekil 6'da görülen sistem için motordan başlanılarak her bir hareketli eleman için eşitlik 5'e verilen ilişki uygulanarak hareket iletim fonksiyonu,

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_m - T_{yük} / (i_d \eta_d)}{(4J_t + 2J_a) / (i_d^2 \eta_d) + J_m} \quad (17)$$

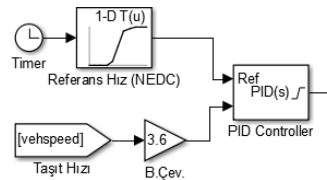
Şeklinde tanımlanabilir. Bu eşitlik motor çıkış milinin açılma ivmesini vermektedir. Burada  $T_m$  ve  $T_{yük}$  motor momenti ile tekerlekler etki eden toplam yükü ifade etmektedir.  $J_m$  motor ve kardan mili kütle atalet momentini,  $J_t$  ve  $J_a$  ise tekerleklerin ve aksların kütle atalet momentlerini ifade etmektedir.  $i_d$  diferansiyel dişli oranını tanımlarken,  $\eta_d$  diferansiyel mekanik verimini tanımlamaktadır. Motor çıkış mili açılma ivmesinin integrali alınarak motor çıkış milinin açılma hızı eşitlik 18'deki gibi bulunmaktadır.

$$\omega_m = \int_t \frac{T_m - T_{yük} / (i_d \eta_d)}{(4J_t + 2J_a) / (i_d^2 \eta_d) + J_m} dt \quad (18)$$

Son eşitlikte yer alan tekerlek yükü, direnç kuvvetleri modeli ile belirlenmektedir. Güç aktarma sisteminin hareket iletim fonksiyonu kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında seri hibrit elektrikli aracın dinamik modeli oluşturulmuştur. Bu modelde elektrik motoru ve direnç kuvvetleri tarafından güç aktarma sistemine uygulanan tork, elektrik motor verimi, güç aktarma organlarının atalet momentleri girdi olarak alınmaktadır. Araç dinamiği Simulink modelinde elektrik motoru gücü, aracın ivmesi, hızı ve aldığı yol anlık olarak hesaplanabilmektedir.

#### 2.4. Sürüş Çevrimleri ve Hız Kontrol Modeli (Driving Cycles and Speed Control Model)

Sürüş çevrimleri, taşıtların egzoz emisyonları ve yakıt tüketimlerinin hesaplaması için kullanılan hız zaman grafikleridir. Sürüş çevrimleri kısıtlı bir zaman aralığında söz konusu taşıt tipi ve bölge için geçerli olan gerçek sürüş veri sonuçlarını en iyi şekilde temsil etmelidir [24]. Simülasyonda NEDC ve US06 sürüş çevrimi kullanılmıştır. NEDC ve US06 sürüş çevrimlerinin hız zaman grafikleri sonuçlar kısmında bulunmaktadır. Seri hibrit araç hızını, modele referans olarak girdisi sağlanan sürüş çevrim hızı belirlemektedir. Seri hibrit elektrikli aracın hız kontrol sistemi Simulink modeli Şekil 7'de görülmektedir.



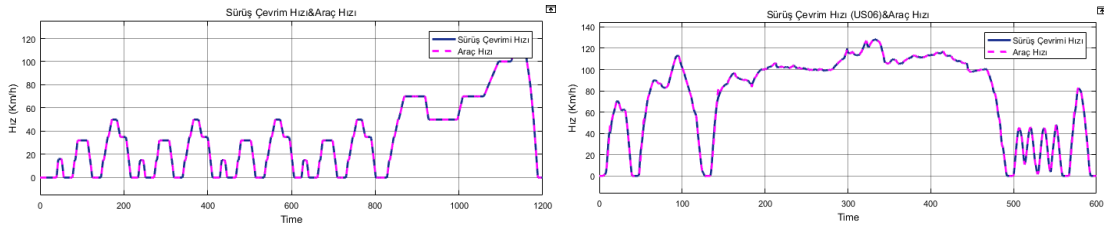
Şekil 7. Hız kontrol sistemi Simulink modeli

Seri hibrit elektrikli aracın hız kontrolü gaz ve fren pedal konumlarının kontrolü ile yapılmaktadır. Gaz ve fren pedalının konumu ise PID (oransal, integral, türevsel kontrolcü) kontrol yöntemi ile belirlenmektedir. PID kontrol yöntemi, sistem üzerinde uygulaması kolay ve maliyetinin düşük olması sebebiyle endüstriyel alanlarda ve birçok sektörde yaygın olarak kullanımı görülmektedir. PID kontrol yönteminin uygulamaya konulması için, Matlab/Simulink ortamında kullanıma hazır bloğu bulunmaktadır [25]. PID kontroller, araç

hızının, referans hızı takip etmesi için gerekli olan gaz ve fren pedal konumunu ayarlamaktadır. PID kontroller araç hızını referans hıza ulaştırabilmek amacı ile 0 ile 1 arasında gaz pedal konumu sinyali üretmektedir. Araç hızının referans hıza göre yüksek olduğu durumlarda ise 0 ile -1 arasında fren pedal değerleri üreterek araç hızının gerekli değere düşmesini sağlamaktadır. Gaz ve fren pedal konumlarının kontrolü lineer olarak yapılmaktadır.

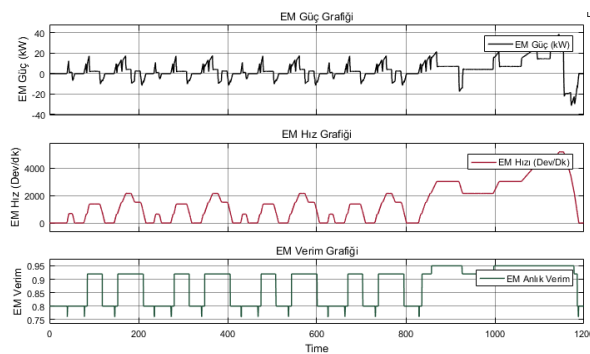
### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada, HCCI menzil arttırıcı motor kullanılan seri hibrit elektrikli araç modeline ait simülasyon sonuçları ve grafikleri elde edilmiştir. Grafikler seri hibrit elektrikli aracın kullanım hızlarını temsil ettiği, farklı sürüş çevrimlerinin kullanılması ile oluşturulmuştur. Aynı zamanda simülasyon sonuçlarının daha açık şekilde görülmesi amaçlanarak, araç bir sürüş çevrimi ile birden fazla tekrarda sürüldüğü durumlarda bulunmaktadır. Grafikler ile simülasyon sonuçları anlık olarak izlenmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Araç hızını temsilen, simülasyon girdisi olarak şehir içi ve şehir dışı sürüş çevrimini kapsayan NEDC ve aracın yüksek hızlarda kullanımını temsil eden US06 kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarının doğru değerlendirilebilmesi için modeli oluşturulan aracın sürüş çevrimlerini takip etmesi gerekmektedir. Şekil 8’de NEDC ve US06 Sürüş çevrim hızları ile araç hızının karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda modellenen aracın her iki sürüş çevrimini de takip ettiği görülmektedir.



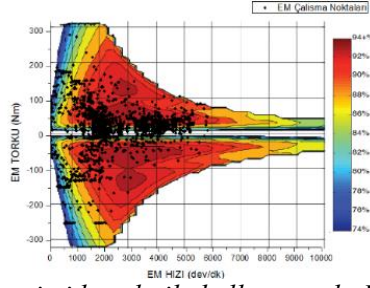
Şekil 8. NEDC ve US06 sürüş çevrim hızları ile araç hızının karşılaştırılması

Aracın NEDC sürüş çevrimi ile sürüldüğü durumda, araca tahrik sağlayan elektrik motorunun güç, hız ve verim grafikleri Şekil 9’da görülmektedir. Elektrik motoru gücü yaklaşık olarak 39 kW değerlerine ulaşmaktadır. Yakıt tüketiminin en aza indirgenebilmesi amacı ile elektrik motoru en verimli noktalarda çalıştırılmak istenmektedir. Elektrik motoru farklı devir ve güç değerlerinde verimi %76 ile %95 arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir.



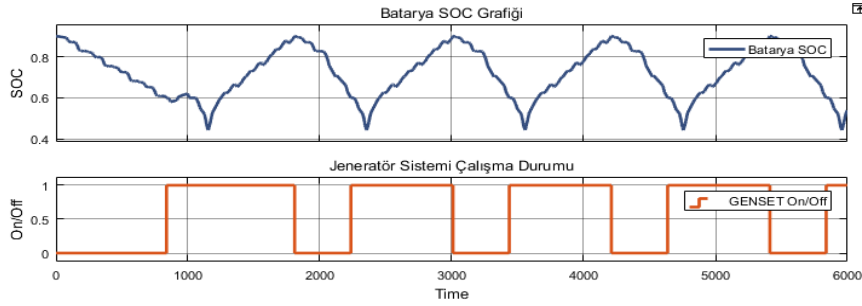
Şekil 9. Aracın NEDC sürüş çevrimi ile sürüldüğü durumda EM güç, hız ve verim grafikleri

Araç tahrikini sağlayan elektrik motoru, aracın tork ihtiyacına göre maksimum üretebileceği ve frenleyebileceği tork sınırları içinde çalışabilmektedir. Şekil 10’da aracın US06 sürüş çevrimi ile sürüldüğü durumda, elektrik motorunun çalışma noktaları görülmektedir. Araçta vites kutusu kullanılmamasına rağmen elektrik motorunun verimli bölgelerde çalıştırılabildiği görülmektedir.



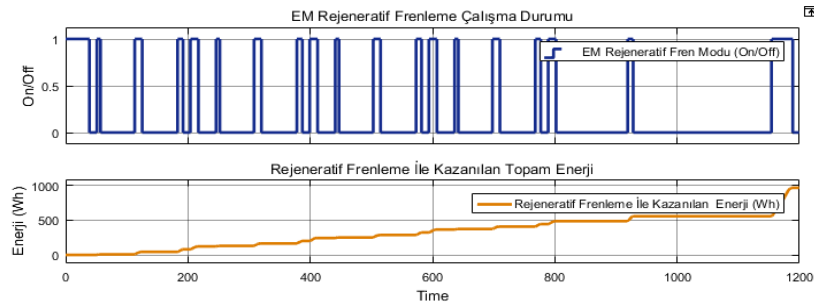
**Şekil 10.** Aracın US06 sürüş çevrimi koşulu ile kullanımında EM'nin çalışma verim noktaları

Seri hibrit elektrikli araç modelinde jeneratör sistemi kontrolü aç-kapa stratejisi ile kontrol edilmiştir. Aracın NEDC sürüş çevrimi ile beş defa sürülmesi sonucu, batarya şarj durumu ve içten yanmalı motorun çalışma durumu Şekil 11'de görülmektedir. Aracın NEDC sürüş çevrimi ile sürüldüğü şartlarda, batarya şarj durumu % 40 değerinin altına düşmediği görülmektedir. HCCI motorun birinci ve ikinci kademelerde çalıştığı, üçüncü kademede çalışmasına gereksinim duyulmadığı sonucuna varılmıştır. Şekil 11'de sürüş çevrimi 1000 s civarına yaklaşırken batarya şarj durumunun % 60'ın altına indiği görülmektedir. Bu durumda HCCI motor ikinci kademede çalıştırılarak batarya kapasitesi arttırılmaya çalışılmıştır. Ancak NEDC sürüş çevriminin son kısmı yüksek hızlar içerdiğinden enerji tüketimi sürüş çevriminin bu bölgelerinde daha yüksektir. Bu nedenle bir süre sonra SOC hızla azalmaya başlamıştır ancak % 40'ın altına inmemesi nedeniyle HCCI motor üçüncü kademe çalışma noktasına geçmemiştir.



**Şekil 11.** SOC değişimi ve jeneratör sisteminin çalışma durumu

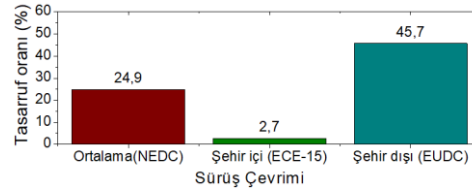
Araç elektrik motorunun rejeneratif mod ile çalıştığı durum ve rejeneratif frenleme ile geri kazanılan enerji miktarı Şekil 12'de görülmektedir. Aracın NEDC sürüş çevrimi ile bir defa sürülmesi ile rejeneratif frenleme sayesinde yaklaşık olarak 1 kWh enerji kazanımı olduğu saptanmıştır. Sürüş çevriminin ilk bölgelerinde daha fazla olan hızlanma ve yavaşlamalar bu bölgelerde rejeneratif geri kazanımın daha fazla olmasına sebep olmuştur. Bu nedenle şehir içi kullanımda rejeneratif frenleme önemli bir enerji geri kazanımı sağlamaktadır.



**Şekil 12.** Rejeneratif frenlemenin etkin olduğu durum ve EM tarafından üretilen enerji grafiği

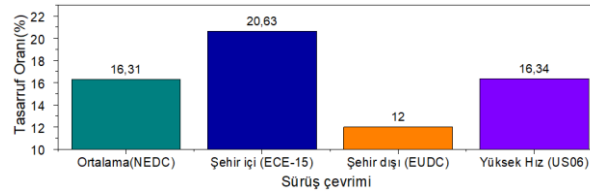
Konvansiyonel aracın seri hibrit elektrikli araca dönüşümü sonrasındaki yakıt tüketim değerleri simülasyon yardımı ile hesaplanmıştır. Bu konvansiyonel aracın yakıt tüketim değerleri ile seri hibrit elektrikli araca dönüşümü sonrasındaki şehir içi, şehir dışı, ortalama ve yüksek hızlarda kullanımına ait yakıt tüketim değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 13'te bu karşılaştırma görülmektedir. HCCI motor

kullanılan seri hibrit elektrikli aracın, konvansiyonel araca göre ECE-15 koşulunda %45,7, EUDC koşulunda %2,7 ve NEDC koşulunda ise %24,9 oranında tasarruf sağladığı görülmüştür. Yakıt tüketim oranlarında sağlanan bu iyileşme HCCI motorun yüksek verimliliği ve rejeneratif frenleme sonucu elde edilen enerji geri kazanımından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 13.** Benzinli tip aracın seri hibrit elektrikli araç dönüşümü sonucu yakıt tasarruf oranı

Seri hibrit elektrikli araç rejeneratif frenlemenin araç yakıt tüketimine etkisi Şekil 14’de görülmektedir. Seri hibrit elektrikli araç üzerinde rejeneratif frenlemenin kullanılması ile aracın ECE-15 koşulunda %20,63, EUDC koşulunda %12, NEDC koşulunda %24,9 ve US06 koşulunda kullanımında ise %16,34 oranında yakıt tasarrufu sağladığı belirlenmiştir.



**Şekil 14.** Seri hibrit elektrikli araç üzerinde rejeneratif fren kullanımının yakıt tasarrufuna etkisi

Bununla birlikte seri hibrit elektrikli araç kütlelerinin 500 kg artması ile aracın NEDC ve US06 sürüş çevrimleri ile kullanılması durumunda, aracın 100 km’de tükettiği yakıt miktarında 1 litrelik artış olduğu belirlenmiştir. Aerodinamik direnç katsayısının 0,5 artması ile aracın 100 km’de tükettiği yakıt miktarında, aracın NEDC sürüş çevrimi ile kullanılması durumunda 0,1 litrelik, aracın US06 sürüş çevrimi ile kullanılması durumunda ise 0,25 litrelik artış olduğu tespit edilmiştir. Yuvarlanma direnç katsayısının 0,05 artması ile aracın 100 km’de tükettiği yakıt miktarında, aracın NEDC sürüş çevrimi ile kullanılması durumunda 0,8 litrelik, aracın US06 sürüş çevrimi ile kullanılması durumunda ise 0,33 litrelik artış olduğu belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada menzil arttırıcı olan HCCI bir motor kullanan seri hibrit bir elektrikli taşıtın modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Araç modeli olarak piyasada kullanılmakta olan bir taşıtın özellikleri kullanılmış ve bu aracın seri hibrit elektrikli bir taşıt olması durumundaki yakıt tüketim değerleri belirlenerek konvansiyonel aracın katalog değerleri ile kıyaslanmıştır. Seri hibrit aracın modellenebilmesi için araca etki eden direnç kuvvetleri ve hareketli elemanların kütle atalet momentleri dikkate alınarak dinamik bir model kurulmuştur.

HCCI motor kontrolü olarak aç-kapa stratejisi kullanılan çalışmada konvansiyonel araca göre, ECE-15 yakıt tüketiminde %45,7, EUDC yakıt tüketiminde %2,7, NEDC yakıt tüketiminde ise %24,9 oranında tasarruf sağladığı görülmüştür. NEDC sürüş çevrimi için rejeneratif enerji geri kazanımının 1 kWh olduğu belirlenmiştir. Aracın şehir içi kullanımında rejeneratif frenlemenin daha etkili olduğu literatürde karşılaşılan değerlendirmeler ile uyumlu görülmüştür.

Bu çalışmada bataryanın şarj ve deşarjı sırasında veriminin sabit olduğu kabul edilerek model oluşturulmuştur. Bir sonraki çalışmada, bataryanın ısıya, şarj ve deşarj sürecine bağlı olarak batarya veriminin dahil edildiği modelin oluşturulması hedeflenmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Bulgu AE. (2010). Tekerlek motorlu seri hibrit elektrikli araçlar için kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Timuçin B. (2016). Hibrit Elektrikli Otobüste (Phileas) Sürücü Sistemlerinin Modellenmesi ve Güç Aktarma Organlarının Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Demiroğlu O. (2012). Elektrikli ve hibrid araçların araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [4] Liu W. (2013). Introduction to hybrid vehicle system modeling and control (First Edition), John Wiley & Sons, Canada.
- [5] Boyalı A. (2005). Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Ehsani M, Gao Y, Gay SE ve Emadi A. (2005). Modern Electric-Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals-Theory-Design, , 117-136.
- [7] Bononno R. (2013). Hybrid Vehicle From Components to System, Thesis, France, 2013.
- [8] Alkan G. (2008). Şehir İçi Tipte Bir Otobüsün Hibrit Dönüşümünün Tasarım Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Biliroğlu AÖ. (2009). Seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] Otlı S. (2010). İçten Yanmalı Motorlu Bir Taşıtın Basit Bir Hibrit Elektrikli Taşıta Dönüşümü İçin Bir Model, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Uyulan Ç. (2010). Seri Hibrit Elektrikli Aracın Modellenmesi ve Bulanık Mantık Kural Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisinin Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Hofman T, Dai CH. (2010). Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle, InVehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-6. doi:10.1109/VPPC.2010.5729082
- [13] Pacheco AF, Martins ME, Zhao H. (2013). New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results, 111, 733-739. doi:10.1016/j.fuel.2013.03.060
- [14] Lv C, Zhang J, Li Y, Yuan Y. (2015). Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles, Energy Conversion and Management, 92, 469-482. doi:10.1016/j.enconman.2014.12.092
- [15] Solouk A, Shakiba M, Kannan K, Solmaz H, Dice P, Bidarvatan M, Shahbakhti, M. (2016). Fuel economy benefits of integrating a multi-mode low temperature combustion (LTC) engine in a series extended range electric powertrain, SAE Technical Paper. doi.org/10.4271/2016-01-2361
- [16] Calam A, Aydoğan B. (2019). Experimental Investigation of Performance Combustion and Emission Characteristics in an HCCI Engine Fuelled Isopropanol and Heptane Fuel Mixtures, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 7(4), 818-833. doi:10.29109/gujsc.605057

- [17] Demirci OK, Çınar C. (2019). The Investigation of the Effects of Using Natural Gas on the Performance and Exhaust Emissions in an HCCI-DI Engine HCCI- DI Bir Motorda Doğal Gaz Kullanımının Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi, 7, 317–330. doi:10.29109/gujsc.521668.
- [18] Vatan O. (2011). Modelling And Simulation Of Longitudinal Dynamics Of Electric Vehicles, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University, Institute of Science And Technology, İstanbul.
- [19] Remy HVH250 elektrik motoru tork-devir-verim haritası, URL:<http://www.aimenerji.com /arge/projeleri.aspx?code=9ff5b74c-3c34-40b4-af9e-5098285b49aa>
- [20] Tobias O, Christopher O ve Lino G. (2013). Hybrid-Electric Vehicle with Natural Gas-Diesel Engine, *Energies* 6(7), 3571-3592. doi: 10.3390/en6073571
- [21] Gupta P, Kumar A ve Dep S.(2014). Regenerative Braking Systems (RBS) (Future Of Braking Systems). *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2(5), 75-78
- [22] Khajepour A, Fallah MS, Goodarzi A. (2014). Electric and hybrid vehicles: technologies, modeling and control-A mechatronic approach, John Wiley & Sons.
- [23] Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. (2006). Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study, *IEEE Transactions on Vehicular technology*, 55(6), 1756-1764. doi:10.1109/TVT.2006.878719
- [24] Öztürk HA. (2010). İstanbul Şehir Çevriminin ABD ve Avrupa Test Çevrimleri İle Emisyon Faktörleri ve Yakıt Tüketimi Açısından Deneysel Olarak Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] Kayışlı K, Uğur M. (2017). Fuzzy Logic and PID control of a 3 DOF Robotic Arm, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*, 5(4), 223-233. doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.339907



# Analysis and Modeling of Thrust Force by using Response Surface Methodology in Drilling Nanocomposite

 Gökhan BAŞAR<sup>1</sup>  Hediye KIRLI AKIN<sup>1,\*</sup>  Funda KAHRAMAN<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Merkez/OSMANIYE

<sup>2</sup>Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tarsus/MERSİN

## Graphical/Tabular Abstract

In this research, the effect rates of independent variables (multi-walled carbon nanotube wt. % content, cutting speed and feed rate) on the dependent variable (thrust force) used during drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite were examined and optimum drilling condition was established. Drilling experiments were performed considering the Box-Behnken Design of the Response Surface Methodology (RSM). As a result of variance analysis, the effects of drilling parameters and the effects of interactions on thrust force were determined. A mathematical model was developed for the thrust force by using independent variables. Optimum drilling parameters were determined by using Desirability Function Analysis (DFA). Finally, verification experiments were carried out.

### Article Info:

Research article

Received: 18/11/2019

Revision: 11/02/2020

Accepted: 26/03/2020

### Highlights

- The effect of multi-walled carbon nanotube on thrust force
- Modeling of the relationship between thrust force and drilling parameters
- Drilling parameter optimization for minimum thrust force

### Keywords

Drilling  
 Thrust Force  
 Multi-Wall Carbon Nanotube  
 Box-Behnken Design  
 Response Surface Methodology  
 Desirability Function Analysis

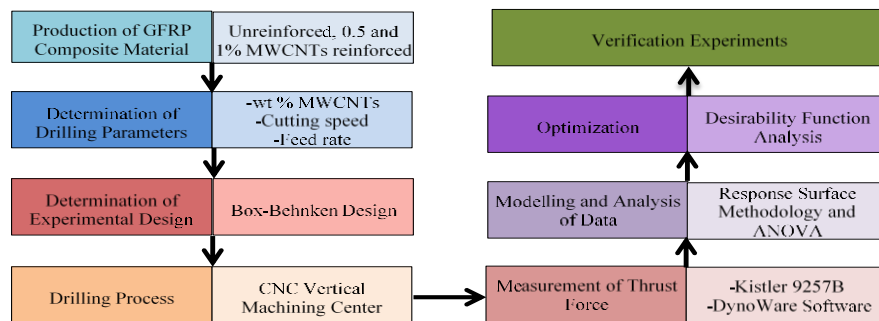


Figure A. Experiment flow chart

**Purpose:** The main objective of the study is to correlate drilling parameters with thrust force during the drilling of the GFRP composite materials using RSM. The development of a mathematical model is adopted to predict the thrust force. The final aim of this study is to optimize drilling conditions using DFA.

**Theory and Methods:** The optimization is based on RSM and DFA. Moreover, the analysis of variance (ANOVA) is used to establish the statistical significance of the drilling parameters on thrust force.

**Results:** The results indicated that the thrust force is powerfully affected by feed rate with a large contribution, followed by cutting speed and weight percentage of multi-wall carbon nanotube. The RSM allowed the optimization of the drilling conditions for minimal thrust force.

**Conclusion:** Adjusted  $R^2$  value calculated for the response surface model was found to be 0.9950, which means that the variance in thrust force could be explained by the significant factors determined. The average absolute error between experimental and predicted values was calculated as about 0.90% sufficiently low to verify the high predictive strength of model. After developing the mathematical model, a numerical optimization technique using DFA was employed to optimize the drilling process. Minimum thrust force parameters were obtained as 0.99 wt % MWCNTs, 71.47 m/min cutting speed and 0.10 mm/rev feed rate by using RSM and DFA.



## Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak Nanokompozitin Delinmesinde oluşan İtme Kuvvetinin Modellenmesi ve Analizi

Gökhan BAŞAR<sup>1</sup> Hediye KIRLI AKIN<sup>1,\*</sup> Funda KAHRAMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 80000, Merkez/OSMANİYE

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus/MERSİN

### Öz

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delme işleminde, delme parametrelerinin itme kuvvetine etkisi deneysel ve istatistiksel olarak araştırılmıştır. Bağımsız değişkenler olarak ağırlıkça % çok duvarlı karbon nanotüp miktarı, kesme hızı ve ilerleme, bağımlı değişken olarak ise itme kuvveti seçilmiştir. Deneyler, Box–Behnken tasarımına göre yapılmıştır. Tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak itme kuvvetini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Optimum delme parametreleri belirlemek için İstenilirlik Fonksiyon Analizi kullanılmıştır. Proses parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkisi varyans analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ilerlemenin itme kuvvetini etkileyen en önemli tasarım faktörü olduğunu göstermiştir. Modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerlerin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

### Analysis and Modeling of Thrust Force by using Response Surface Methodology in Drilling Nanocomposite

#### Abstract

In this study, the effects of drilling parameters on the thrust force in the drilling process of glass fiber reinforced polymer composites were investigated experimentally and statistically. Multi-walled carbon nanotube wt. % content, cutting speed and feed rate were considered as independent variables, the thrust force was considered as dependent variable. Experiments are conducted based on Box–Behnken design. A mathematical model was developed to predict thrust force using response surface methodology. Desirability Function Analysis was used to determine optimum drilling parameters. The influence of process parameters on the thrust force has been evaluated using analysis of variance. The results indicate that the feed rate is the most significant design factor influencing the thrust force. The values predicted from the model and experimental values were found to be very close to each other.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/11/2019  
Düzeltilme: 11/02/2020  
Kabul: 26/03/2020

#### Anahtar Kelimeler

Delme  
İtme Kuvveti  
Çok Duvarlı Karbon  
Nanotüp  
Box–Behnken Tasarımı  
Tepki Yüzeyi Metodolojisi  
İstenilirlik Fonksiyon  
Analizi

#### Keywords

Drilling  
Thrust Force  
Multi-Wall Carbon  
Nanotube  
Box–Behnken Design  
Response Surface  
Methodology  
Desirability Function  
Analysis

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam Elyafı Takviyeli Polimer (CETP) kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, hafiflik, yüksek sönümleme, iyi korozyon direnci ve düşük termal genleşme gibi mükemmel özelliklerinden dolayı uzay, havacılık, otomobil, gemi ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Nano partiküller, polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişmesinde oldukça öneme sahip katkı maddeleri olarak kabul edilir. Son zamanlarda, nano partiküllerin gelişimine bağlı olarak nano partikül katkılı polimerik kompozitlerin üretiminde büyük bir artış olmuştur. Ayrıca, nano partikül katkı türü kompozit malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini etkileyebilir. Örnek olarak, yüksek mukavemete ve düşük yoğunluğa sahip karbon nanotüp kompozit malzemeler, özellikle otomobil endüstrisinde ticari başarı elde etmişlerdir [3, 4].

Kompozit malzemeler nihai şekline yakın olarak üretilseler de montajları sırasında gerekli toleranslara getirilmesi için delme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Delme işlemi sırasında; matris çatlaması, elyaf çekmesi ve kopması, tabakalar arası çatlak ve ayrışma gibi hasar mekanizmaları meydana gelmektedir [6]. CETP kompozitlerin delinmesinde, yüksek delik kalitesine, düşük deformasyon ve minimum itme kuvveti için en uygun delme parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Yüksek kaliteli bir delme işlemi için delme parametrelerinin uygun değerlerinin tespit edilmesi önemli bir kriterdir [7, 8]. Khashaba [9], havacılık endüstrisinde kullanılan tabakalı polimer kompozitlerin delinmesinde yaklaşık %60'ının kalitesiz olduğu için hurdaya atıldığını ifade etmiştir. Tabakalı kompozitleri delme işleminde oluşan en önemli kusurun tabaka ayrılması hasarı olduğu ve bunun esas nedenin de itme kuvveti olduğu belirlenmiştir [10-12]. Literatürde CETP kompozit malzemelerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir. Karimi ve arkadaşları [4], nanokompozitlerin HSS matkaplarla delinmesinde delaminasyon katsayısının minimize edilmesinde Taguchi metodunu kullanmışlardır. Delme parametreleri olarak; ağırlıkça % çok duvarlı karbon nanotüp miktarı (ÇDKNT), ilerleme, kesme hızı ve matkap çapını seçmişlerdir. Delaminasyon katsayısı üzerinde en fazla etki gösteren faktörün ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir. Khashaba [9] çalışmasında, CETP kompozit malzemelerinin delinebilirliğini araştırmış ve kesme hızının artması ile itme kuvvetini azaldığını ifade etmiştir. Davim ve arkadaşları [12], CETP kompozitlerin delinmesinde delme parametrelerinin (kesme hızı ve ilerleme) özgül kesme basıncı, itme kuvveti, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. İtme kuvvetini etkileyen en önemli parametrenin ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir. König ve Grass [13] çalışmalarında, delaminasyon seviyesinin itme kuvveti ile ilişkili olduğunu ve itme kuvvetinin kritik değer altında olmasında delaminasyonun ihmal edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Palanikumar ve arkadaşları [14], CETP delinmesinde devir sayısı, ilerleme hızı ve matkap çapının itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için Taguchi tabanlı Gri İlişki Analizi yöntemini kullanmışlardır. Latha ve Senthilkumar [15] çalışmalarında, CETP kompozit malzemelerin delinmesi esnasında oluşan itme kuvvetini tahmin etmek için bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. Bulanık mantık modelinden elde edilen sonuçlar tepki yüzeyi modeliyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, bulanık kurula dayalı modelin tahmin yeteneğinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Koyunbakan ve arkadaşları [16], CETP kompozit malzemelerin delinmesinde; kesme hızı, ilerleme, matkap çapı ve matkap uç açısını delme parametreleri olarak belirlemişlerdir. Delme işlemi esnasında oluşan itme kuvvetini tahmin etmek için ANFIS ile bir model geliştirmişlerdir. Singh ve Kumar [17] çalışmasında, CETP nanokompozit malzemelerin delinmesinde devir sayısı, ilerleme, matkap çapı ve ağırlıkça % ÇDKNT miktarının delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Tepki Yüzeyi Metodolojisi (TYM) yardımıyla incelemişlerdir. Delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü için ikinci dereceden matematiksel model geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, CETP nanokompozit malzemelerin delinmesinde ağırlıkça % ÇDKNT miktarı, kesme hızı ve ilerlemenin itme kuvveti üzerindeki etkileri TYM ile tespit edilmiştir. İtme kuvveti için kuadratik model oluşturulmuştur. En düşük itme kuvveti için optimum delme parametreleri belirlenmiştir. Son olarak, doğrulama deneyleri yapılarak geliştirilen modelin başarısı test edilmiştir.

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

### 2.1. Kompozit Üretimi (Composite Manufacturing)

Çalışmada, CETP kompozit malzemelerin delinmesi işleminde delme parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için öncelikle İnovatif Malzeme Teknolojileri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına, katkısız, %0,5 ve 1 ÇDKNT katkısına sahip CETP kompozit malzemeler ürettirilmiştir (Şekil 1). Kompozit malzemelerin üretilmesinde, plakalar arasında boşlukların oluşmasını engellemek amacı ile vakum infüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Takviye edilecek ÇDKNT partikülleri, arzu edilen oranı karşılayacak şekilde hassas terazide tartılmıştır. Tartılan ÇDKNT partiküller asetonda çözündürülmüş ve topaklanmayı engellemek için de 30 dk mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Ardından çözündürülmüş nano partiküller epoksiye eklenmiştir. Asetonlu nano partiküller epoksi ile birlikte 60 dk ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karışımda bulunan asetona buharlaşması için vakum fırınında, 80°C sabit sıcaklıkta ve 24 saat süre boyunca vakum altında kalmıştır. Ardından, oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. Epoksi sertleştirici ve nano partikülden oluşan karışım 30 dk mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Reçine olarak ağırlıkça 1:4 oranında sertleştirici eklenen epoksi tercih edilmiştir. Sonrasında tek yönlü cam elyaf dokumalardan kesimler yapılmıştır. Kesilen dokumalara hazırlanan epoksi

reçineler emdirilerek, dokumalar 0 ve 90° yönlerinde tabakalandırılmıştır. Ardından, üst üste dizilen dokumalara 1600 N/m<sup>2</sup> yük uygulanmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Üretilen katkısız ve ÇDKNT katkılı malzemeler, hacimce %55 cam elyaftan ve 8 katmandan oluşmuştur. Kompozit malzemelerin kalınlıkları 7 mm ± 0,2 mm'dir. Üretilen kompozit plakaları, 80 x 100 mm boyutlarına getirmek için su jeti ile kesim yapılmıştır.



(a) CETP



(b) %0,5 ÇDKNT + CETP

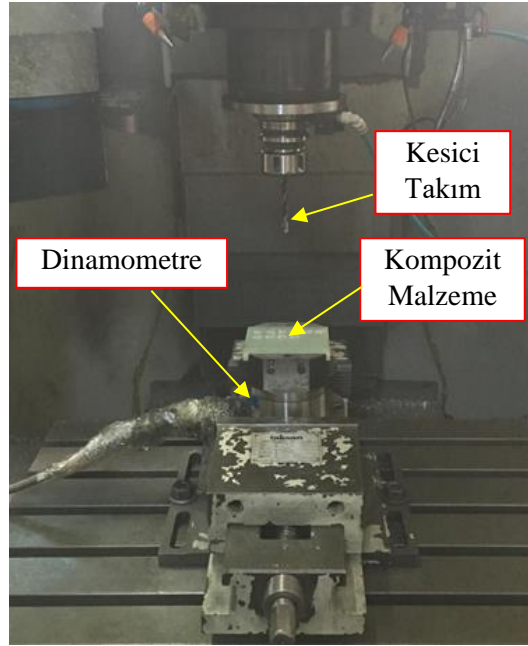


(c) %1 ÇDKNT + CETP

**Şekil 1.** Katkısız, %0,5 ve 1 ÇDKNT katkılı CETP kompozit malzemeler

## 2.2. Deney Tasarımı (Design of Experiments)

Delme deneyleri maksimum 6000 dev/dk ve 7,5 kW güce sahip Johnford VMC 850 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak, kaplamasız Ø8 mm HSS kesici takımları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ekipmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Her deney için takım aşınmasından kaynaklı hataları önlemek amacıyla yeni bir kesici takım kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Delme deneylerinde kullanılan ekipmanlar

Çalışmada, ağırlıkça % ÇDKNT miktarı, kesme hızı ve ilerleme delme parametresi olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 1'de görülmektedir. Deneyler Box-Behnken deney tasarımına göre tasarlanmış ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde etmek amacıyla ikişer kez tekrarlanmıştır (Tablo 2).

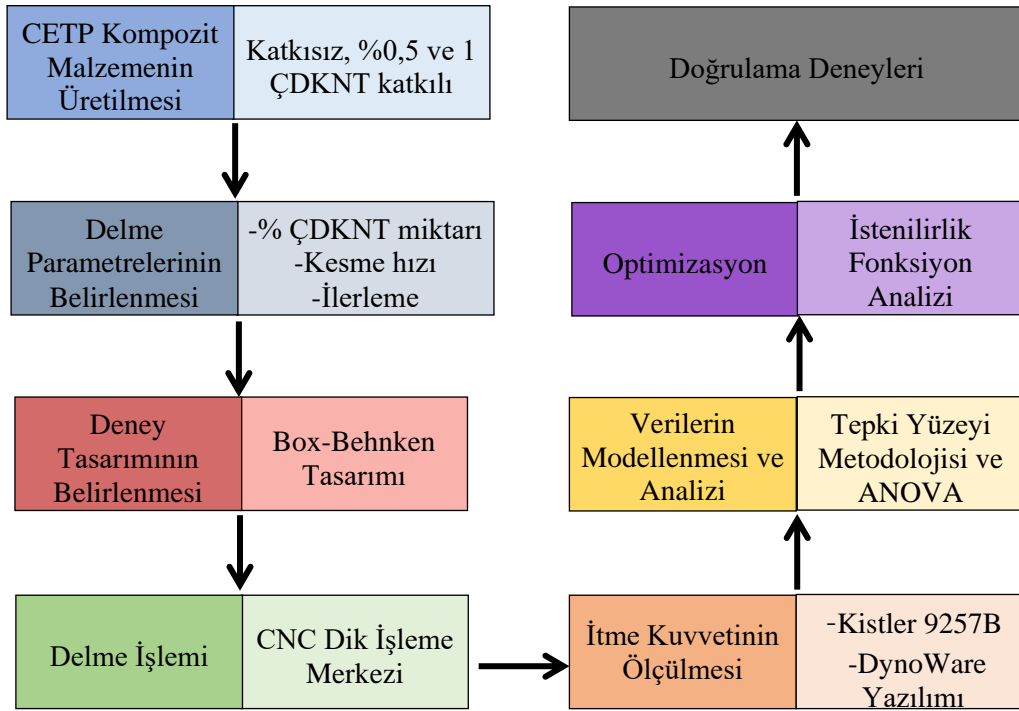
**Tablo 1.** Kontrol faktörleri ve seviyeleri

| Kontrol faktörler | Sembol | Seviye |      |      |
|-------------------|--------|--------|------|------|
|                   |        | -1     | 0    | +1   |
| ÇDKNT miktarı (%) | A      | 0      | 0,5  | 1    |
| Kesme hızı (m/dk) | B      | 25     | 50   | 75   |
| İlerleme (mm/dev) | C      | 0,10   | 0,15 | 0,20 |

**Tablo 2.** Box-Behnken tasarımına göre kontrol faktörlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

| Kontrol faktörlerin değerleri |           |    |    |                   |                   |                   |
|-------------------------------|-----------|----|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| Deney sırası                  | Kodlanmış |    |    | Gerçek            |                   |                   |
|                               | A         | B  | C  | ÇDKNT miktarı (%) | Kesme hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) |
| 1                             | -1        | -1 | 0  | 0                 | 25                | 0,15              |
| 2                             | 1         | -1 | 0  | 1                 | 25                | 0,15              |
| 3                             | -1        | +1 | 0  | 0                 | 75                | 0,15              |
| 4                             | 1         | +1 | 0  | 1                 | 75                | 0,15              |
| 5                             | -1        | 0  | -1 | 0                 | 50                | 0,1               |
| 6                             | 1         | 0  | -1 | 1                 | 50                | 0,1               |
| 7                             | -1        | 0  | +1 | 0                 | 50                | 0,2               |
| 8                             | 1         | 0  | +1 | 1                 | 50                | 0,2               |
| 9                             | 0         | -1 | -1 | 0,5               | 25                | 0,1               |
| 10                            | 0         | +1 | -1 | 0,5               | 75                | 0,1               |
| 11                            | 0         | -1 | +1 | 0,5               | 25                | 0,2               |
| 12                            | 0         | +1 | +1 | 0,5               | 75                | 0,2               |
| 13                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |
| 14                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |
| 15                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |

Deney akış şeması Şekil 3'te verilmiştir. İtme kuvvetleri ( $F_z$ ) dik işleme merkezinin tezgâh tablasına bağlanmış olan Kistler 9257B tipi dinamometre ile ölçülmüştür. İtme kuvveti verileri Kistler DynoWare yazılımıyla bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.



Şekil 3. Deney akış şeması

### 2.3. Tepki Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology)

Tepki Yüzeyi Metodolojisi, bir ürün veya sürecin kalite karakteristiklerinin geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [18]. Bu yöntem, bir sürecin parametreleri ve kalite karakteristikleri arasındaki ilişkiyi analiz etme, modelleme ve optimum parametre seviyelerin tespit edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [19, 20]. TYM, en az sayıda gözlemlenebilir değerler ile tepki değişkeninin yeterli ve güvenilir şekilde ölçülmesini sağlayan deney tasarımı kullanılarak elde edilen verilere en iyi uyum sağlayacak matematiksel modelin oluşturulmasını ve en iyi tepki değerini veren faktör seviyelerinin belirlenmesini kapsamaktadır [21]. TYM ile doğrusal, kuadratik ve kübik gibi modeller kullanılmaktadır. Kuadratik modelin denklemi Eşitlik 1'deki gibi ifade edilebilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $x_1, x_2, \dots, x_n$  bağımsız değişkenleri,  $y$  bağımlı (tepki) değişkeni,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, n$ ) bilinmeyen model parametrelerini ve  $\varepsilon$  rastgele hata terimini göstermektedir [22].

TYM ile birçok deney tasarımı yapılabilmektedir. Fakat, TYM için özel olarak geliştirilmiş ve deney sayısını önemli ölçüde azaltan Box-Behnken ve Merkezi Kompozit deney tasarımları gibi tasarımlar yaygın olarak kullanılmaktadırlar [23].

### 2.4. İstenilirlik Fonksiyon Analizi (Desirability Function Analysis)

İstenilirlik Fonksiyon Analizi (İFA), bağımlı değişkenlerin, boyutsuz “istenilirlik indeksi” olarak tanımlanan tek bir fonksiyon altında toplanmasını ve bu fonksiyonun hedeflenen sonuçları verecek şekilde maksimize edilmesini kapsamaktadır. İstenilirlik indeksi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu değer 1'e yaklaşması araştırmacının belirlediği kriterleri sağladığını göstermektedir [24].

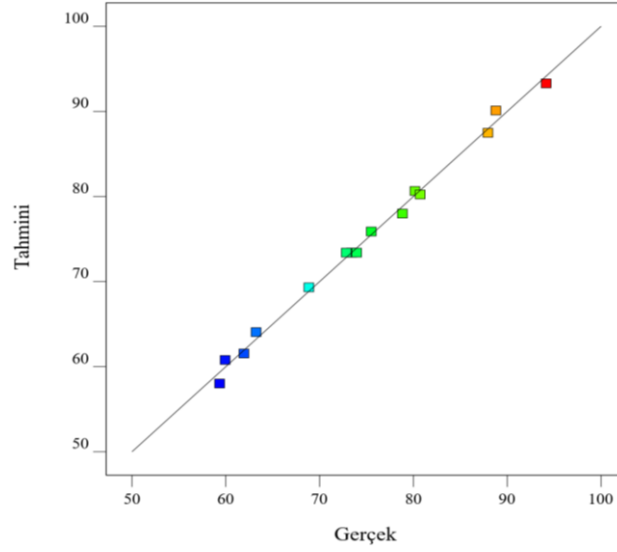
### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

#### 3.1. Deneysel Verilerin Analizi (Experimental Data Analysis)

CETP nanokompozit malzemeleri delme işleminde, itme kuvveti oldukça önemlidir. Delme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişki TYM'nin Box-Behnken deney tasarımı kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesinde Design Expert paket programı kullanılmıştır. Deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Verilerin istatistik analizinden elde edilen tahmin modellerine ait bulgular Tablo 4'de yer almaktadır. Tablo 3'te yer alan deneysel ve tahmini itme kuvvet değerleri arasındaki ilişki Şekil 4'de görülmektedir.

**Tablo 3.** İtme kuvvetinin deneysel ve tahmini değerleri

| <i>Deney Numarası</i>                | <i>A (%)</i> | <i>B (m/dk)</i> | <i>C (mm/dev)</i> | <i>Deneysel Fz (N)</i> | <i>Tahmini Fz (N)</i> | <i>Hata (%)</i> |
|--------------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1                                    | 0            | 25              | 0,15              | 87,94                  | 87,48                 | 0,52            |
| 2                                    | 1            | 25              | 0,15              | 80,16                  | 80,64                 | 0,60            |
| 3                                    | 0            | 75              | 0,15              | 80,72                  | 80,24                 | 0,59            |
| 4                                    | 1            | 75              | 0,15              | 68,86                  | 69,32                 | 0,67            |
| 5                                    | 0            | 50              | 0,1               | 61,93                  | 61,55                 | 0,61            |
| 6                                    | 1            | 50              | 0,1               | 59,34                  | 58,02                 | 2,22            |
| 7                                    | 0            | 50              | 0,2               | 88,79                  | 90,11                 | 1,49            |
| 8                                    | 1            | 50              | 0,2               | 75,51                  | 75,89                 | 0,50            |
| 9                                    | 0,5          | 25              | 0,1               | 63,23                  | 64,07                 | 1,33            |
| 10                                   | 0,5          | 75              | 0,1               | 59,93                  | 60,79                 | 1,44            |
| 11                                   | 0,5          | 25              | 0,2               | 94,15                  | 93,29                 | 0,91            |
| 12                                   | 0,5          | 75              | 0,2               | 78,83                  | 77,99                 | 1,07            |
| 13                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 73,41                  | 73,40                 | 0,01            |
| 14                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 73,95                  | 73,40                 | 0,74            |
| 15                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 72,84                  | 73,40                 | 0,77            |
| <i>Ortalama mutlak yüzde hatası:</i> |              |                 |                   |                        |                       | 0,90            |



Şekil 4. İtme kuvvetinin tahmini ve gerçek değerleri

Tablo 4. Model istatistikleri

| Kaynak    | Std. Sapma | R <sup>2</sup> | Düzeltilmiş R <sup>2</sup> | Tahmin R <sup>2</sup> | PRESS  |          |
|-----------|------------|----------------|----------------------------|-----------------------|--------|----------|
| Doğrusal  | 4,44       | 0,8666         | 0,8302                     | 0,7175                | 458,81 |          |
| 2FI       | 4,30       | 0,9090         | 0,8408                     | 0,5288                | 765,34 |          |
| Kuadratik | 1,28       | 0,9950         | 0,9859                     | 0,9249                | 122,04 | önerilen |
| Kübik     | 0,56       | 0,9996         | 0,9973                     |                       |        |          |

Tablo 4’de yer alan tahmin modelleri incelendiğinde, düzeltilmiş R<sup>2</sup> ve tahmin edilen R<sup>2</sup> değerlerinin maksimum ve tahmin hata kareler toplamı (PRESS) değerinin ise minimum olduğu model önerilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Kuadratik modele ait ANOVA sonucu

| Kaynak         | KT      | SD | KO      | F- değeri | p- değeri |
|----------------|---------|----|---------|-----------|-----------|
| Model          | 1616,19 | 9  | 179,58  | 110,07    | < 0,0001  |
| A              | 157,62  | 1  | 157,62  | 96,62     | 0,0002    |
| B              | 172,42  | 1  | 172,42  | 105,69    | 0,0001    |
| C              | 1077,64 | 1  | 1077,64 | 660,56    | < 0,0001  |
| A <sup>2</sup> | 10,53   | 1  | 10,53   | 6,45      | 0,0519    |
| B <sup>2</sup> | 69,27   | 1  | 69,27   | 42,46     | 0,0013    |
| C <sup>2</sup> | 50,45   | 1  | 50,45   | 30,92     | 0,0026    |
| AB             | 4,16    | 1  | 4,16    | 2,55      | 0,1711    |
| AC             | 28,57   | 1  | 28,57   | 17,51     | 0,0086    |
| BC             | 36,12   | 1  | 36,12   | 22,14     | 0,0053    |
| Hata           | 8,16    | 5  | 1,63    |           |           |
| Uyum eksikliği | 7,54    | 3  | 2,51    | 8,16      | 0,1111    |



|   |         |    |      |  |  |
|---|---------|----|------|--|--|
| <i>Saf hata</i>   | 0,62    | 2  | 0,31 |  |  |
| <i>Toplam</i>   | 1624,35 | 14 |      |  |  |
| <i>SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması</i> |         |    |      |  |  |

Kuadratik model için hesaplanan p değerinin ( $< 0,0001$ )  $0,05$ 'ten düşük olması, modelin genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosundaki faktör veya etkileşimin tepki üzerindeki etkisi p değerine bakılarak anlaşılmaktadır. %95 güven aralığında ( $p < 0,05$ ) iken faktör veya etkileşimin tepki üzerinde anlamlı olduğu sonucuna ulaşılır. Buna göre, *A*, *B*, *C*,  $B^2$ ,  $C^2$ , *AC* ve *BC* faktörlerin itme kuvveti üzerinde anlamlı olduğu,  $A^2$  ve  $AB$ 'nin ise anlamsız olduğu anlaşılmıştır. Kuadratik model için hesaplanan istatistikler Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Kuadratik modeli için katsayı değerleri

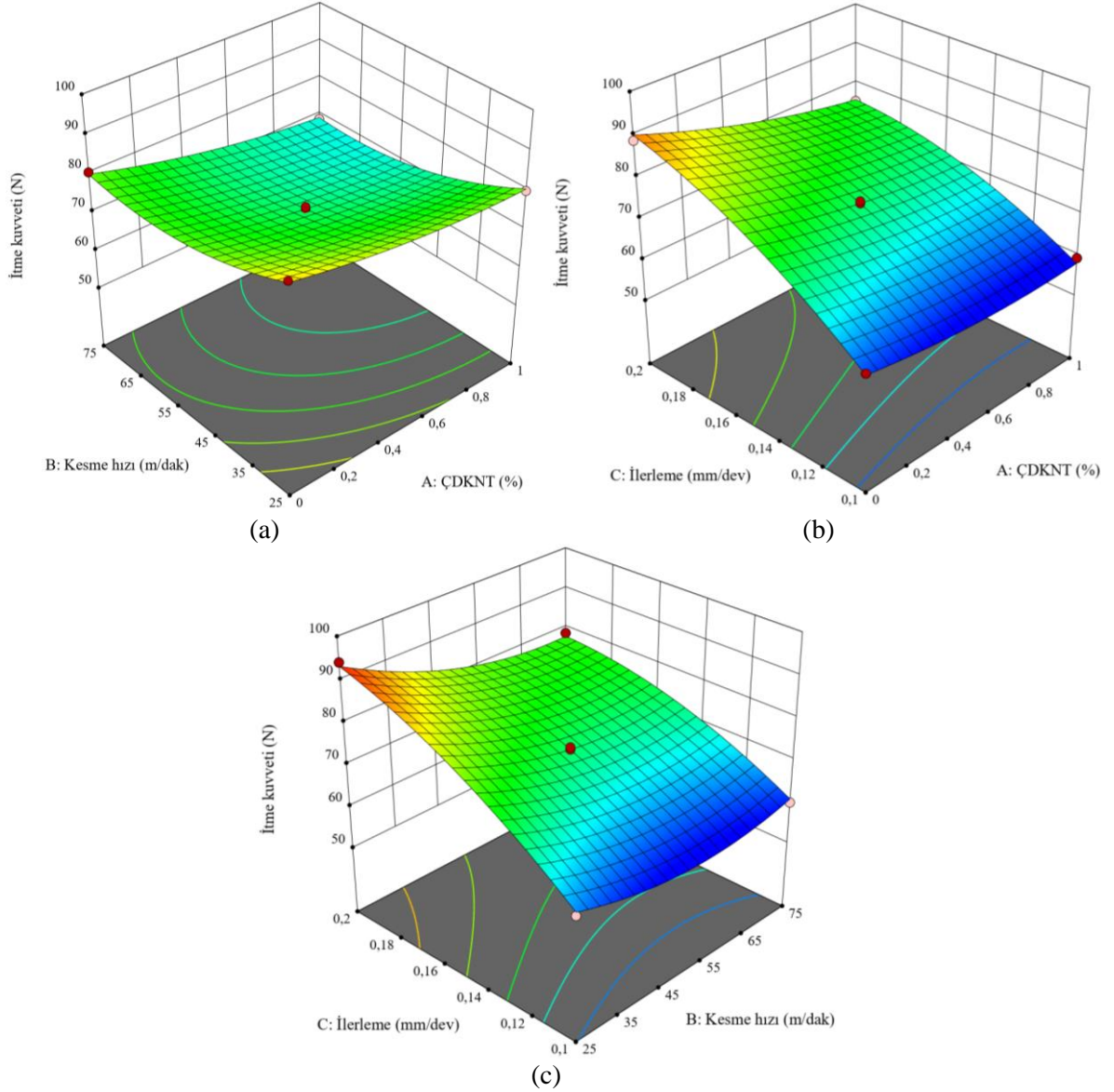
|  |        |                                     |        |
|--|--------|-------------------------------------|--------|
| <i>Standart sapma</i>                            | 1,28   | <i>Düzeltilmiş <math>R^2</math></i> | 0,9950 |
| <i>Ortalama</i>                                  | 74,64  | <i>Tahmin <math>R^2</math></i>      | 0,9859 |
| <i>Varyasyon katsayısı %</i>                     | 1,71   | <i>Tahmin hata kareler toplamı</i>  | 0,9249 |
| <i>Tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamı</i> | 122,04 | <i>Yeterli kesinlik</i>             | 33,818 |

Tablo 6'ya göre 0,9950 olarak hesaplanan düzeltilmiş  $R^2$  değeri, itme kuvveti değişkenindeki varyansın yaklaşık %99,50'sinin delme parametreleri ve etkileşimleri (*A*, *B*, *C*,  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ , *AB*, *AC* ve *AB*) tarafından açıklanabildiği, %0,50'lik kısmın ise açıklanamadığını ifade etmektedir. Düzeltilmiş  $R^2$  ve tahmin  $R^2$  değerlerin birbirine ve 1'e oldukça yakın olmaları modelin uygunluğunu ifade etmektedir. Yeterli kesinlik değeri, sinyal gürültü oranını ölçer ve bu oranın 4'ün üstünde olması istenir. Model için hesaplanan yeterli kesinlik değeri (33,818), sinyalin yeterli olduğu ve modelin tasarım uzayında gezinmek için kullanılabileceği anlamına gelmektedir.

TYM ile Box-Behnken tasarımı yaklaşımı kullanılarak itme kuvveti için elde edilen ikinci dereceden model, kodlanmış faktörlerle aşağıda Eşitlik 2'de ifade edilmiştir.

$$Fz = 73,40 - 4,44A - 4,64B + 11,61C - 2,67AC - 3,01BC + 4,33B^2 - 3,70C^2 \quad 2$$

İtme kuvveti ve delme parametreleri arasındaki değişime ilişkin yüzey grafikleri Şekil 5 (a-c)'te verilmiştir. Şekil 5 (a) incelendiğinde, kesme hızı ve ÇDKNT miktarının artması ile itme kuvveti azalmıştır. İlerleme, kesme alanı yüksekliği ve itme kuvveti arasında bir ilişki vardır. İlerlemenin artması ile genellikle kesme alanının yüksekliği artmaktadır. Kesme alanı yüksekliğinin artması da itme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır [25]. Çalışma ile literatüre uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ÇDKNT miktarının artması ve ilerlemenin azalması ile itme kuvvetinin azaldığı Şekil 5 (b)'de görülmektedir. Kumar ve Singh çalışmasında, en düşük itme kuvvetini ağırlıkça %1,5 ÇDKNT takviyeli karbon elyaf polimer nanokompozit malzemede elde etmişlerdir. ÇDKNT takviyesinin, takım-talaş arayüzünde yağlama özelliği gösterdiğini ve böylece delme işlemini kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir [26]. Şekil 5 (c)'de ise, ilerlemenin azalması ve kesme hızının artması ile itme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Kesme hızı arttıkça takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı kesme bölgesindeki sıcaklık artar. Sıcaklığın artması ile kompozit malzemede yumuşama meydana gelir. Böylece, kesme hızının artması ile itme kuvveti azalmaktadır [27, 28].



**Şekil 5.** Delme parametrelerinin itme kuvvetine etki grafikleri a) Kesme hızı ve ÇDKNT b) İlerleme ve ÇDKNT c) Kesme hızı ve ilerleme

### 3.2. Doğrulama Deneyleri (Verification Tests)

Geliştirilen modelin başarısını tespit etmek amacıyla yapılan deneylerdir. Doğrulama deneyleri, TYM'nin Box–Behnken tasarımı içerisinde yer almayan üç farklı kombinasyonda gerçekleştirilmiştir. Bu kombinasyonlardan elde edilen gerçek ve tahmini itme kuvvetinin sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de bulunan gerçek ve tahmini itme kuvveti arasındaki ilişkiyi gösteren belirtme katsayısı ( $R^2$ ) 0,998 olarak hesaplanmıştır. Belirtme katsayısı 1'e ne kadar yakın olursa matematiksel model o kadar güçlüdür. Burada elde edilen  $R^2$  değeri oldukça yüksektir. Yani, geliştirilen matematiksel modelin tahmin yeteneğinin güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ortalama mutlak yüzde hata değeri 4,66 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 7.** Doğrulama deneyleri ve sonuçları

| Deney No | A (%) | B (m/dk) | C (mm/dev) | Gerçek $F_z$ | Tahmini $F_z$ | Hata (%) |
|----------|-------|----------|------------|--------------|---------------|----------|
| 1        | 0     | 50       | 0,15       | 79,14        | 79,53         | 0,49     |
| 2        | 0,5   | 75       | 0,15       | 70,29        | 73,09         | 3,98     |
| 3        | 1     | 75       | 0,10       | 54,11        | 59,26         | 9,52     |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Belirtme katsayısı ( $R^2$ ): | 0,998 |
| Ortalama mutlak yüzde hatası: | 4,66  |

### 3.3. Optimum Delme Parametrelerin Belirlenmesi (Determination of Optimum Drilling Parameters)

Bu çalışmanın son adımında, İstenilirlik Fonksiyon Analizi (İFA) kullanılarak optimum delme parametreleri belirlenmiştir. Bağımsız değişkenler aralığında ve bağımlı değişkeni minimum yapan en iyi parametre değerleri, istenilirlik indeksinin en yüksek olduğu değerde elde edilmiştir. İFA ile en düşük itme kuvvetini veren en iyi parametre değerleri Tablo 8’de verilmiştir.

**Tablo 8. En düşük itme kuvveti için en iyi parametre değerleri**

| ÇDKNT (%) | Kesme hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) | İtme kuvveti (N) | İstenilirlik indeksi |
|-----------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| 0,99      | 71,47             | 0,10              | 59,26            | 1                    |

Tablo 8 incelendiğinde, en düşük itme kuvvet değerinin elde edilmesi için gerekli parametre kombinasyonu %0,99 ÇDKNT miktarı, 71,47 m/dk kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme olarak tespit edilmiştir. Kontrol deneyleri arasından optimum parametre kombinasyonuna en yakın olanı üç numaralı kombinasyon olarak belirlenmiştir. İFA ile elde edilen optimum kombinasyonun tahmin edilen itme kuvveti 59,26 N iken dokuz numaralı kontrol deneyinin sonucu ise 54,11 N olarak elde edilmiştir.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz CETP’lerin delinmesinde, delme parametreleri ve itme kuvveti arasındaki ilişkinin tahmini ve analizi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- ANOVA sonuçlarından, % ÇDKNT miktarı, kesme hızı, ilerleme ve bu faktörlerin birbirleriyle etkileşimi itme kuvveti üzerinde oldukça önemli olduğu görülmüştür. İtme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ise ilerleme olduğu tespit edilmiştir.
- Tepki yüzeyi metodolojisi, delme parametrelerine göre itme kuvvetini modellemek için kullanılmıştır. Böylece, ikinci dereceden bir model geliştirilmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerler arasındaki yüzde hata değerleri hesaplanmıştır. Ortalama mutlak hata değeri %0,90 ve belirtme katsayısı  $R^2=0,9950$  olarak hesaplanmıştır.
- Doğrulama deneyleri sonucunda, modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerler arasındaki ortalama hata değeri %4,66 ve belirtme katsayısı  $R^2=0,998$  olarak hesaplanmıştır.
- İtme kuvveti ve delme parametreleri arasındaki değişime ilişkin yüzey grafikleri incelendiğinde, ilerleme azaldıkça itme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kesme hızı ve ÇDKNT miktarındaki artış itme kuvvetini azaltmıştır.
- İstenilirlik Fonksiyon Analizi ile en düşük itme kuvveti değerinin (59,26 N) elde edilmesi için en optimum parametre kombinasyonu; %0,99 ÇDKNT miktarı, 71,47 m/dk kesme hızı ve 0,10 mm/dev olarak belirlenmiştir.
- Deney tasarımına ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen gerçek ve tahmini değerler birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple geliştirilen model delme parametrelerinin seviyesini belirlemek için kullanılabilir. Böylece, delme işleminde zaman kaybı ve maliyet azaltılabilir.

## TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çalışmanın yürütülmesinde laboratuvar olanaklarını sunan Prof. Dr. İhsan Korkut'a ve delme işlemi esnasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Bahattin Yılmaz'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ekici, E., & Işık, B. (2009). Cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin delinmesi esnasında oluşan yüzey hasarının deneysel olarak incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS), 1-6.
- [2] Takmaz, A., Erkan, Ö., & Yücel, E. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 567-573.
- [3] Advani, S. G. (2007). *Processing and properties of nanocomposites*, World Scientific Publishing, Singapore.
- [4] Karimi, Z. N., Heidary, H., Yousefi, J., Sadeghi, S., & Minak, G. (2018). Experimental investigation on delamination in nanocomposite drilling. *FME Transactions*, 46(1), 62-69.
- [5] Ravishankar S. R., & Murthy C. R. L. (1996). Ultrasonic imaging for evaluation of drill-induced delaminations in composite laminates. In *Proceedings of the 14th World Conference Nondestructive Test*, 8-13.
- [6] Velayudham, A., & Krishnamurthy, R. (2007). Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3), 204-209.
- [7] Bilge, T., Motorcu, A. R., & Ivanov, A. (2017). Kompakt laminatın delinmesinde boyutsal tamlik için delme parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz ile optimizasyonu. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(2), 1-22.
- [8] Motorcu, A. R., Ekici, E., & Kuş, A. (2016). Investigation of the WEDM of Al/B4C/Gr reinforced hybrid composites using the Taguchi Method and Response Surface Methodology. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(4), 435-445.
- [9] Khashaba, U. A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63(3-4), 313-327.
- [10] Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335-339.
- [11] Davim, J. P., Reis, P., & António, C. C. (2004). Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1828-1833.
- [12] Davim, J. P., Reis, P., & António, C. C. (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289-297.
- [13] König, W., & Grass, P. (1989). Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *CIRP Annals*, 38(1), 119-124.
- [14] Palanikumar, K., Latha, B., Senthilkumar, V. S., & Davim, J. P. (2012). Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using Grey Relational Analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(3), 297-305.

- [15] Latha, B., & Senthilkumar, V. S. (2009). Analysis of thrust force in drilling glass fiber-reinforced plastic composites using Fuzzy Logic. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(4), 509-516.
- [16] Koyunbakan, M., Ünüvar, A., & Demir, O. (2015). CETP kompozitlerin delinmelerindeki itme kuvvetinin ANFIS ile modellenmesi. 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 145-156.
- [17] Singh, K. K., & Kumar, D. (2018). Experimental investigation and modelling of drilling on multi-wall carbon nanotube-embedded epoxy/glass fabric polymeric nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(11), 1943-1959.
- [18] Aslan, N., & Cebeci, Y. (2007). Application of Box-Behnken design and Response Surface Methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, 86(1-2), 90-97.
- [19] Yavari, S., Malakahmad, A., Sapari, N. B., & Yavari, S. (2017). Sorption properties optimization of agricultural wastes-derived biochars using Response Surface Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 509-519.
- [20] Özdemir, M. (2019). Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarının Yüzey Yanıt Yöntemi kullanarak analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 639-648.
- [21] Chehreghani, S., Noaparast, M., Rezai, B., & Shafaei, S. Z. (2017). Bonded-particle model calibration using Response Surface Methodology. *Particuology*, 32, 141-152.
- [22] Yang, A., Han, Y., Pan, Y., Xing, H., & Li, J. (2017). Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting Response Surface Methodology. *Results Physics*, 7, 1046-1050.
- [23] Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). Response Surface Methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76, 965-977.
- [24] Türkşen, Ö., & Ertunç, S. (2015). Optimization of saponification process in Multi-Response Framework by using Desirability Function Approach. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(2), 141-149.
- [25] Tsao, C. C., & Huang, C. C. (2015). Analysis of thrust-induced drilling in composite materials using a hemispherical drill, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4), 607-13.
- [26] Kumar, D., & Singh, K. K. (2019). Investigation of delamination and surface quality of machined holes in drilling of multiwalled carbon nanotube doped epoxy/carbon fiber reinforced polymer nanocomposite, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(4), 647-663.
- [27] Premnath, A. A. (2019). Drilling studies on carbon fiber-reinforced nano-SiC particles composites using response surface methodology. *Particulate Science and Technology*, 37(4), 478-486.
- [28] Palanikumar, K. (2011). Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement*, 44(10), 2138-2148.

## Histogram-based quantitative grading on ultrasonographic images of a fatty liver

 Sevil TOPRAK<sup>1,\*</sup>  Ömer KARAL<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Keçiören/ANKARA

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Keçiören/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a new method called the Weighted Histogram (WH) was developed for enable the radiologist to interpret the level of the fatty liver objectively. Detection of fatty liver in the early stages is important for the control of the disease. Various imaging techniques such as MRI, CT and ultrasound are used for this purpose. However, ultrasound is the most widely used imaging technique in detecting fatty liver due to its non-invasive, affordable and easy accessibility.

### Article Info:

Research article

Received: 14/11/2019

Revision 17/02/2020

Accepted: 28/03/2020

### Highlights

- Liver Ultrasound Images
- Fatty Liver Grading
- Quantitative Measurement

### Keywords

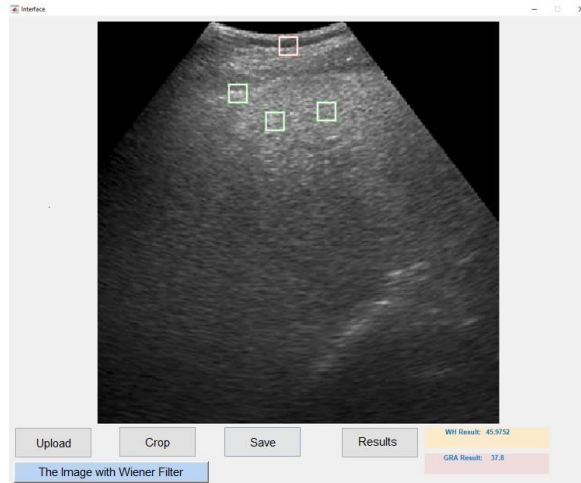
 Fatty Liver,  
 Liver Fat Level,  
 Ultrasound Image  
 Processing,  
 Weighted Histogram,  
 MATLAB GUI


Figure A. Severe fatty liver, ultrasound image

**Purpose:** It is to develop a method that quantitatively determines the level of fatty liver using Ultrasound images to help the specialist by reducing the effects of subjective evaluation. With this method, the misdiagnosis caused by differences in the evaluation of fatty liver will be reduced.

**Theory and Methods:** 256 level (8 bit) grayscale, 1024 x 1024 pixel digital liver ultrasound images has been used. A total of 4 regions, 20x20 pixels in size, are selected by the radiologist, one on the abdominal muscle for reference and three on the liver tissue for comparison. Histograms of the selected regions are calculated. The histograms obtained are recalculated by giving more weight to the white pixel so that new weighted histograms are obtained. To improve the ease of use of the proposed WH, a Graphical User Interface has been designed in the MATLAB environment.

**Results:** The result showed that the outputs produced with using WH method are compatible with fatty liver grading in ultrasound images. In addition, the results more sensitive compared with the GRA method. The experimental results are presented and compared with GRA in Section 3.

**Conclusion:** In the diagnosis of fatty liver by ultrasound, there is a subjective assessment based on the knowledge and visual perception of the radiologist. To increase objectivity and reduce operator dependency, in this study, a new quantitative assessment method was proposed to determine and grade the fatty liver from ultrasound images. In addition, the results obtained by using GRA were compared with the results obtained by the proposed method and the results are consistent. Also, WH was produced more sensitive results.



## Yağlı Bir Karaciğerin Ultrasonografik Görüntüleri Üzerinde Histogram Bazlı Kantitatif Derecelendirme

Sevil TOPRAK<sup>1,\*</sup> Ömer KARAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Keçiören/ANKARA

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Keçiören/ANKARA

### Öz

Karaciğerde anormal bir yağ birikmesi karaciğer hücrelerine zarar verebilir ve karaciğer hastalıklarına neden olabilir. Yağ birikimi erken evrelerde teşhis edilirse; yağlı karaciğer ile ilişkili fonksiyonel anormallikler ortaya çıkarılabilir ve derecesi belirlenebilir. Yağlı karaciğeri teşhis etmek ve karaciğerdeki yağ derecesini belirlemek için çeşitli tıbbi görüntüleme teknikleri kullanılır. Bu görüntüleme tekniklerinden en sık kullanılanı invaziv olmayan, uygun maliyetli ve kolay erişilebilir olan ultrason ile görüntülemedir. Ultrason, karaciğer yağlanmasının tespitinde oldukça yaygın kullanılmasına rağmen, karaciğerdeki yağ seviyesini ultrason görüntülerinden belirlemek için bir uzman görüşüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca aynı karaciğer görüntüsündeki yağ seviyesi, farklı zamanlarda değerlendirildiğinde aynı veya başka bir uzman tarafından farklı şekillerde yorumlanabilir. Bu nedenle, tanı öznelidir ve uzmanın bilgi ve tecrübesine bağlı olarak değişebilir. Bu çalışmada, nesneliği arttırmak ve uzmana yardımcı olmak amacıyla, ultrason görüntülerinden yağlı karaciğeri belirlemek ve derecelendirmek için Ağırlıklandırılmış Histogram [Weighted Histogram (WH)] adı verilen yeni bir nicel ölçüm yöntemi önerilmiştir. Önerilen WH yöntemi, literatürde aynı amaç için kullanılan gri ilişkisel analiz yönteminin sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Kullanım kolaylığını arttırmak amacıyla MATLAB ortamında Grafik Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface - GUI) tasarlanmıştır. Önerilen yöntem yalnızca klinik değerlendirmedeki sübjektif farklılıkların neden olduğu yanlış teşhisi azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda erken tanı ile yağlı karaciğer ve yağlanmanın derecelendirilmesinin kantitatif olarak belirlenmesini de sağlayacaktır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 14/11/2019  
Düzelme: 17/02/2020  
Kabul: 28/03/2020

### Anahtar Kelimeler

Karaciğer Yağlanması,  
Karaciğer Yağlanma Seviyesi,  
Ultrason İle Görüntüleme,  
Ağırlıklandırılmış Histogram,  
MATLAB Arayüzü

### Keywords

Fatty Liver,  
Liver Fat Level,  
Ultrasound Image Processing,  
Weighted Histogram,  
MATLAB GUI

## Histogram-based quantitative grading on ultrasonographic images of a fatty liver

### Abstract

An abnormal fat accumulation in the liver can damage the liver cells and cause liver diseases. If the fat accumulation in the liver is diagnosed in the early stages; the functional abnormalities associated with fatty liver can be revealed and the severity of its can be assessed. There are several medical imaging techniques to diagnose fatty liver and determine the grade of fat in the liver. One of these techniques is the ultrasound imaging, which is non-invasive, cost-effective and easily accessible. However, there is always a need for an expert opinion to determine the level of fat in the liver from ultrasound images. Furthermore, the level of fat in the same liver image may be interpreted differently by the same or another expert when evaluated at different times. In order to increase objectivity and assist the expert, in this paper, a new quantitative measurement method called the Weighted Histogram (WH) is proposed to determine and grade the fatty liver from ultrasound images. The proposed WH method was compared with the results of the Gray Relational analysis method used for the same purpose in the literature. A Graphical User Interface (GUI) is designed to grade the fatty liver with MATLAB to improve ease of use. The proposed methodology will not only reduce false diagnosis caused by subjective differences in clinical assessment, but also quantitative assessment of fatty liver and grade by early diagnosis.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karaciğerde trigliseritlerin ve diğer yağların anormal birikmesi karaciğer yağlanmasına neden olur. Karaciğerde az miktarda yağ birikmesi normaldir. Ancak birikmiş yağ, karaciğer ağırlığının % 5'inden fazla ise o zaman karaciğer yağlanması teşhisi konulur ve yağlanmanın ileriki aşamaları daha ciddi yapısal anormalliklere yol açabilir [1]. Karaciğer yağlanmasına çoğunlukla obezite, diyabet, kandaki yüksek yağ seviyeleri, bazı ilaçların yan etkileri ve alkol kullanımı neden olur. Alkole bağlı olmayan yağlanmaya Alkolik Olmayan Yağlı Karaciğer Hastalığı (Nonalcoholic Fatty Liver Disease - NAFLD) denir. Alkolik Olmayan Yağlı Karaciğer Hastalığı, basit yağlanma ve Alkolik Olmayan Steatohepatit (Nonalcoholic Steatohepatitis - NASH) olarak ikiye ayrılır. NASH durumunda, karaciğerdeki fazladan yağ ek olarak, alkolik yağlı karaciğer hastalığına benzer şekilde hücrelerde bozulma ve iltihaplanma gibi bir durum ortaya çıkar. NASH'in sonraki aşamaları siroza neden olabilir [2,3]. Yapılan çalışmalar, NAFLD'nin obezite, insülin direnci, dislipidemi (kolesterol yüksekliği), ateroskleroz (atardamarın intima tabakasında yağ birikmesi) ve koroner kalp hastalığı ile ilişkili olduğunu göstermiştir [4].

Karaciğer yağlanmasının varlığı kanda bulunan belirli enzimlerin (AST ve ALT gibi) artışıyla, karaciğer hacminin artmasıyla veya başka bir hastalığın tespit edilmesi için yapılan rutin tetkiklerde ortaya çıkar. Örneğin, böbrek taşı hastalarının tetkiklerinde, hacmi artan karaciğerin fark edilmesiyle yağlanma teşhis edilebilir [5]. Kanda bulunan enzim değerlerinin oranı karaciğer yağlanması hakkında kesin bir yargıya varmamız için yeterli değildir. Çünkü bazı durumlarda AST ve ALT enzimlerinin salınımı karaciğer yağlanmasından bağımsız olarak artabilir. Yine aynı şekilde enzimlerin normal seviyede olması yağlanma yoktur gibi bir sonuç çıkarmamız için de yeterli değildir [6]. Bu nedenle kan testinin yanısıra karaciğerdeki yağlanmanın tespitinde ultrason, Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging - MRI), Bilgisayarlı Tomografi (Computed Tomography - CT) gibi tıbbi görüntüleme yöntemlerinden de yararlanılmaktadır [7]. Yukarıda bahsedilen görüntüleme yöntemleri ve kan testine ek olarak karaciğerdeki yağlanmanın seviyesini belirlemek için kullanılacak yöntemlerden bir tanesi de biyopsidir. Doğruluk oranı yüksek olmasına rağmen, alınan dokunun hastalığın araştırılması için gerekli bulgulara sahip olmama ihtimali işlemin tekrarlanması gereksinimi oluşturur. Cerrahi bir operasyon olduğu için işlem sırasında çeşitli komplikasyonlar oluşabilir [8]. Bundan dolayı, karaciğerde yağlanma seviyesi tespitinde genellikle tıbbi görüntüleme teknikleri kullanılır. Ayrıca, karaciğerdeki yağlanma seviyesine ilişkin ilerleme-gerileme durumunun takibi için de söz konusu görüntüleme tekniklerinden faydalanılır. MRI vücudumuzda bulunan hidrojen atomlarının frekanslarındaki farklılıklar temel alınarak geliştirilmiş kesitsel bir görüntüleme yöntemidir [9]. Ancak MRI ile görüntüleme yönteminin maliyeti yüksektir. CT ise, dokuların X-ışınını soğurma derecesine göre görüntü oluşturmak için kullanılan radyolojik bir görüntüleme yöntemidir. Hastalar CT sırasında hem radyasyona maruz kalırlar hem de bazı durumlarda damardan ilaç enjekte edilmesi gerekebilir [10]. Ultrason ile görüntüleme yönteminde ise yüksek frekanstaki ses dalgaları kullanılır. Bu dalgaların farklı ortamlardaki yansımaları dikkate alınarak bir görüntü elde edilir. İnvaziv olmayan ve radyasyon içermeyen bir teknik olduğu için hastalara bilinen bir zararı da yoktur [11]. Diğer görüntüleme tekniklerine göre daha hızlı sonuç alınır ve maliyeti de oldukça düşüktür [12,13]. Bu özelliklerinden dolayı, karaciğer yağlanmasının tespit ve takibinde ultrason en çok kullanılan görüntüleme tekniğidir.

Radyologlar, ultrason görüntüsündeki karaciğerin ekojenite artışını gözlemleyerek karaciğer yağlanmasını tespit ederler. Ekojenite, ultrason görüntüleme tekniğinde kullanılan ses dalgalarının yansımaları sonucu oluşan yankıdır. Ses dalgasının gönderildiği bölgede ekojenite fazlaysa o alan ultrason görüntüsünde daha beyaz görünür [14].

Karaciğer yağlanması Derece-1, Derece-2 ve Derece-3 olmak üzere üç farklı seviyede değerlendirilir. Hastanın hangi seviyede karaciğer yağlanmasına sahip olduğunun derecelendirmesi yapılırken bir uzman görüşüne ihtiyaç duyulmaktadır. Uzman, çeşitli damarların ve diyaframın ultrason görüntülerindeki görünümü, karaciğer ekojenitesinin (parlaklığının) böbrek ile karşılaştırılması gibi bulguları dikkate alarak değerlendirmesini yapar. Ancak, belirgin farklılıklar bulunmayan görüntüler uzman değerlendirmesi açısından yeterli olmayabilir. Aynı şekilde hastalığın takibi yapılırken de ilerleme/gerileme durumunun değerlendirilmesinde zorluklar yaşanabilir. Belli aralıklarla yapılan iki muayene arasında çok küçük farklılıklar varsa, uzman belirgin farkları göremediği için hastalığı aynı seviyede değerlendirebilir. Bu durum karaciğer yağlanması için tedavi uygulanan hastanın psikolojisini



olumlu yönde etkilemez [15,16]. Bundan dolayı, karaciğer yağlanma evresine ilişkin subjektif değerlendirme etkilerinin azaltılması gerekmektedir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, özellikle medikal alanda bilgisayar destekli teşhis sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [17]. Ultrason görüntülerinden yağlı karaciğer ve karaciğer hastalıklarını değerlendirme üzerine son yıllarda önemli araştırmalar yapılmıştır. Virmani ve ark. karaciğer ultrason görüntülerinden normal, sirozlu ve HCC (hepatoselüler karsinomu [18]) şeklinde karaciğer görüntülerini gruplamak amacıyla dalgacık paket dönüşümü [Wavelet Packet Transform (WPT)] ile öznelilikler çıkarmışlar ve bu öznelilikleri Destek Vektör Makineleri [Support Vector Machine (SVM)] tabanlı sınıflandırıcıda kullanarak %88.8 doğruluk oranı elde etmişlerdir [19]. Owjimer ve ark. karaciğer ultrason görüntülerini yağlı, normal ve heterojen şeklinde sınıflandırabilmek amacıyla her bir karaciğer ultrason görüntüsüne WPT tekniğini uygulamış ve görüntülere ilişkin istatistiksel özellikleri (öznelilikleri) çıkarmışlardır. Elde edilen bu öznelilikleri SVM ve K-En Yakın Komşu [K-nearest neighbor (K-NN)] sınıflandırıcılarında kullanarak performansları karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu %97.9 doğrulukla SVM yönteminden elde etmişlerdir [20]. Santos ve ark. karaciğer ultrason görüntülerinde normal ve yağlı karaciğer görüntülerini sınıflandırabilmek için karaciğer görüntüleri üzerinde doku analizi, karaciğer ve böbrek arasındaki ekojenite farkı ve karaciğer parankiminin zayıflaması gibi yaklaşımları birarada kullanan yeni bir yöntem geliştirmişler ve yapay sinir ağları yöntemi (YSA) ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda, YSA ile 0,77 doğruluk oranı elde edilirken önerilen yöntem ile bu oran 0.79 olarak hesaplanmıştır [21]. Mukherjee ve ark. karaciğer ultrason görüntülerinde, tek biçimli dokusal özellik tanımlayıcıları matrisini oluşturmuş ve bu matrise SOM yöntemini uygulayarak tanımlayıcı öznelilik vektörlerini (maksimum olasılık ve tekdüzelik) elde etmişlerdir. Bu vektörleri iki boyutlu SOM uzayında eğiterek normal ve yağlı karaciğer ultrason görüntülerine ait grafikleri üst üste çizdirmişler, neredeyse hiç çakışma olmayacak şekilde normal ve yağlı karaciğer ultrason görüntülerini iki kümeye ayırabilmişlerdir [22]. Andrade ve ark. yağlı ve normal karaciğeri ultrason görüntülerinden tanımak için GLRLM, GLCM ve fraktal boyut gibi çeşitli dokusal analiz modelleriyle öznelilik çıkarıp, SVM, K-NN ve YSA gibi 3 farklı sınıflandırıcıda kullanmış, sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçlarına göre SVM'de %79.77, K-NN'de %74.05 ve YSA'da ise %76.92 doğruluk oranlarını elde etmişlerdir [23]. Ultrason görüntüleri üzerinde genel olarak karaciğer yağlanmasına ilişkin yapılan bilgisayar destekli tanı çalışmaları normal, yağlı ya da hastalıklı karaciğer şeklinde ayırım yapmaya odaklanmıştır. Ultrason görüntüleri kullanılarak karaciğer yağlanması için kantitatif derecelendirme ise ilk defa İçer ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada görülmüştür [24]. Bu çalışmada yağlı karaciğer ultrason görüntülerinde yağlanma derecesini belirlemek için Gri İlişkisel Analiz'e [Gray Relational Analysis (GRA)] dayanan bir yöntem önerilmiştir. GRA yöntemi referans serisi ile karşılaştırma serisi arasındaki uzunluk değişkenlerini kullanan bir tanı modelidir. Çalışmada, karaciğer ve böbrek üzerinden anlamlı bölgeler [Region of Interest (ROI)] seçilmiş ve GRA yöntemi uygulanarak derecelendirme yapılmıştır. Kantitatif yağlı karaciğer derecelerine ek olarak, klinik doktorlar tarafından belirlenen teşhis sonuçlarına göre de tatmin edici sınıflandırma sonuçları elde etmişlerdir. Ancak, böbreğin eksik veya hastalıklı olması durumunda GRA yöntemi ile karşılaştırma yapılamayacaktır ve böylece karaciğer yağlanma seviyesi belirlenemeyecektir.

Bu çalışmada, karaciğerdeki yağlanma seviyesini nicel olarak ölçmek için histogram tabanlı yeni bir yöntem Ağırlıklandırılmış Histogram - Weighted Histogram (WH) geliştirilmiştir. Ayrıca, böbreğin olmaması ya da hastalıklı olmasının ortaya çıkaracağı olumsuz durumu gidermek için böbrek yerine kas dokusu referans olarak seçilmiştir. Önerilen yöntem subjektif değerlendirmenin etkilerini azaltarak uzmana yardımcı olmakla birlikte yağlı karaciğer hastalığının ilerleyişini ve iyileşmesini incelemek için kantitatif değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Üretilen nicel değer ile hastalığın takibi yapılırken bir önceki muayeneye göre oluşan farklılık hastaya iletilebilecektir.

Ayrıca, çalışmada, karaciğer ve kas dokusu üzerinden seçilen ROI'ler üzerinde önerilen WH yöntemi ile GRA yönteminin sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere önerilen WH yöntemi GRA yönteminden daha hassas bir derecelendirme imkanı sunmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen bölümleri aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Bölüm 2'de kullanılan yöntemin aşamaları anlatılmıştır. Bölüm 3'te elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

### 2.1. Ultrason Görüntülerinde İlgilenilen Bölgeleri Belirleme (Determine The Regions Of Interest In The Ultrason Images)

Ultrason görüntü özelliklerini nicel olarak analiz etmek için, tüm karaciğer alanı farklı yönlerden incelenmiş ve yağlı karaciğer tanı ve derecelendirmesine en uygun olduğu düşünülen yerlerden kan damarları ve kanalları hariç tutulmak üzere 20x20 piksel boyutunda 4 bölge belirlenmiştir. Bu bölgelerden bir tanesi referans olarak karın kası üzerinden, diğer üç tanesi ise karşılaştırma yapmak amacıyla karaciğer dokusu üzerinden seçilmiştir. Referans bölgesinin karın kas dokusu olarak tercih edilmesinin nedeni, diğer organlarla kıyaslandığında kas bölgesinde hastalık olma ihtimalinin çok daha düşük olmasıdır. Böylece, hastalıklı dokulardaki ekojenitenin farklı olması sebebiyle oluşabilecek yanlış değerlendirmelerin önüne geçilebilecektir. Seçilen bölgelere, MATLAB ortamında, önerilen WH yöntemi ile GRA yöntemi ayrı ayrı uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 2.1. Ağırlıklandırılmış Histogram (Weighted Histogram - WH)

Görüntü işleme uygulamalarında sıkça kullanılan histogram, sayısal görüntüdeki ton dağılımını gösteren bir grafiştir. Bu grafiğe bakarak görüntünün parlaklığı yada tonları hakkında bilgi sahibi olunabilir. Çalışmada, 256 seviyeli (8 bit) gri tonlamalı, 1024 x 1024 piksel boyutunda sayısal ultrason görüntüleri [25] kullanılmıştır. Söz konusu görüntülere histogram yöntemi uygulandığında görüntünün parlaklığına bağlı olarak 256 gri seviye içerisinde tüm piksel değerleri ilk 100 değerde toplanırsa karaciğer yağlanma bulgusunu (beyaza yakın piksel seviyelerini) fark etmek zorlaşır. Bu zorluğu giderebilmek için, çalışmada beyaza yakın piksellere daha fazla ağırlık verilerek tekrar hesaplanması önerilmiştir. Diğer medikal görüntü işleme çalışmalarında olduğu gibi ultrason görüntülerinde de görüntünün tamamı değil sadece değerlendirme açısından anlam ifade edecek bölgeler radyolog tarafından seçilir [22]. Seçilen bölgelerin histogramları alınır. Elde edilen histogramlar beyaz piksellere daha fazla ağırlık verilerek tekrar hesaplanır ve böylece ağırlıklandırılmış yeni histogramlar elde edilir. Önerilen WH yöntemi ile karaciğer yağlanmasının tespitini sağlayan algoritmanın adımları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

**1. Adım:** Ultrason görüntüsündeki karın kası bölgesinden referans olarak kullanılmak üzere bir alan seçilir. Seçilen bu alan referans bölge olarak kullanılacaktır ve boyutu  $n \times m$  pikseldir ( $n=20, m=20$ ). Seçilen referans görüntüsünün matris karşılığı Denklem 1'deki gibidir.

$$R = \begin{bmatrix} r_{(1,1)} & r_{(1,2)} & \cdots & r_{(1,m)} \\ r_{(2,1)} & r_{(2,2)} & \cdots & r_{(2,m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{(n,1)} & r_{(n,2)} & \cdots & r_{(n,m)} \end{bmatrix} \quad 1$$

**2. Adım:** Ultrason görüntüsü üzerindeki karaciğere ait bölgeden karşılaştırma yapılmak üzere  $k$  tane alan seçilir. Seçilen karşılaştırma alanlarının boyutu  $n \times m$  pikseldir ( $n=20, m=20, k=3$ ). Karşılaştırma görüntülerinin matrisi Denklem 2'deki gibidir

$$C_k = \begin{bmatrix} c_{(1,1)} & c_{(1,2)} & \cdots & c_{(1,m)} \\ c_{(2,1)} & c_{(2,2)} & \cdots & c_{(2,m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{(n,1)} & c_{(n,2)} & \cdots & c_{(n,m)} \end{bmatrix} \quad 2$$

**3. Adım:** Benek (speckle) gürültüsünü kaldırmak için seçilen dört alan üzerine Wiener filtresi uygulanır. Benek gürültüsü, medikal görüntülerin elde edilmesi sırasında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Ultrason görüntülerinde gürültü, ses dalgalarını göndermek için kullanılan prob'un görüntü alınmak istenen bölgeyle doğru şekilde temas etmemesi, hava boşluğunun kalması gibi nedenlerle oluşur [26, 27]. Kullanılan yöntemin adımları Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 5'te açıklanmıştır [28].

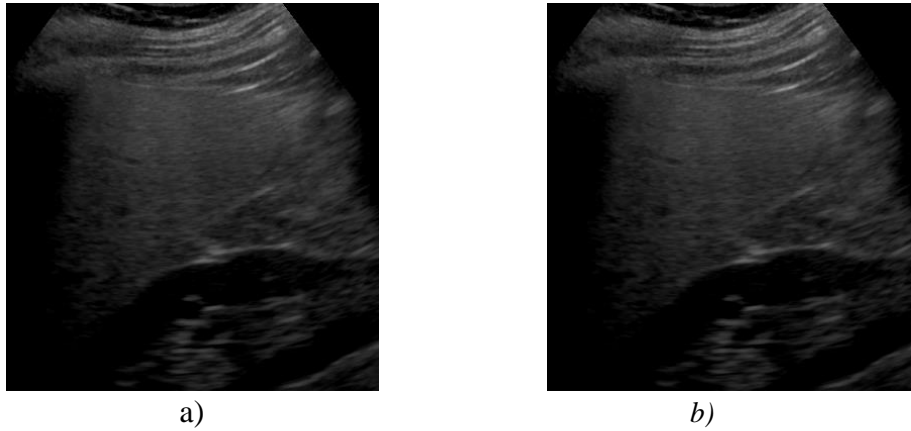
$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in n} a(n_1, n_2) \quad 3$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in n} a^2(n_1, n_2) - \mu^2 \quad 4$$

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu) \quad 5$$

Denklem 3'te her bir pikselin çevresinde yerel ortalama hesaplanır. Buradaki  $a$  görüntüyü,  $n$  görüntüdeki piksel sayısını,  $n_1$  ve  $n_2$  ise o pikselin konumlarına karşılık gelmektedir.  $N$  ve  $M$  görüntünün boyutudur. Denklem sonucunda elde edilen  $\mu$  ise yerel ortalamadır. Her bir piksel etrafındaki varyans değeri Denklem 4 ile hesaplanır. Denklem 3 ve Denklem 4'te hesaplanan yerel ortalama ve varyans kullanılarak Denklem 5'teki Wiener filtreleme eşitliği oluşturulur. Denklem 5'teki  $v^2$  görüntünün varyansıdır.

Şekil 1.a'da benek gürültüsü içeren bir karaciğer ultrason görüntüsü ve Şekil 1.b'de Wiener filtresi uygulanan karaciğer ultrason görüntüsü görülmektedir.



**Şekil 1.** (a) Benek gürültüsü bulunan ultrason görüntüsü (b) Wiener filtresinden geçirilen benek gürültüsüne sahip ultrason görüntüsü.

**4. Adım:** 1. ve 2. adımlarda seçilen bölgelere 3. adımda Wiener filtresi uygulandıktan sonra bu adımda o bölgelere ait görüntülerin histogramları hesaplanır. Histogram bir imgede bulunan piksellerin matematiksel olarak renk değerlerine göre sınıflandırılmasıdır. Bir görüntüde bulunan piksel yoğunluğudur da denilebilir [29].

Histogram yönteminin uygulanması sonucu elde edilen diziler Denklem 6 ve Denklem 7'de verilmiştir. Bu dizilerin boyutları  $1 \times 256$ 'dır ( $t=256$ ). Denklem 7'deki  $i$  değeri 1'den  $k$ 'ye kadardır. Çalışmada  $k=3$  olarak seçilmiştir ( $n = 20$ ,  $m = 20$ ,  $k=3$  ve  $i = 1, 2, \dots, k$ ).

$$R_h = [r_{(1,1)} r_{(1,2)} r_{(1,3)} \dots r_{(1,t)}] \quad 6$$

$$C_{hi} = [c_{(1,1)} c_{(1,2)} c_{(1,3)} \dots c_{(1,t)}] \quad 7$$

**5. Adım:** Denklem 6 ve Denklem 7'de hesaplanan histogramlar beyaz piksellere ağırlık verilecek şekilde tekrar hesaplanır ve böylece yeni ağırlaklandırılmış histogram değerleri (Denklem 8 ve Denklem 9) elde edilmiş olur.

$$R_{wh} = \sum_{t=0}^{255} \sum_{\alpha=0}^{255} R_h(t) * \alpha \quad 8$$

$$C_{whi} = \sum_{t=0}^{255} \sum_{\alpha=0}^{255} C_{hi}(t) * \alpha \quad 9$$

**6. Adım:** Referans görüntü ile karşılaştırma görüntüleri arasındaki ağırlıklı histogram farkları sırasıyla alınır ve farkların toplamı hesaplanır. Hesaplanan değer normalleştirilerek ve 0 ile 100 arasında bir sonuç üretilir (Denklem 10).

$$WH = \sum_{i=1}^k R_{wh} - C_{whi} \quad 10$$

### 2.3. Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis - GRA)

GRA tekniği, çeşitli çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [30-32]. Bu analiz yöntemi ilk önce Deng [33] tarafından sunulmuştur. GRA yönteminin karaciğer yağlanma derecesini belirlemek için karaciğer ultrason görüntülerine ilk defa uygulanması İçer ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada görülmüştür [24]. Ancak, referans bölge olarak böbrek dokusundan seçim yapılmıştır. Böbreğin hastalıklı olması durumunda yanlış değerler elde edilecektir. Hatta böbreğin eksik olması durumunda GRA yöntemi ile karaciğer yağlanmasına ilişkin bir sonuç üretilemeyecektir. Çalışmamızda, karaciğer yağlanma analizi için kas ve karaciğer dokusundan seçilen bölgelere GRA yöntemi de uygulanmış ve önerilen WH yöntemi ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Literatürde birkaç farklı GRA yöntemi sunulmuştur. Çalışmamızda kullanılan GRA yönteminin aşamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [32,34,35].

- Referans serisi Denklem 11'de ve karşılaştırma serisi ise Denklem 12'de gösterilmiştir. Belirlenen  $i$  tane karşılaştırma serisi Denklem 11'de verilen referans  $x_0$  ile karşılaştırılacaktır.

$$x_0(k) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k)\} k = 1, 2, \dots, m \quad 11$$

$$x_i(k) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)\}, k = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n \quad 12$$

- Denklem 13'te verilen  $X$  matrisi Denklem 11 ve Denklem 12'nin birleştirilmiş halidir. Bu çalışmada  $n = 4$ 'tür. Birincisi referans değerleri karşılaştırma yapılacak serilerdir.

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad 13$$

- Farklı faktörler arasında karşılaştırma yapılmaması için serilere normalizasyon uygulanmalıdır. Farklı şekillerde normalizasyon yapılabilir. Normalizasyon için kullanılacak üç yöntem Denklem 14, Denklem 15 ve Denklem 16'da verilmiştir.

$$x_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad 14$$

$$x_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad 15$$

$$x_i(k) = \frac{|x_i(k) - x_0(k)|}{\max x_i(k) - x_0(k)} \quad 16$$

- Karşılaştırma serisi ile referans seriler arasındaki mutlak fark Denklem 17'de hesaplanmıştır. Tüm karşılaştırma serilerine uygulanan denklem sonucunda elde edilen matris Denklem 18'deki gibidir.

$$\Delta x_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad 17$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} x_{01}(1) & x_{01}(2) & \dots & x_{01}(m) \\ x_{02}(1) & x_{02}(2) & \dots & x_{02}(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{0n}(1) & x_{0n}(2) & \dots & x_{0n}(m) \end{bmatrix} \quad 18$$

- Gri ilişki katsayısı, referans ve karşılaştırma serileri arasındaki mutlak fark matrisi üzerinden Denklem 19'daki formül kullanılarak hesaplanır. Ayırt edici katsayı çalışmamızda  $\xi = 0.5$  olarak alınmıştır. Bu değer 0 ve 1 arasında bir değer olarak belirlenir [36].

$$x_i(k) = \frac{\Delta \min + \xi \Delta \max}{\Delta x_i(k) + \xi \Delta \max} \quad 19$$

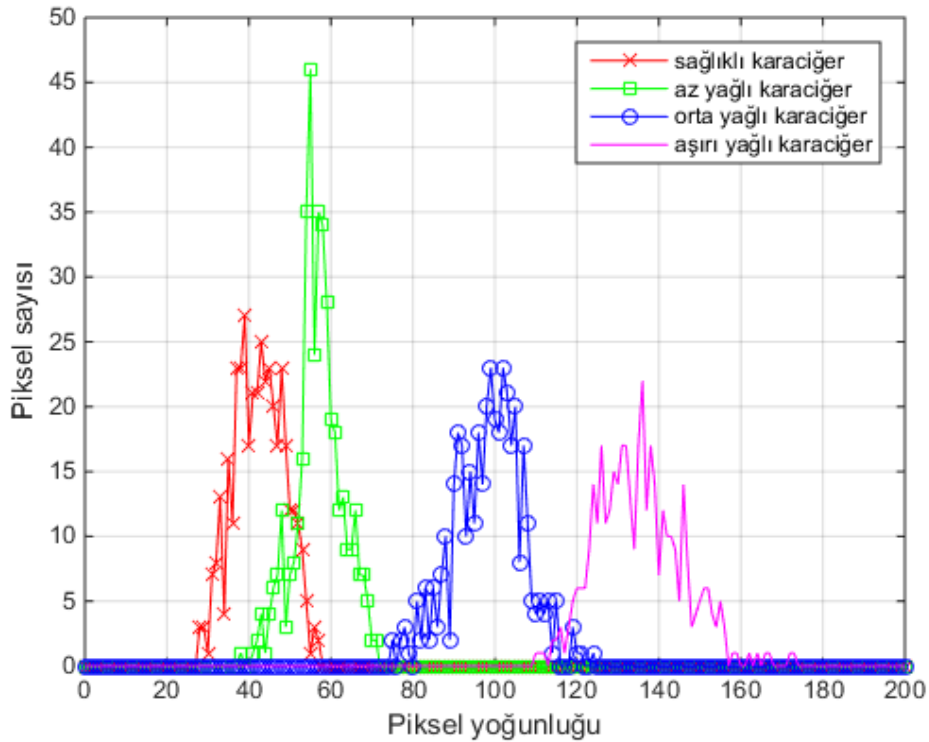
- Denklem Gri ilişki derecesi Denklem 20’de hesaplanmıştır. Denklemdeki  $w(j)$   $k$  faktörünün toplam etkiye oranıdır yani  $k$  faktörünün ağırlığıdır.  $w(j)$ ’nin toplamı %100’dür.

$$x_i(k) = \sum(w(k) * x_i(j)) \quad 20$$

### 3. AĞIRLIKLANDIRILMIŞ HİSTOGRAM (WH) VE GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ (GRA) İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Çalışmada, ultrason görüntüleri kullanılarak, karaciğer bölgesinden seçilen üç bölge ile karın kas bölgesinden seçilen bir bölge (referans) karaciğer yağlanma seviyesini belirlemek için karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilen WH yönteminin geçerliğini göstermek için elde edilen nicel sonuçlar literatürde karaciğer yağlanma seviyesini hesaplamak üzere kullanılan GRA yöntemi ile de karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem, sağlıklı, Seviye-1 (hafif yağlı karaciğer), Seviye-2 (orta yağlı karaciğer) ve Seviye-3 (aşırı yağlı karaciğer) durumundaki karaciğer ultrason görüntülerinden uzman yardımıyla seçilen bölgeler üzerine uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan ultrason görüntüleri [25, 37-39]’da verilen kaynaklardan elde edilmiştir.

Sağlıklı karaciğer ve farklı seviyelerde yağlı karaciğere sahip ultrason görüntülerinden seçilen bölgelerin histogram grafikleri Şekil 2’de görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, yağlı karaciğer durumunda piksellerin ortalama parlaklık değerleri arasında oldukça belirgin farklılıklar vardır. Çünkü karaciğerdeki yağlanma seviyesi arttıkça, ultrason görüntüsünün parlaklığı artar [22]. Bundan dolayı, sağlıklı karaciğerin histogramı en solda yer alırken karaciğerdeki yağlanma seviyesi (parlaklık) arttıkça histogramlar da sağa doğru kaymaktadır. Bir diğer ifadeyle aşırı yağlı karaciğer en sağda yer almaktadır. Şekil 2’de görülen bu farklı histogram yoğunlukları önerilen WH yönteminin geçerliliğini ve elde edilen sonuçları destekler.

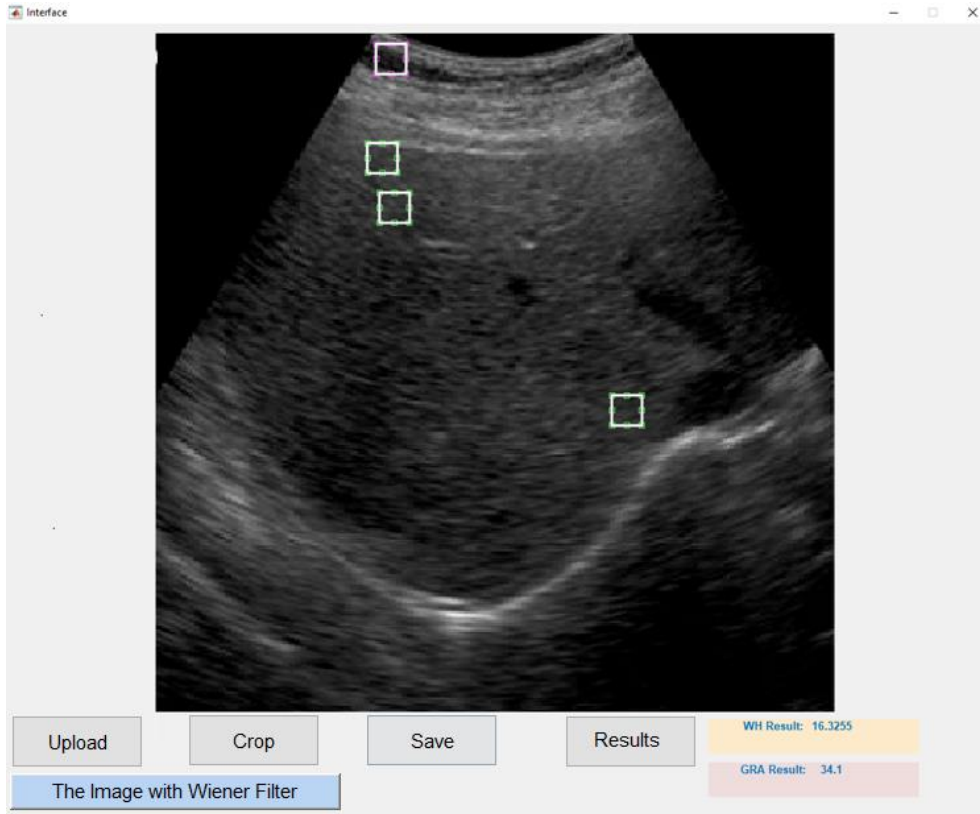


**Şekil 2.** Sağlıklı kas, sağlıklı karaciğer ve farklı seviyelerdeki yağlı karaciğerin histogram grafiği

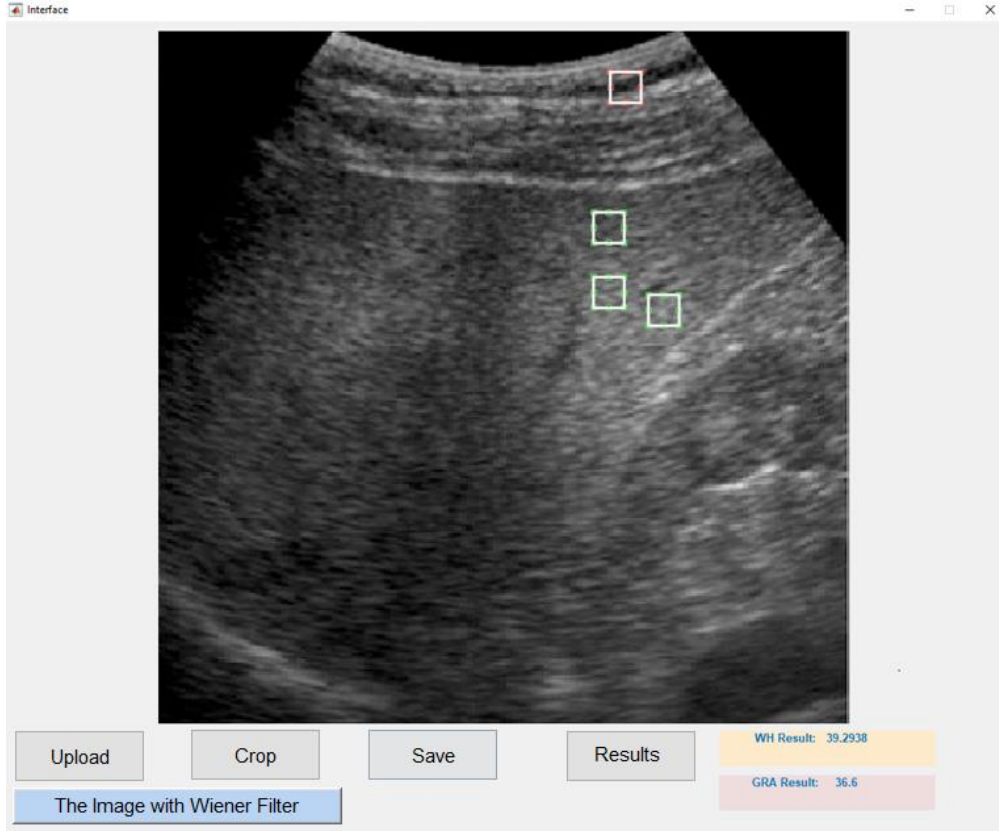
Karaciğer yağlanma seviyesi analizinin görsel bir şekilde yapılabilmesi amacıyla MATLAB ortamında bir GUI tasarlanmıştır. GUI’de, uzman kullanıcının karaciğer görüntü analizini yapmak üzere istediği görüntüyü yükleyebilmesi için bir buton (upload), görüntünün analizinde kullanılacak bölgelerin seçimi

İçerisinde bir buton (crop), seçilen bölgelerdeki benek gürültüsü kaldırmak için bir buton (The image with Wiener filter), önerilen WH ve mevcut GRA yöntemlerinin seçilen bölgelere uygulanması sonucu elde edilen sonuçları göstermek için bir buton (Results) oluşturulmuştur. Ayrıca, karaciğer görüntüsü üzerinde yapılan işlemlerin gösterildiği bir alan da ayrılmıştır.

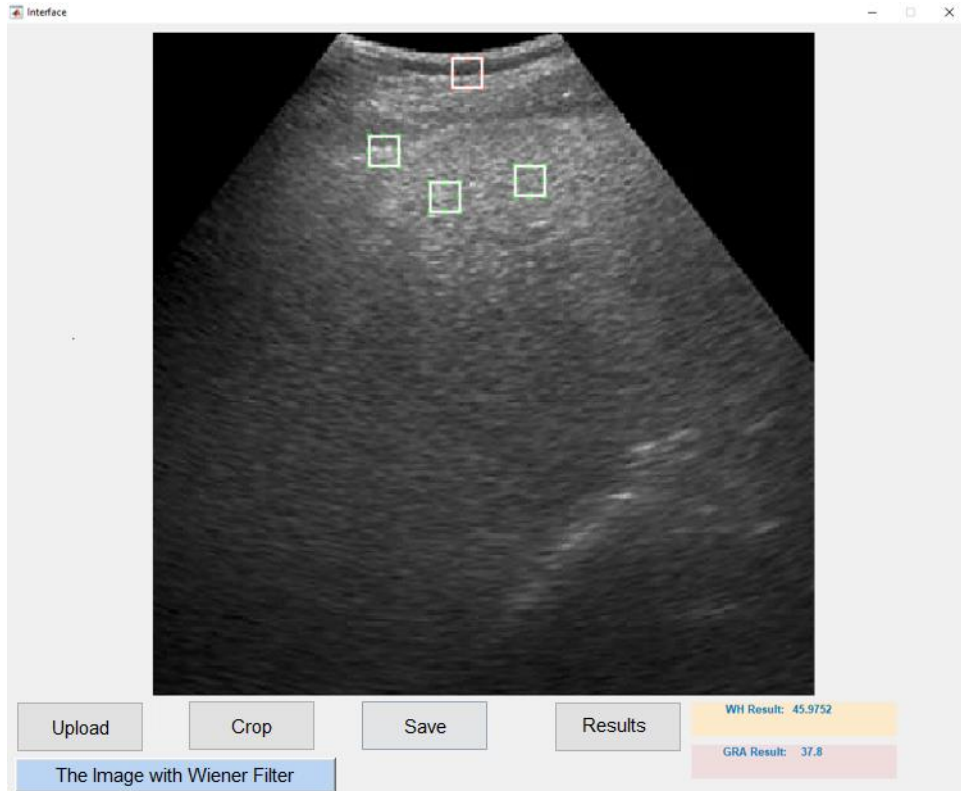
Karaciğer yağlanma seviyesinin analizi, uzman bir radyolog tarafından ultrason görüntüleri üzerinde, MATLAB GUI yardımı ile yağlı karaciğer seviyesinin değerlendirilmesinde en etkin alanlardan dört bölge seçilerek gerçekleştirilir. Şekil 3, WH ve GRA yöntemlerinin az yağlı karaciğer ultrason görüntüsüne uygulanması ile elde edilen örnek sonuçları göstermektedir. Önerilen WH yöntemi ile 16.32 değeri elde edilirken ve bu değer GRA için 34.1 olarak bulunmuştur. Şekil 4’te orta seviyede yağlı bir karaciğere ait ultrason görüntüsü bulunmaktadır. Görüntü üzerinde seçilen bölgelere WH yönteminin uygulanması ile yağlanma indeksi 39.29 olarak ölçülürken, GRA yöntemi ile bu indeks 36.6 olarak ölçülmüştür. Son olarak Şekil 5’de aşırı yağlı bir karaciğere ait ultrason görüntüsü vardır. Söz konusu görüntü üzerinde önerilen WH yöntemi ile yağlanma indeksi 45.97 olarak hesaplanırken, GRA yöntemi ile yağlanma indeksi 37.8 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.** Az seviyede yağlı karaciğer,  $WH = 16.32$ ,  $GRA = 34.1$



**Şekil 4.** Orta seviyede yağlı karaciğer,  $WH = 39.29$ ,  $GRA = 36.6$



**Şekil 5.** Aşırı seviyede yağlı karaciğer,  $WH = 45.97$ ,  $GRA = 37.8$

Önerilen yöntemin geçerliliğini göstermek amacıyla, farklı karaciğer ultrason görüntüleri üzerine WH ile GRA yöntemleri uygulanmış ve elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 1’de listelenmiştir. Tablo 1’den görüleceği üzere, az yağlı karaciğer görüntüsü (Görüntü 1) için önerilen WH yöntemi ile 19.37 değeri elde edilirken GRA yöntemi ile bu değer 20.15 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, orta yağlı karaciğer görüntüsü için (Görüntü 5) WH ile 30.67 değeri elde edilirken GRA için bu değer 32.80 olarak bulunmuştur. Son olarak, aşırı yağlı karaciğer görüntüsü (Görüntü 9) için önerilen WH yöntemi ile 40.23 sayısal değeri hesaplanırken GRA yöntemi ile aynı karaciğer ultrason görüntüsünde 38.20 indeks değeri elde edilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı seviyelerde yağlanma derecesine sahip karaciğer ultrason görüntülerine [25, 37-39] ait sonuçlar

| <b>Görüntü no</b> | <b>WH</b> | <b>GRA</b> | <b>Karaciğerin Yağlanma Derecesi</b> |
|-------------------|-----------|------------|--------------------------------------|
| Görüntü 1         | 19.37     | 20.15      | Az Yağlı                             |
| Görüntü 2         | 16.53     | 20.6       | Az Yağlı                             |
| Görüntü 3         | 15.49     | 29.3       | Az Yağlı                             |
| Görüntü 4         | 14.42     | 23.45      | Az Yağlı                             |
| Görüntü 5         | 30.67     | 32.8       | Orta Yağlı                           |
| Görüntü 6         | 21.81     | 34.55      | Orta Yağlı                           |
| Görüntü 7         | 33.7056   | 34.6       | Orta Yağlı                           |
| Görüntü 8         | 25.37     | 34.1       | Orta Yağlı                           |
| Görüntü 9         | 40.23     | 38.2       | Aşırı Yağlı                          |
| Görüntü 10        | 43.8415   | 36.5       | Aşırı Yağlı                          |

Tablo1’den açıkça görüleceği üzere az yağlı karaciğerdeki yağlanma seviyesi referans olarak seçilen kas dokusuna göre önerilen WH yönteminde 14 ile 20 arasında değer alırken GRA metodunda ise 20 ile 30 arasında değerler almıştır. Benzer şekilde, orta yağlı karaciğer ultrason görüntülerinde WH yönteminde 20 ile 35 arasında GRA yönteminde 30 ile 35 arasında değerler elde edilmiştir. Son olarak, aşırı yağlı karaciğer ultrason görüntülerinde WH yönteminde 35 ve üzeri değerler elde edilirken GRA yönteminde 35 ile 40 arasında değerler elde edilmiştir. Her bir karaciğer ultrason görüntüsündeki yağlanmaya ilişkin hesaplanan WH ve GRA değerlerinin farklı olması her iki yöntemin içerdiği matematiksel ilişkiden kaynaklanmaktadır.

Önerilen WH yöntemi ile birlikte GRA yönteminin karaciğer ultrason görüntülerine kas dokusu referans alınarak uygulanması ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki yöntemin sonuçlarının karaciğerde biriken yağ miktarı arttıkça arttığı görülmektedir. Ancak, karaciğerdeki yağlanma seviyesi arttıkça, önerilen WH yöntemi ile elde edilen sayısal indeks değerleri GRA yöntemi ile elde edilen yağlanma sayısal indeks değerlerinden daha fazla artış göstermektedir. Bu durum, önerilen WH yönteminin sayısal değer aralığının GRA yönteminden daha geniş olduğuna (daha hassas sonuçlar ürettiğine) işaret eder. Bu nedenle, sunulan yöntem WH yağlı karaciğer seviyesinin belirlenmesinde daha hassastır.



#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Karaciğer yağlanması erken aşamalarda tespit edilmesi hastalığın kontrol edilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla MRI, BT ve ultrason gibi çeşitli görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır. Karaciğer yağlanması tespitinde invaziv olmayan, uygun maliyeti ve kolay erişilebilir olması sebepleriyle en yaygın kullanılan görüntüleme tekniği ultrasondur. Bununla birlikte, yağlı karaciğerin ultrason ile teşhisinde, radyoloğun bilgisine ve görsel algısına dayanan öznel bir değerlendirme vardır. Nesnelliği arttırmak ve operatör bağımlılığını azaltmak için, bu çalışmada, yağlı karaciğeri ultrason görüntülerinden belirlemek ve derecelendirmek için yeni bir nicel değerlendirme yöntemi önerilmiştir. Önerilen WH yöntemi ile literatürde aynı amaç için kullanılan GRA yönteminin aynı karaciğer ultrason görüntüsüne uygulanması sonucu elde edilen sayısal sonuçları karşılaştırılmıştır. WH yönteminin GRA yönteminden daha hassas sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemin bir diğer avantajı ise referans görüntü olarak böbrek yerine kas görüntüsünü kullanan bir algoritmaya dayanmasıdır. Bu nedenle, önerilen yöntem klinik tanıların doğruluğu, etkinliği ve tekrarlanabilirliğinde önemli ilerlemeler sağlar.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini bizlerle paylaşan Uzm. Dr. Radyolog Ender Evcik'e teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çolak, Y., Tuncer, İ. Nonalkolik karaciğer yağlanması ve steatohepatit. İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Sürekli Eğitim Tıp Etkinlikleri, 58(91-98), (2017).
- [2] Kleiner, D. E., Brunt, E. M., Van Natta, M., Behling, C., Contos, M. J., Cummings, O. W., et al. Design and validation of a histological scoring system. *Hepatology*, 41(1313-1321), (2005).
- [3] Sonsuz, A., Baysal, B. Karaciğer yağlanması ve non alkolik steatohepatit. *Güncel Gastroentoloji*, 15(98-106), (2011).
- [4] Gaggini, M., Morelli, M., Buzzigoli, E., Defronzo, R., Bugianesi, E., Gastaldelli, A. Non-Alcoholic fatty liver disease (NAFLD) and its connection with insulin resistance, dyslipidemia, atherosclerosis and coronary heart disease. *Nutrients*, 5(1544-1560), (2013).
- [5] İçer, S., Coşkun, A., İkizceli, T. Quantitative grading using grey relational analysis on ultrasonographic images of a fatty liver. *Journal of Medical Systems*, 36(2521-2528), (2012).
- [6] Chen, H. Y., Wang, J. R., Lu, K. Y. The evaluation of liver function via grey relational analysis. *IEEE Int. Conf. on Sys., Man and Cybernetics*, (783-786), (2009).
- [7] Zeng, Q. L., Li, D. D., Yang, Y. B. VIKOR method with enhanced accuracy for multiple criteria decision making in healthcare management. *Journal of Medical Systems*, 37(9908), (2013).
- [8] İmamoğlu, F. G., İmamoğlu, Ç., Çiledağ, N., Arda, K., Tola, M. Düzgöl, C. Classification of hepatosteatosis with ultrasonography and analysis of the effect of hepatosteatosis degree on the liver function tests. *Medical Journal of Muğla Sıtkı Koçman University*, 2(23-28), (2015).
- [9] Acharya, U.R., Fujita, H., Sudarshan, V.K., Mookiah, M.R.K., Koh, E.W.J., Tan, J.H., et al. An integrated index for identification of fatty liver disease using radon transform and discrete cosine transform features in ultrasound images. *Information Fusion*, 31(43-53), (2016).

- [10] Kodama, Y., Ng, C. S., Wu, T. T., Ayers, G. D., Curley, S. A., Abdalla, E. K. et al. Comparison of CT methods for determining the fat content of the liver. *American Journal of Roentgenology*, 188(1307-1312), (2007).
- [11] Singh, M., Singh, S., Gupta, S. An information fusion based method for liver classification using texture analysis of ultrasound images. *Inf Fusion*, 19(91-6), (2013).
- [12] İdilman, İ. S., Karçaaltıncaba, M. Karaciğer yağlanması tanısında ve yağlanma miktarının belirlenmesinde radyolojik tanı yöntemleri, *Güncel Gastroentoloji*, 18(112-118), (2014).
- [13] Lupsor, M. P., Stefanescu, H., Mureşan, D., Florea, M., Erzsebet, M. S., Maniu, A., et al. Noninvasive assessment of liver steatosis using ultrasound method. *Med. Ultrasound*, 16(236-245), (2014).
- [14] Strauss, S., Gavish, E., Gottlieb, P., Katsnelson, L. Interobserver and intraobserver variability in the sonographic assessment of fatty liver, *American Journal of Roentgenology*, 189(320-323), (2007).
- [15] Yoneda, M., Suzuki, K., Kato, K., Fujita, K., Nozaki, Y., Hosono, K., et al. Nonalcoholic fatty liver disease: US-based acoustic radiation force impulse elastography. *Radiology*, 256(640-647), (2010).
- [16] Saadeh, S., Younossi, Z. M., Remer, E. M., Gramlich, T., Ong, J. P., Hurley, M., Mullen, K. D., Cooper, J. N., Sheridan, M. J. The utility of radiological imaging in nonalcoholic fatty liver disease. *Gastroenterology*, 123(745-50), (2002).
- [17] Dandil, E. Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleri Üzerinde Karaciğer Bölgesinin Bilgisayar Destekli Otomatik Bölütleme Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(712-728), (2019).
- [18] Bharti, P., Mittal, D., Ananthasivan, R. Computer-aided Characterization and Diagnosis of Diffuse Liver Diseases Based on Ultrasound Imaging: A Review. *Ultrasonic Imaging*, 39(33-61), (2017).
- [19] Virmani, J., Kumar, V., Kalra, N., Khandelwal, N. SVM-based characterization of liver ultrasound images using wavelet packet texture descriptors. *Society for imaging informatics in medicine*, 26(530-543), (2012).
- [20] Owjimer, M., Danyali, H., Helfroush, M. S. An improved method for liver diseases detection by ultrasound image analysis. *Journal of Medical Signals Sensors*, 5(21-9), (2015).
- [21] Santos, J., Silva, J. S., Santos, A. A., Soares, P. B. Detection of pathologic liver using ultrasound images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 14(248-255), (2014).
- [22] Mukherjee, S., Chakravorty, A., Ghosh, K., Roy, M., Adhikari, A., Mazumdar, S., Corroborating the subjective classification of ultrasound images of normal and fatty human livers by the radiologist through texture analysis and SOM. *IEEE 15th International Conference on Advanced Computing and Communications*, (197-202), (2007).
- [23] Andrade, A., Silva, J.S., Santos, J., Belo-Soares, P., Classifier approaches for liver steatosis using ultrasound images. *Procedia Technol*, 5(763-70), (2012).
- [24] İçer, S., Coşkun, A., İkizceli, T. Quantitative grading using grey relational analysis on ultrasonographic images of a fatty liver. *Journal of Medical Systems*, 36(2521-2528), (2012).
- [25] Subramanya, M., Kumar, V., Mukherjee, S., Saini, M. A CAD system for B-mode fatty liver ultrasound images using texture features. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 39(123-130), (2015).

- [26] Kaur, K. Digital image processing in ultrasound images. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 1(388-393), (2013).
- [27] Shetti, P. P., Patil, A. P. Performance comparison of mean, median and wiener filter in MRI image de-noising. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 2(371-375), (2017).
- [28] MATLAB, 27 Şubat 2019, <https://ch.mathworks.com/help/images/ref/wiener2.html>.
- [29] Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2009). *Digital Image Processing (Third edition)*. Pearson International Edition.
- [30] Lin, Y., H., Lee, P. C., Chang, T. P. Practical expert diagnosis model based on the grey relational analysis technique. *Expert Systems with Applications*, 36(1523–1528), (2009).
- [31] Chang, C. L., Tsai, C. H., Chen, L., Applying grey relational analysis to the decathlon evaluation model, *International Journal of The Computer. The Internet and Management*, 11(54–62), (2003).
- [32] Senger, Ö., Albayrak, Ö. K., A Study on performance appraisal by gray incidence analysis. *International Journal of Economic & Administrative Studies*, 17(235-258), (2016).
- [33] Deng, L. Introduction to grey system theory. *The Journal of Grey System*, 1(1–24), (1989).
- [34] Chen, H. Y., Wang, J. R., Lu, K. Y. The evaluation of liver function via grey relational analysis, *IEEE Int. Conf. on Sys., Man and Cybernetics*. 783-786, 2009
- [35] Xu, W., Hou, Y., Ye, Z. A fast image match method based on water wave optimization and gray relational analysis. *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*, (771-776), (2017).
- [36] Slavek, N., Jovic, A. Application of grey system theory to software projects ranking. *Automatika*, 53(284-293), (2012).
- [37] Mehta, S.R., Thomas, E. L., Patel, N., Crofton, M. E. Imaging of non alcoholic fatty liver disease: A road less travelled. *Hepatology Research*, 40(399-406), (2010).
- [38] Mahale, A.R., Prabhu, S.D., Nachiappan, M., Fernandes, M., Ullal, S. Clinical relevance of reporting fatty liver on ultrasound in asymptomatic patients during routine health checkups. *J Int Med Res.*, 17(4447-4454), (2018).
- [39] Singh, D., Das, C.J., Baruah, M. P. Proton magnetic resonance spectroscopy and ultrasound for hepatic fat quantification. *PubMed*, 17(990-994), (2013).

## Investigation of the Effects of Cutting Parameters on Diameter Change and Burr Height in Drilling of HSLA Steel with Gray Relational Analysis Method

 Yusuf SİYAMBAŞ<sup>1,\*</sup>  Yakup TURGUT<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, Merkez/Erzincan

<sup>2</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 03/02/2020

Revision 28/03/2020

Accepted: 12/04/2020

#### Highlights

- Cutting tool performance
- HSLA material
- Machinability properties

#### Keywords

 Drilling  
 Diameter Change  
 Burr Height  
 Gray Relational Analysis

In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm/rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills. Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

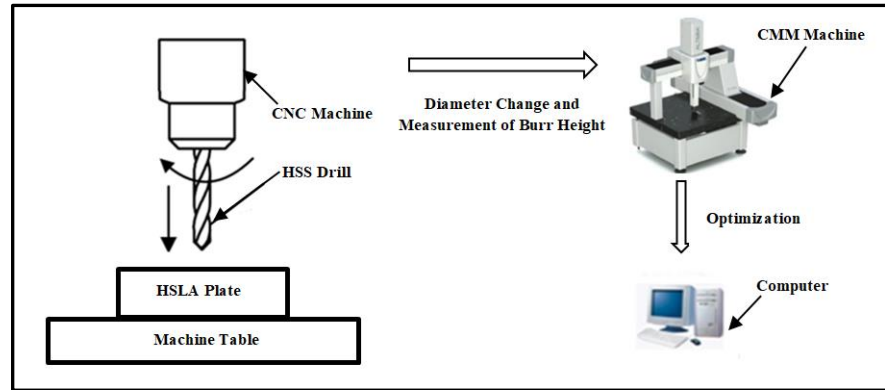


Figure A. Schematic view of the operations performed

**Purpose:** In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm / rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills.

**Theory and Methods:** Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. The experiments were performed according to Taguchi  $L_{18}$  orthogonal experiment design. The results of the experiments were optimized with the help of gray relational analysis method. ANOVA method was used in order to determine the most effective parameter on the process.

**Results:** According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

**Conclusion:** It was found that diameter change and burr height values were lower in uncoated tools compared to TiAlN coated drills. In drilling HSLA material with HSS drills, the optimum drilling parameters for diameter change and burr height were determined using the gray relational analysis method.



## HSLA Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği Üzerindeki Etkilerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Araştırılması

Yusuf SİYAMBAŞ<sup>1,\*</sup> Yakup TURGUT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Merkez/ERZİNCAN

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA) yüksek mukavemet, hafiflik ve işlenebilirlik gibi mühendislik özelliklerinden dolayı otomotiv sanayisinde tercih edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada, TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar ile üç adet kesme hızı (18, 26, 34 m/dak) ve üç adet ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) değeri kullanılarak kesme parametrelerinin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Delik delme işlemleri ıslak şartlarda ve boydan boya gerçekleştirilmiştir. Deneysel Taguchi L18 ortogonal deney tasarımına göre yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları gri ilişkisel analiz yöntemi yardımıyla optimize edilmiştir. İşlem üzerindeki en etkili parametrenin belirlenmesi için anova metodu kullanılmıştır. Gri ilişki derecesi değerine göre, çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinde, en uygun parametrelerin kaplamasız matkaplar, 0,05 mm/dev ilerleme hızı ve 34 m/dak kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.

### Investigation of the Effects of Cutting Parameters on Diameter Change and Burr Height in Drilling of HSLA Steel with Gray Relational Analysis Method

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 03/02/2020  
Düzeltilme: 28/03/2020  
Kabul: 12/04/2020

#### Anahtar Kelimeler

Delik Delme  
Çap Değişimi  
Çapak Yüksekliği  
Gri İlişkisel Analiz

#### Keywords

Drilling  
Diameter Change  
Burr Height  
Gray Relational Analysis

#### Abstract

High strength low alloy steels (HSLA) are preferred in the automotive industry due to their engineering properties such as high strength, light weight and machinability. In this experimental study, the effects of cutting parameters on diameter change and burr height were investigated by using three cutting speeds (18, 26, 34 m / min) and three feed rate (0.05, 0.075, 0.1 mm / rev) values with TiAlN coated and uncoated HSS drills. Drilling operations were carried out in wet conditions and throughout. The experiments were performed according to Taguchi L18 orthogonal experiment design. The results of the experiments were optimized with the help of gray relational analysis method. ANOVA method was used in order to determine the most effective parameter on the process. According to the gray relationship degree value, the most suitable parameters in terms of diameter change and burr height values were determined as uncoated drills, 0.05 mm/rev feed rate and 34 m/min cutting speed.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çelikler, otomobillerin yük taşıyan kısımlarında, süspansiyon sistemlerinde, destek parçalarında, çapraz elemanlarda, boyuna kirişler ve şasi bileşenleri gibi parçaların üretilmesinde etkin rol oynamaktadır [1]. Otomotiv endüstrisinde, güç kaybetmeden ağırlığı azaltılmak amacıyla HSLA çelikleri kullanılmaktadır. HSLA çelikleri, kendileri ile yakın mekanik özelliklere sahip olan karbon çeliğinden %20-30 oranında daha hafiftir. Bu avantajı ile ağırlık tasarrufu sağlaması ve beraberinde yakıt tüketiminin azalmasından dolayı bu çeliklerin kullanımı artmıştır [2]. Delik delme işlemi imalatta en çok kullanılan yöntemler arasındadır. Matkaplar talaşlı üretimde en çok kullanılan kesici takımlardandır [3]. Bir araştırmaya göre havacılık endüstrisinde yapılan delik delme çalışmalarının tüm talaş kaldırma operasyonları içerisindeki payının %40 olduğu ifade edilmiştir [4].

Talaşlı imalatta daha yüksek talaş kaldırma oranları ve kesme hızları oldukça önemlidir. Bu koşullar ekonomik takım ömrü ile iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için kesici takımlar üzerine yapılan kaplamalar ile sağlanmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlar, modern delme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Kesici takım teknolojisinin ilerlemesinde en büyük teknolojik katkılardan biride, kesiciler üzerine yüksek aşınma direncine sahip olan sert kaplamaların uygulanmasıdır. Son yıllarda tek ve çok katmanlı kaplamalar, kaplama teknolojisindeki önemli gelişmelerin bir sonucu olarak daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarında kullanılmaya başlanmıştır [6]. Titanyum alüminyum nitrür (TiAlN) kaplamaların oksidasyon direnci, tokluğu, sertliği ve korozyon direnci daha yüksek olduğu için, titanyum nitrür (TiN) kaplamalarına alternatif olarak geliştirilmiştir [7-9]. TiAlN kaplamalar düşük ısı iletkenliği ve sürtünme özelliklerinden dolayı yüksek hızlarda kullanılır. Ayrıca TiAlN gibi oksidasyon direnci yüksek kaplamalar imalat maliyetlerini düşürmek ve metal kesme işlemlerinde verimliliği artırmak için kullanılmaktadır. [10-12].

Helisel matkaplar ile delik delmede deliğin boyutsal tamlığını, daireselliğini ve yüzey kalitesini en fazla matkap ucunda oluşan titreşimler etkilemektedir [13]. Delme operasyonlarında genel olarak üç farklı titreşim oluşmaktadır. Bunlar, yanal zırlama, burulma-eksenel zırlama ve eksenel dönme titreşimleri olarak ifade edilmektedir. Bu titreşim tiplerinden herhangi birinin oluşması düzensizliğe sebep olmaktadır. Meydana gelen zırlama titreşim frekansı, matkap doğal frekansına yaklaştıkça dönel titreşim kararsızlığı neredeyse her iş mili hızında oluşmaktadır [14]. Dönel düzensizlik deliğin her yönünde meydana gelir ve bu düzensizlik yanal ve burulma- eksenel titreşimlerini arttırarak deliğin ölçü tamlığını ve matkap ucunu bozmaktadır [13]. İstenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde kesme parametrelerinin uygunluğu işleme zamanının kılmasına ve bunun sonucu olarak işleme maliyetlerinin düşürülmesinde son derece önemlidir.

Delme işleminde iş parçası üzerinde çapak oluşumu endüstride karşılaşılan yaygın bir sorundur. Arzu edilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde kesme parametreleri malzemenin çeşidi ve işlenmesiyle uygun olmalıdır. Çapak, delme işlemi sırasında deliğin merkezinde kesicinin ilerlemesi ile yüksek basınçtan ötürü meydana gelen plastik şekil değiştirmedir. [15]. Delme işlemi sırasında meydana gelen çapağın temizlenmesi, malzemenin deforme olmasına, ek bir çalışma süresine ve beraberinde ek bir maliyet oluşturmamasından ötürü verimli bir işlem olmayıp olabildiğince düşürülmelidir. Çapak oluşumu deliğin girişinde ve çıkışında oluşmaktadır. Delik çıkışında meydana gelen çapak, delik girişindeki göre çok daha fazla oluşmaktadır. Delik çıkışındaki çapak boyu, girişten daha fazla olduğundan çapak oluşumu ile ilgili sorunların çıkış bölgesinde meydana geldiği söylenmektedir [3].

Çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Kıvak ve ark. AISI 316 malzemesinin farklı katman kalınlığındaki kaplamalı matkaplarla delinmesinde delik kalitesini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kesme hızı değerinin artması ile delik çapı değerinde artma olduğunu ve çap değişiminde en etkili parametrenin kesme hızı olduğunu ifade etmişlerdir[16]. Yaman ve ark. Ti6Al4V alaşımının farklı uzunluktaki kaplamasız HSS matkaplarla delinmesinde işleme şartlarına göre takım boyunun delik toleranslarına olan etkisini incelemişlerdir. Farklı uzunluktaki HSS matkaplarla aynı işleme şartlarında yapılan delme işlemlerinde, kısa matkapların daha iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir [14]. Rahman ve Mamat, pirinç malzemenin mikro delinmesinde işleme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delinen deliklerin doğruluğu değerlendirildiğinde, matkap çapı, ilerleme hızı ve devir sayısı değerlerinin artması ile delik çapı doğruluğunda bir azalma olduğunu söylemişlerdir [17]. Kumar ve Packiaraj, OHNS malzemenin HSS matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey kalitesi, takım aşınması, talaş kaldırma oranı ve çap değişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda delik çap doğruluğu üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğunu belirtmişlerdir. [18]. Mavi, Dubleks paslanmaz çeliklerden 1.4462 kalite paslanmaz çelik malzemenin kaplamalı karbür takımlarla (TiAlN ve TiN) delinmesinde kesme parametrelerinin silindiriklikten ve çaptan sapma değerlerini araştırmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerlerin gri ilişkisel analiz yöntemi ile optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede en uygun kesme parametrelerinin TiN kaplamalı takım, en düşük ilerleme hızı ve en düşük kesme hızı olduğunu ifade etmiştir [19]. Kıvak ve ark. Inconel 718 malzemesinin TiN ve TiAlN kaplamalı ve kaplamasız kesicilerle delinmesinde işleme parametrelerinin delik kalitesi (dairesellik ve delik çapı) üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tüm kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında, delik

çapları için en iyi değerler kaplanmamış matkaplarla elde edilmiştir. Ayrıca ilerleme hızı değeri arttıkça her üç takım için de delik çaplarının arttığını gözlemlemişlerdir. [20] Tsao ve Hocheng, yaptıkları çalışmada farklı uç açıları ile farklı kesme şartlarında karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit (CFRP) malzemenin delinmesi sonucunda elde edilen delik çapları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, ilerleme hızı ve matkap çapının delme performansında en etkili faktör olduğu belirtilmiştir [21]. Gaitonde ve ark. AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin farklı çaplarda, uç açıları ve helis açıları HSS matkaplar ile delinmesinde kesme hızı ve ilerleme hızı değerlerini kullanarak çapak oluşumunun azaltılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, kesme hızı ve ilerleme hızının çapak oluşumu üzerine önemli bir etken olduğu söylemişlerdir. Çapak oluşumunu azaltmak için kesme hızı ve ilerleme hızının düşürülmesi ve daha büyük çap ve uç açısına sahip matkapların kullanılması gerektiği tespit etmişlerdir [22]. Kaplan ve ark. AISI D2 ve AISI D3 çeliklerinin farklı çaplardaki HSS matkaplarla delinmesinde delik çıkışındaki çapak oluşumunu incelemişlerdir. İşleme parametreleri kesme hızı ve ilerleme hızı olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda, ilerlemenin artması ile çapak boyunun azaldığı; delinen deliklerin sayısı, kesme hızı ve malzemenin sertliğinin artması ile çapak boyunun yükseldiğini gözlemlemişlerdir [23]. Tosun, AISI 4140 çelik malzemesinin delinmesinde gri ilişkili analiz yöntemini kullanarak çapak oluşumunda etkili olan kesme parametrelerini (kesici takım malzemesi, kesme hızı, matkap uç açısı ve ilerleme) optimize etmiştir. Çalışmada, çapak yüksekliğine etki eden parametrelerin önem sırasına göre matkap malzemesi, kesme hızı, devir başına ilerleme ve matkap uç açısı şeklinde olduğunu belirtmiştir [24]. Kılıçkap ve Hüseyinoğlu, AISI 304 paslanmaz çeliğin delinmesi işleminde kesme hızı, ilerleme hızı ve uç açısı gibi işleme parametrelerinin oluşan çapak boyu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delik delme parametrelerinin çapak yüksekliği üzerindeki etkileri yanıt yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak değerlendirilmiş ve çapak yüksekliğini minimize etmek için optimum delme koşulları genetik algoritma (GA) uygulaması kullanılarak belirlenmiştir. GA optimizasyon sonuçlarına göre en düşük çapak boyunun düşük kesme hızı, ilerleme hızı ve daha büyük uç açısında elde edildiğini ifade etmişlerdir [25]. Gaitonde ve Karnik, Yapay Sinir Ağı (ANN) modeli kullanarak AISI 316L paslanmaz çeliğin delinmesi sırasında çapak yüksekliğini ve çapak kalınlığını en aza indirmek amacıyla belirli bir matkap çapı için ilerleme hızı ve uç açısının en iyi kombinasyon değerlerini seçmek üzerine bir çalışma yapmışlardır. Gereken çapak büyüklüğü modellerini tam faktoriyel tasarımına göre planlanan delme deneyleri ile yapay sinir ağı kullanılarak geliştirilmiştir. Belirlenen bir matkap çapı için çapak yüksekliği ilerleme hızındaki artışla artarken, düşük ilerleme hızı değerlerinde belirtilen tüm matkap çapları için minimum değerde olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca büyük matkap çapı değerleri için uç açısı arttıkça çapak yüksekliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir [26]. Yağmur ve ark. AISI 1050 malzemesinin delinmesinde kesme parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kesme parametreleri için kaplamalı ve kaplamasız matkaplar ile üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmadan alınan veriler kullanılarak Taguchi yöntemi ile optimum işleme parametreleri ortaya konulmuştur. Taguchi metoduna göre, kaplamalı kesici için optimum parametrelerin, kesme hızının orta değeri (90 m/dak) ve ilerleme hızının en düşük değeri (0,15 mm/dev) olduğunu ifade etmişlerdir [27].

Yapılan literatür araştırması sonucunda HSLA çeliklerinin delinebilirliği ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu ancak farklı alanlarda bir çok çalışmanın yapıldığı görülmüştür. HSLA çeliklerinin tormalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş biçimleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı [28-30], frezeleme işlemlerinde kaplamalı kesiciler ve farklı soğutma sistemlerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin kıyaslandığı [31-33] ve kaynak edilebilirliği [34-37] ile ilgili araştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada ise HSLA çeliğinin delinmesinde oluşan çap değişimi ve çapak yüksekliğine, kesme parametrelerinin ve matkapların etkisinin gri ilişkisel analiz yöntemi ile değerlendirilip optimum sonuçların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND MEDHOD)

### 2.1. Deneysel Malzemesi (Experiment Material)

Delik delme deneyleri için otomotiv endüstrisinde önemli bir yere sahip olan HSLA çeliği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan plakaların ölçüleri 100x80x4 mm şeklindedir. HSLA çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** HSLA-DIN EN 10149 çelik malzemenin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

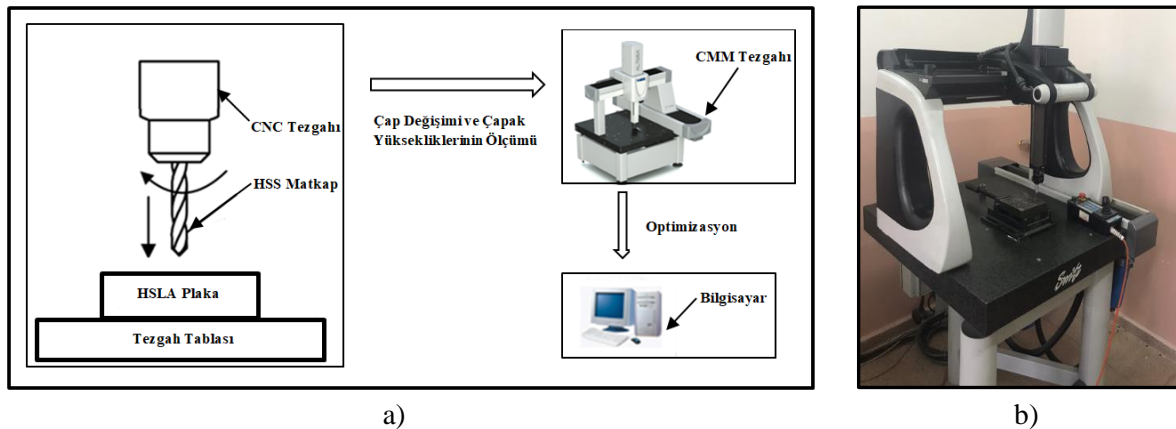
| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | Nb   | Ti   | V    | Fe    |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 0,12 | 0,50 | 1,50 | 0,025 | 0,020 | 0,015 | 0,09 | 0,15 | 0,20 | Kalan |

### 2.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgahı (Machine Tool Used in The Experiments)

Delik delme deneyleri, Johnford VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde ıslak şartlarında gerçekleştirilmiş olup, Hocut 3380 marka (%20 emülsiyon) kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde kesme sıvısı CNC tezgâhına ait soğutma sistemi ile kesici ve iş parçası üzerine tek taraftan püskürtülerek kullanılmıştır. Çap değişimi ve çapak yükseklikleri ölçümleri üç boyutlu CMM cihazında yapılmıştır. Ölçme işlemi, üç ayrı noktadan koordinat alınarak ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması ile çap değişimi ve çapak yükseklikleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri Tablo 2’de, çap değişimi ve çapak yükseklikleri optimizasyonunda takip edilen işlemlerin şematik görünümü ve ölçüm yapılan CMM tezgahının fotoğrafı şekil 1’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Tezgâhın gücü                  | 7,5 KW           |
| Maksimum devir sayısı          | 6000 dev/dak     |
| Sırayla x, y, z ekseninde kurs | 550, 500, 450 mm |
| Ölçü Hassasiyeti               | 0,001 mm         |
| İşletim Sistemi                | Fanuc            |



**Şekil 1.** a) Yapılan işlemlerin şematik görünümü, b) Ölçüm yapılan CMM tezgâhının görünümü

### 2.3. Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri (Cutting Tools and Cutting Parameters)

Kesici takım olarak TiAlN kaplamalı ve kaplamasız HSS matkaplar kullanılmıştır. Çalışmada işleme parametreleri üretici firmanın verileri ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak üç adet ilerleme hızı ve üç adet kesme hızı değeri seçilmiştir (Tablo3 ve Tablo4).

**Tablo 3.** Kesme parametreleri

|                        |      |       |     |
|------------------------|------|-------|-----|
| İlerleme hızı (mm/dev) | 0,05 | 0,075 | 0,1 |
| Kesme hızı (m/dak)     | 18   | 26    | 34  |



**Tablo 4.** Deneylerde kullanılan kesici takımlar

| Kesici takım         | Üretici kodu | Çap (mm) | Kaplama bileşimi | Kaplama kalınlığı (μ) | Uç açısı | Helis açısı | Helis boyu (mm) |
|----------------------|--------------|----------|------------------|-----------------------|----------|-------------|-----------------|
| Kaplamasız HSS takım | UFL A1148    | 8        | -                | -                     | 130°     | 30°         | 24              |
| Kaplamalı HSS takım  | UFL TFL 1149 | 8        | TiAlN            | 3                     | 130°     | 30°         | 24              |

## 2.4. Gri İlişkisel Analizi Metodu (Grey Relational Analysis Method)

Bu çalışmada GİA analiz yöntemi ile HSLA çeliğinin delinmesinde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. GİA ile deney çalışmalarının değerlendirilmesinde excel tabloları kullanıldı. İki farklı matkap türü, üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı kesme hızı arasından çap değişimi ve çapak yüksekliği ölçüm değerlerine göre en ideal matkap, ilerleme hızı ve kesme hızının belirlenmesi sağlanmıştır. GİA yöntemine göre yapılan değerlendirme aşağıda sırası ile anlatılmıştır.

1. Adım: Verilerin normalize edilmesi.

Bu aşamada, deney sonuçlarının 0-1 aralığında normalleştirilir. Normalizasyon işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta hangi yaklaşıma göre yapılacağıdır. Gri ilişkisel analiz yönteminde serideki noktaların küçük değerlerde olması istenen bir durumsa lineer normalizasyonda küçük değer alan noktalar normalizasyonda 1'e yakın değerler alırken, büyük değer alan noktalar "0" a yakın değerler alacaktır [38]. Eğer amaç "daha yüksek daha iyi" yaklaşımı ise normalizasyon aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (1)$$

$x_i^0(k)$ , i serisi k. sıradaki orjinal değer,  $x_i(k)$  normalizasyon sonrası i. seri k. sıradaki değer,  $\min x_i^0(k)$  i serisindeki minimum değer,  $\max x_i^0(k)$  i serisindeki maksimum değerdir. "Daha düşük daha iyi" için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2)$$

"İdeal değer en iyi" için aşağıdaki formül kullanılır.

$$x_i(k) = 1 - \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (3)$$

Formüldeki  $x^0$  olması gereken değeri ifade etmektedir.

2. Adım: k, n uzunluğundaki serideki k. sırayı gösterebilir.  $\varepsilon(x_0(k), x_i(k))$ , k. noktadaki gri ilişkisel katsayı olup formül 4, 5, 6 ve 7'e göre hesaplanır.

$$\varepsilon(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (4)$$

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (6)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (7)$$

$\xi \in (0-1)$  arasında bir değer olup genellikle 0,5 alınması tavsiye edilmiştir [39].  $\xi$  işlevi,  $\Delta_{0i}$  ile  $\Delta_{\max}$  arasındaki farkı ayarlamaktır.

3. Adım: Gri ilişkisel derecenin hesaplanması aşağıdaki formül ile yapılır.

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_i(k)) \quad (8)$$

$\gamma(x_0, x_i)$  gri bir sistemdeki  $x_i$  serisi ile  $x_0$  referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür. Gri ilişkisel derecesinin büyüklüğü  $x_i$  ile  $x_0$  arasında kuvvetli bir ilişki olduğunun göstergesidir. Eğer karşılaştırılan iki seri birbirinin aynısı ise gri ilişkisel derece değeri 1 olarak bulunur. Gri ilişkisel derece karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir.

## 2.5. Kontrol Faktörleri ve Taguchi Metodu ile Deneysel Tasarım (Experimental Design with Control Factors and Taguchi Method)

Deneysel çalışma için üç seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneysel tasarım için iki farklı matkap, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Minitab programı ile üç seviyeli Taguchi L18 deney tasarımı yapılmıştır. Tablo 5’de tasarımın seviyeleri ve kontrol faktörleri verilmiştir.

**Tablo 5.** Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeler

| Sembol | Kesme parametreleri | Seviyeler  |           |     |
|--------|---------------------|------------|-----------|-----|
|        |                     | 1          | 2         | 3   |
| A      | Takım               | Kaplamasız | Kaplamalı | -   |
| B      | İlerleme (mm/dev)   | 0,05       | 0,075     | 0,1 |
| C      | Kesme hızı (m/dak)  | 18         | 26        | 34  |

Tablo 5’deki faktörlerden yararlanılarak deneyler için kullanılan parametrelerin çap değişimi ve çapak yüksekliğine olan etkilerinin belirlenmesi için Tablo 6’da oluşturulan deney tasarımı verilmiştir.

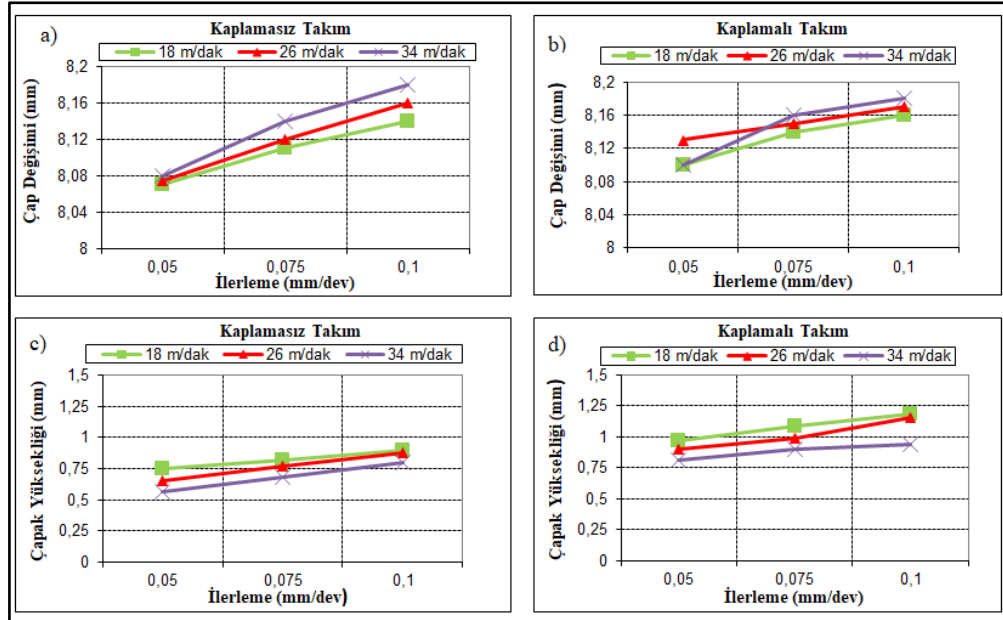
**Tablo 6.** Taguchi L18 ortogonal deney tasarımı

| Deney No | A | B | C | Kesici Takım | İlerleme Hızı mm/dev | Kesme Hızı m/dak | Çap Değişimi (mm) | Çapak Yüksekliği (mm) |
|----------|---|---|---|--------------|----------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 1        | 1 | 1 | 1 | Kaplamasız   | 0,05                 | 18               | 8,07              | 0,75                  |
| 2        | 1 | 1 | 2 | Kaplamasız   | 0,05                 | 26               | 8,075             | 0,65                  |
| 3        | 1 | 1 | 3 | Kaplamasız   | 0,05                 | 34               | 8,08              | 0,56                  |
| 4        | 1 | 2 | 1 | Kaplamasız   | 0,075                | 18               | 8,11              | 0,82                  |
| 5        | 1 | 2 | 2 | Kaplamasız   | 0,075                | 26               | 8,12              | 0,77                  |
| 6        | 1 | 2 | 3 | Kaplamasız   | 0,075                | 34               | 8,14              | 0,68                  |
| 7        | 1 | 3 | 1 | Kaplamasız   | 0,1                  | 18               | 8,14              | 0,9                   |
| 8        | 1 | 3 | 2 | Kaplamasız   | 0,1                  | 26               | 8,16              | 0,88                  |
| 9        | 1 | 3 | 3 | Kaplamasız   | 0,1                  | 34               | 8,18              | 0,8                   |

|    |   |   |   |           |       |    |      |       |
|----|---|---|---|-----------|-------|----|------|-------|
| 10 | 2 | 1 | 1 | Kaplamalı | 0,05  | 18 | 8,1  | 0,97  |
| 11 | 2 | 1 | 2 | Kaplamalı | 0,05  | 26 | 8,13 | 0,9   |
| 12 | 2 | 1 | 3 | Kaplamalı | 0,05  | 34 | 8,1  | 0,815 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | Kaplamalı | 0,075 | 18 | 8,14 | 1,09  |
| 14 | 2 | 2 | 2 | Kaplamalı | 0,075 | 26 | 8,15 | 0,99  |
| 15 | 2 | 2 | 3 | Kaplamalı | 0,075 | 34 | 8,16 | 0,9   |
| 16 | 2 | 3 | 1 | Kaplamalı | 0,1   | 18 | 8,14 | 1,19  |
| 17 | 2 | 3 | 2 | Kaplamalı | 0,1   | 26 | 8,17 | 1,16  |
| 18 | 2 | 3 | 3 | Kaplamalı | 0,1   | 34 | 8,18 | 0,94  |

### 3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION of TEST RESULTS)

Kesme parametreleri kullanılarak yapılan delik delme deneyleri sonucunda oluşan çap değişimi ve çapak yüksekliği değerleri ölçülmüştür. Kesme hızları, ilerleme hızları ve kesici takım tipine göre çap değişimi ve çapak yüksekliği değişimleri Şekil 2'deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 2. Çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinin kesme hızı, kesici takım ve ilerleme hızına bağlı olarak değişimi

Kaplamalı ve kaplamasız HSS takımlarla, farklı kesme parametrelerinde delinen deliklerin çap değişimi ve çapak yüksekliği değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Şekil 2.a-b'deki grafikler incelendiğinde, bütün kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında, çap değişimi bakımından en iyi sonuç kaplamasız takımlardan alınmıştır. Bütün kesme hızlarında her iki takımında da en iyi çap değerlerinin alındığı ilerleme hızı 0,05 mm/dev'dir. Ayrıca ilerleme hızı arttıkça çap değerleri de artmıştır. Kesme hızları içinde, en iyi sonuç üç ilerleme hızında da 18 m/dak değerinde olmuştur. En büyük çap değerlerinin alındığı ilerleme hızı ise en yüksek ilerleme hızı olan 0,1 mm/dev'dir. Bütün kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında elde edilen çap değerleri nominal çaptan daha büyük olmuştur. İlerleme hızlarının artması ile delik çaplarında artış olması, yüksek kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarında delik çap değerlerinin kötü olması, matkabın malzemeye dalma hızının büyük olmasına bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş miktarının daha fazla olması sonucu kesme işleminin daha zor olması ile açıklanabilir [40]. Ayrıca artan kesme hızının titreşimleri artırması ile delik çaplarının büyümesine sebep olduğu düşünülmektedir [41]. Kesici takımlar açısından değerlendirme yapılırsa, kaplamalı takımlarla yapılan deneylerde delik çaplarındaki değişim kaplamasız takımlara göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi, kesici takım kaplamasından dolayı, kaplamasız kesicilere göre kesici kenar keskinliğinin azalması söylenebilir. Buna bağlı olarak, matkabın parçayı ağızlamasını zorlaştırdığı ve kaplamadan dolayı ezerek kesme yapıldığı da söylenebilir [42]. Şekil 2.c-d'deki grafikler incelendiğinde, ilerleme hızlarının artması

ile çapak yüksekliğinde artış olduğu görülmektedir. Bu durumu, matkabın çıkış esnasında delik sonundaki patlatma hızına bağlamak mümkündür. Yüksek ilerleme hızlarında patlatma hızı daha yüksek, düşük ilerleme hızlarında patlatma hızı daha düşük olmaktadır. Buda çapak yüksekliğini etkilemektedir.

Kesici takımlar açısından değerlendirme yapılırsa, kaplamasız takımlarla yapılan deneylerde, kaplamalı takımlara göre çapak yüksekliğinin daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, kaplamasız kesicilerin kaplamalı kesicilere oranla kesme kenarının daha keskin olması ve kaplamanın kesici kenarda azda olsa kalınlık artışına neden olması ile açıklanabilir. Dolayısı ile kaplamalı kesicilerde aynı cins kaplamasız kesicilere oranla malzemeye batmada zorlanmalar olabilir. Bu sebeple kaplamalı kesicilerde çapak yüksekliği daha fazla oluşmuştur. Kesme hızlarının artması ile çapak yükseklik değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Düşük kesme hızında (18 m/dak) ve yüksek ilerleme hızında (0,1 mm/dev) çapak yüksekliği en fazla olmuştur. 34 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında çapak yüksekliğinin en az olduğu gözlenmiştir. Kesme bölgesinde, yüksek kesme hızından dolayı yüksek delme sıcaklıkları oluşmaktadır. Oluşan bu yüksek delme sıcaklıkları talaş akışını kolaylaştırmaktadır [43]. Dolayısı ile bu talaş akışının kolaylaşması çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır.

### 3.1. Sonuçların Gri İlişkisel Analizi ile Değerlendirilmesi (Evaluation of Results with Gray Relational Analysis)

Gri ilişkisel analiz yöntemine göre yapılan değerlendirmeler tablolarda sunulmuştur. Çalışmada kullanılan çıktılar (çap değişimi ve çapak yüksekliği) için en ideal değerler en küçük değerlerdir. Delik delme işlemi esnasında çap değişimi ve çapak yüksekliği değerinin düşük olması istenen bir durumdur. Bu durumdan ötürü gri ilişkisel analiz yöntemine göre referans serisi oluşturulurken en düşük değerler dikkate alınır ve normalizasyon işlemi sırasında “daha düşük daha iyi” yaklaşımına göre değerlendirilir ve eşitlik 2’deki formülle hesaplanır. Sonuçların normalizasyonu Tablo 7’de verilmiştir. Normalizasyon işleminden sonra sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi elde edilmiş olur. Hesaplanan uzaklık matrisleri de Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7.** Normalizasyon ve uzaklık matrisi değerleri

| Deney no        | Normalizasyon     |                       | Uzaklık matrisi   |                       |
|-----------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
|                 | Çap değişimi (mm) | Çapak yüksekliği (mm) | Çap değişimi (mm) | Çapak yüksekliği (mm) |
| Referans serisi | 1                 | 1                     | 1                 | 1                     |
| 1               | 1                 | 0,6984                | 0                 | 0,3015                |
| 2               | 0,9545            | 0,8571                | 0,0454            | 0,1428                |
| 3               | 0,9090            | 1                     | 0,0909            | 0                     |
| 4               | 0,6363            | 0,5873                | 0,3636            | 0,4126                |
| 5               | 0,5454            | 0,6666                | 0,4545            | 0,3333                |
| 6               | 0,8454            | 0,8095                | 0,1545            | 0,1904                |
| 7               | 0,3636            | 0,4603                | 0,6363            | 0,5396                |
| 8               | 0,1818            | 0,4920                | 0,8181            | 0,5079                |
| 9               | 0,3636            | 0,6190                | 0,6363            | 0,3809                |
| 10              | 0,7272            | 0,3492                | 0,2727            | 0,6507                |
| 11              | 0,4545            | 0,4603                | 0,5454            | 0,5396                |
| 12              | 0,7272            | 0,5952                | 0,2727            | 0,4047                |
| 13              | 0,3636            | 0,1587                | 0,6363            | 0,8412                |
| 14              | 0,0909            | 0,3174                | 0,9090            | 0,6825                |
| 15              | 0,1818            | 0,4603                | 0,8181            | 0,5396                |
| 16              | 0,0909            | 0                     | 0,9090            | 1                     |
| 17              | 0,0454            | 0,0476                | 0,9545            | 0,9523                |
| 18              | 0                 | 0,3968                | 1                 | 0,6031                |

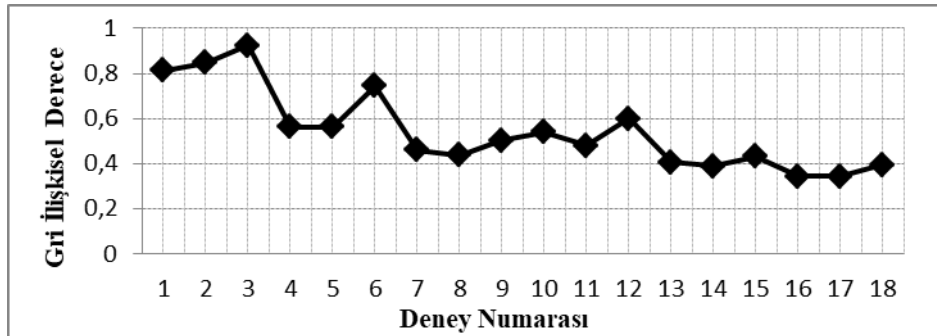
Her bir deney kombinasyonu için gri ilişkisel katsayısı eşitlik 4’deki formüle göre hesaplanmış ve Tablo 8’deki gri ilişkisel katsayı matrisi oluşturulmuştur. Katsayı matrisleri hesaplandıktan sonra eşitlik 8 ile gri

ilişkisel dereceleri bulunur. Bütün deneyler için gri dereceler ve gri ilişkisel derece büyüklük sıralaması Tablo 8’de verilmiştir.

**Tablo 8.** Katsayı matrisi, gri ilişkisel derece ve sıralaması

| Deney no        | Katsayı matrisi   |                       | Gri ilişkisel derece ve sıralama |         |
|-----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|---------|
|                 | Çap değişimi (mm) | Çapak yüksekliği (mm) | Gri derece                       | Sıra no |
| Referans serisi | 1                 | 1                     |                                  |         |
| 1               | 1                 | 0,6237                | 0,8118                           | 3       |
| 2               | 0,9166            | 0,7777                | 0,8472                           | 2       |
| 3               | 0,8461            | 1                     | 0,9230                           | 1       |
| 4               | 0,5789            | 0,5478                | 0,5633                           | 6       |
| 5               | 0,5238            | 0,6000                | 0,5619                           | 7       |
| 6               | 0,7638            | 0,7241                | 0,7440                           | 4       |
| 7               | 0,4400            | 0,4809                | 0,4604                           | 11      |
| 8               | 0,3793            | 0,4960                | 0,4376                           | 12      |
| 9               | 0,4400            | 0,5675                | 0,5037                           | 9       |
| 10              | 0,6470            | 0,4344                | 0,5407                           | 8       |
| 11              | 0,4782            | 0,4809                | 0,4795                           | 10      |
| 12              | 0,6470            | 0,5526                | 0,5998                           | 5       |
| 13              | 0,4400            | 0,3727                | 0,4063                           | 14      |
| 14              | 0,3548            | 0,4228                | 0,3888                           | 16      |
| 15              | 0,3793            | 0,4809                | 0,4301                           | 13      |
| 16              | 0,3548            | 0,3333                | 0,3441                           | 17      |
| 17              | 0,3437            | 0,3442                | 0,3440                           | 18      |
| 18              | 0,3333            | 0,4532                | 0,3932                           | 15      |

Tablo 8’de ve şekil 3’de verilen minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği için gri ilişkisel derecede en yüksek değer 3 numaralı deneyden elde edilmiştir. Böylece minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği değerini elde etmek için kullanılacak en ideal parametrelerin 3 numaralı deneyde olduğu görülmektedir.



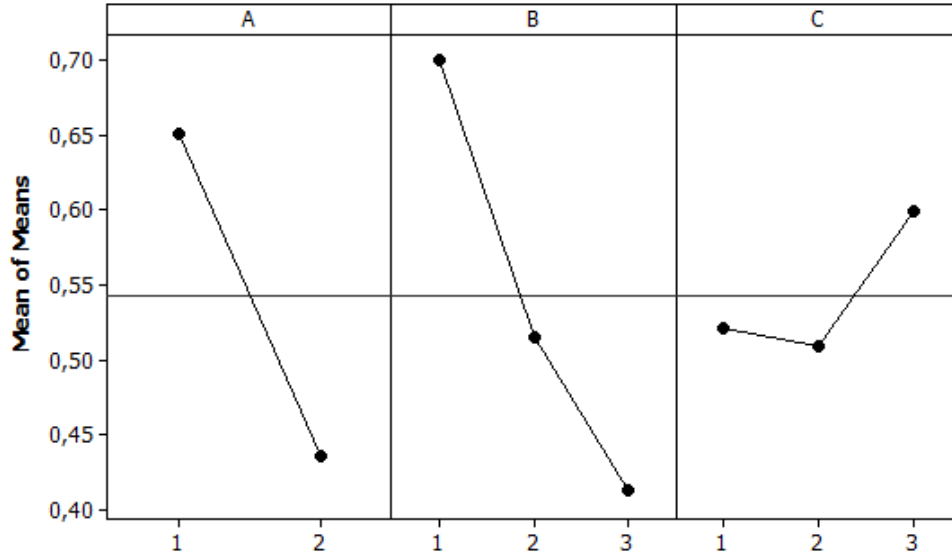
**Şekil 3.** Minimum çap değişimi ve çapak yüksekliği için gri ilişkisel derece

Tablo 8’deki gri derece verileri, faktör seviyelerinin aynı olduğu durumlar için gruplanmış ve bu gruplar içerisinde yer alan değerlerin ortalamaları alınarak faktör etkileri belirlenmiştir.

**Tablo 9.** Faktör seviyeleri için gri ilişkisel dereceleri

| Sembol | Parametre          | Faktör seviyesine göre ortalama gri ilişkisel derece |          |               |         |
|--------|--------------------|--|----------|---------------|---------|
|        |                    | Seviye 1   | Seviye 2 | Seviye 3      | Max-Min |
| A      | Takım              | <b>0,650*</b>  | 0,436    | -             | 0,214   |
| B      | İlerleme (mm/dev)  | <b>0,700*</b>  | 0,516    | 0,414         | 0,287   |
| C      | Kesme hızı (m/dak) | 0,521  | 0,510    | <b>0,599*</b> | 0,089   |

**A1B1C3**



Şekil 4. Delme parametrelerinin etki dereceleri

Tablo 9 değerlendirildiğinde, kesici takım faktörünün 1. seviyesi (A1), ilerleme faktörünün 1. seviyesi (B1) ve kesme hızı faktörünün 3. seviyesi (C3) değerlerinde, ortalama gri ilişki derecesinin en yüksek değeri aldığı görülmektedir. Dolayısıyla A1B1C3 (Kaplamaşız takım, 0,05 mm/ dev ilerleme ve 34 m/dak kesme hızı) faktör seviyeleri kombinasyonu, HSLA çeliğinin delinmelerinde optimum delme şartları olarak tespit edilmiştir. Bu değerler de en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızı değerleridir. Tablo 9'un son sütununda ayrıca gri ilişki derecelerinin her bir faktör için maksimum ve minimum değerleri arasındaki farklar verilmiştir. Bu farkın büyük olması, bir faktörün işlem üzerindeki etkinlik derecesinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, ilerlemenin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu; bunu sırasıyla kesici takım ve kesme hızı faktörlerinin takip ettiği görülmektedir. Faktör seviyelerine bağlı olarak Taguchi ile "en küçük en iyi" yaklaşımına göre sonuçların optimizasyonu yapılarak Şekil 4 oluşmuştur.

### 3.2. Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği için Anova Sonuçları (Anova Results for Diameter Change and Burr Height)

Varyans analizinde amaç çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerinde faktörlerin ve seviyelerinin işlem üzerinde ne kadar etkili olduğunun belirlenmesidir. Çap değişimi ve çapak yüksekliği çıktılarının bir arada değerlendirildiği gri ilişkisel analize bağlantılı olarak yapılan anova analizinde (Tablo 10) en etkili faktörler sırasıyla; %47,09 ile ilerleme, %38,86 ile takım ve bu değerlerinin oluşumuna etkisi en az olan faktör ise % 2,61'lik oran ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 10. Çap değişimi ve çapak yüksekliği için Anova sonuçları

| Faktör | SD | KT      | KO       | F     | P     | %PCR  |
|--------|----|---------|----------|-------|-------|-------|
| A      | 1  | 0,20619 | 0,206189 | 53,37 | 0     | 38,86 |
| B      | 2  | 0,25311 | 0,126557 | 32,76 | 0     | 47,09 |
| C      | 2  | 0,02827 | 0,014136 | 3,66  | 0,057 | 2,61  |
| Hata   | 12 | 0,04636 | 0,003863 |       |       | 11,50 |
| Toplam | 17 | 0,55717 |          |       |       |       |

### 3.3. Doğrulama Deneyleri Sonuçları (Verification Testing Results)

Taguchi metodu ile optimizasyon işleminde son olarak doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Önceden belirlemiş olduğumuz çap değişimi ve çapak yüksekliği parametreleri (A1B1C3) kullanılarak, üç adet doğrulama deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınarak sonuçların güvenilirliği araştırılmıştır. Optimize edilmiş kesme parametreleri Tablo 11'de verilmiştir.

**Tablo 11. Doğrulama deneyi sonuçları**

|                         | Başlangıç Kesme Parametreleri | Optimum Kesme Parametreleri |          |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
|                         |                               | Tahmini                     | Deneysel |
| Seviye                  | A1B1C2                        | A1B1C3                      | A1B1C3   |
| Çap değişimi (mm)       | 8,11                          |                             | 8,08     |
| Çapak yüksekliği (mm)   | 0,82                          |                             | 0,56     |
| GİA                     | 0,789                         | 0,859                       | 0,423    |
| GİA'deki gelişme: 0,366 |                               |                             |          |

A1B1C2 kombinasyonu, başlangıç kombinasyonu olarak 18 adet deneyin ortalamasına (0,789 mm) göre oluşmuştur. Tablo 11'e göre çap değişimi ve çapak yüksekliği değeri 0,789 mm'den 0,423 mm'ye düşürülmüş ve % 46,39  $((0,789-0,423)/0,789)$  oranında iyileşme sağlanmıştır.

### SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, HSLA çeliğinin delinmesinde kesici takım, ilerleme ve kesme hızı faktörlerinin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etkileri gri ilişkisel analiz yöntemiyle incelenmiştir. Buna göre, çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ✓ Kaplamasız takımlarda çap değişimi ve çapak yüksekliği değerlerinin TiAlN kaplamalı matkaplara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ HSLA malzemesinin delinmesinde optimum seviyelerin A1B1C3 olduğu görülmüştür. Bunlarda, kaplamasız matkaplar, en düşük ilerleme hızı (0,05 mm/dev) ve en yüksek kesme hızı (34 m/dak) parametreleridir.
- ✓ Deney sonuçlarına uygulanan varyans analizine göre değişkenlerin çap değişimi ve çapak yüksekliği üzerindeki etki oranları, %47,09 ile ilerleme, %38,86 ile matkap ve %2,61'lik oran ile kesme hızı olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ HSLA malzemesinin HSS matkaplarla delinmesinde gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak çap değişimi ve çapak yüksekliği için optimum delme parametreleri ortaya konulmuştur.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Z. Khan, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, A. K. Chanda, Investigations on the effect of wire EDM process parameters on surface integrity of HSLA: A multi-performance characteristics optimization. *Production & Manufacturing Research*, 2:1 (2014) 501-518.
- [2] J. L. Lin, K. S. Wang, B. H. Yan, Y. S. Tarn, Optimization of the electrical discharge machining process based on the taguchi method with fuzzy logics. *Journal of Materials Processing Technology*, 102:1-3 (2000) 48-55.
- [3] E. Kılıçkap, M. Hüseyinoğlu, Tepki Yüzey Modeli ve Genetik Algoritma Kullanılarak AISI 316'nın Delinmesinde Oluşan Çapak Yüksekliğinin Modellenmesi ve Optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 1:1 (2010) 3-9.
- [4] K. Subramanian, N. H. Cook, Sensing of drill wear and prediction of drill life. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 99:4 (1977) 295-301.
- [5] F. J. Da silva, D. D. Franco, A. R. Machado, E.O. Ezugwu, A.M. Souza Jr, Performance of cryogenically treated HSS tools. *Wear*, 261 (2006) 674-685.

- [6] T. Kıvak, G. Samtaş, A. Çiçek, Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills. *Measurement*, 45:6 (2012) 1547-1557.
- [7] D. K. Lee, S. H. Lee, J. J. Lee, The structure and mechanical properties of multilayer  $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{N}$  coatings deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 169 (2003) 433-437.
- [8] Y. H. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, C. Bowman, V. Gorokhovskiy, E. I. Meletis, Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating. *Surface and Coatings Technology* 205:1 (2010) 146-151.
- [9] A. Escudeiro Santana, V.H. Derflinger, A. Schutze, Relating Hardness-curve shapes with deformation mechanisms in TiAlN thin films enduring indentation. *Materials Science and Engineering, A* 406:1-2 (2005) 11-18.
- [10] L. W. Ma, J. M. Cairney, M.J. Hoffman, P.R. Munroe, Deformation and fracture of TiN and TiAlN coatings on a steel substrate during nanoindentation. *Surface and Coatings Technology* 200:11 (2006) 3518-3526.
- [11] D. Yu, C. Wang, X. Cheng, F. Zhang, Optimization of hybrid PVD process of TiAlN coatings by Taguchi method. *Applied Surface Science* 255:5 (2008) 1865-1869.
- [12] J. M. Castanho, M. T. Vieira, Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144:20 (2003) 352-357.
- [13] K. Ahmadi, Y. Altintas, Stability of lateral, torsional and axial vibration in drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 68 (2013) 63-74.
- [14] K. Yaman, N. Biçakçı, A. Özgedik, Matkap Boyunun Delik Toleranslarına Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 20:4 (2017) 765-775.
- [15] E. Bahçe, E. Kılıçkap, Ö. Cihan, Al-5005'in Delinmesinde Delme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisinin Araştırılması. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, (2010) 242-250.
- [16] T. Kıvak, A. Çiçek, İ. Uygur, N.A. Özbek, AISI 316 Östenik Paslanmaz Çeliğin Delinmesinde Tek Katlı ve Çok Katlı Kaplamaların Delik Kalitesi Üzerindeki Etkileri. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu Ankara, (2012) 28-33.
- [17] A. A. Rahman, A. Mamat, Effect of machining parameters on hole quality of micro drilling for brass. *Modern Applied Science*, (2009) 221-229.
- [18] J. P. Kumar, P. Packiaraj, Effect of drilling parameters on surface roughness, tool wear, material removal rate and hole diameter error in drilling of OHNS. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, (2012) 150-154.
- [19] A. Mavi, Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Delinmesinde Yüzey Form Özelliklerini Etkileyen Optimum Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6:3 (2018) 634-643.
- [20] T. Kıvak, K. Habalı, U. Şeker, The effect of cutting parameters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718. *Journal of Science*, 25:2 (2012) 533-540.



- [21] C. C. Tsao, H. Hocheng, Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44:10 (2004) 1085-1090.
- [22] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, B. T. Achyutha, B. Siddeswarappa, Genetic algorithm-based burr size minimization in drilling of AISI 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 197:1-3 (2008) 225-236.
- [23] Y. Kaplan, M. Nalbant, H. Gökkaya, AISI D2 ve AISI D3 Soğuk İş Çeliklerinin Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Edebiyat Dergisi*, 1:1 (2011) 37-46.
- [24] N. Tosun, Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Adv Manuf Technol*, 28:5-6 (2006) 450-455.
- [25] E. Kılıçkap, M. Hüseyinoğlu, Selection of optimum drilling parameters on burr height using response surface methodology and genetic algorithm in drilling of AISI 304 stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 25 (2010) 1068-1076.
- [26] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, Minimizing burr size in drilling using artificial neural network (ANN)-particle swarm optimization (PSO) approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23:5 (2012) 1783-1793.
- [27] S. Yağmur, R. Çakıroğlu, A. Acır, U. Şeker, AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde Kesme Kuvvetlerinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5:2 (2017) 241-246.
- [28] N. A. Raof, J. A. Ghani, C. H. C. Haron, Machining-induced grain refinement of AISI 4340 alloy steel under dry and cryogenic conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 8:5 (2019) 4347-4353.
- [29] S. R. Das, A. Panda, D. Dhupal, Hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide insert: Surface roughness, tool wear, chip morphology and cost estimation. *Materials Today: Proceedings*, 5:2 (2018) 6560-6569.
- [30] P. L. Khan, S. V. Bhivsane, Experimental analysis and investigation of machining parameters in finish hard turning of AISI 4340 steel. *Procedia Manufacturing*, 20 (2018) 265-270.
- [31] M. Muaz, S.K. Choudhury, Experimental investigations and multi-objective optimization of MQL-assisted milling process for finishing of AISI 4340 steel. *Measurement*, 138 (2019) 557-569.
- [32] P. Gopikrishnan, A. Akbar, A. Asokan, B. Bhaskar, C.S. Sumesh, Numerical modelling and optimization of surface finish during peripheral milling of AISI 4340 steel using RSM. *Materials Today: Proceedings*, 5:11 (2018) 24612-24621.
- [33] P. Chakraborty, S. Asfour, S. Cho, A. Onar, M. Lynn, Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. *Journal of materials processing technology*, 205:1-3 (2008) 190-202.
- [34] H. Alipooramirabad, A. Paradowska, R. Ghomashchi, M. Reid, Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 28 (2017) 70-81.
- [35] M. Saadati, A.K.E. Nobarzad, M. Jahazi, On the hot cracking of HSLA steel welds: Role of epitaxial growth and HAZ grain size. *Journal of Manufacturing Processes*, 41 (2019) 242-251.

- [36] L. de Jesus Jorge, V.S. Cândido, A.C.R. da Silva, F. da Costa Garcia Filho, A.C. Pereira, F.S. da Luz, S.N. Monteiro, Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermically treated HSLA-80 steel. *Journal of materials research and technology*, 7:4 (2018) 598-605.
- [37] R. Pamnani, T. Jayakumar, M. Vasudevan, T. Sakthivel, Investigations on the impact toughness of HSLA steel arc welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 21 (2016) 75-86.
- [38] Wen, K. L. The grey system analysis and its application in gas breakdown and var compensator finding. *International Journal of Computational Computing*, 2:1 (2004) 21-44.
- [39] Palanikumar, K. Rubio, J. C. Abrao, A. M. Correia, A. E. Davim, J. P. Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics. *Journal Composite Materials*, 42 (2008) 2585–2597.
- [40] T. Kıvak, Inconel 718'in Delinebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007) 55,74,78,82.
- [41] M. Kurt, Y. Kaynak, E. Bağcı, Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2008) 1051-1060.
- [42] Ş. Bayraktar, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2011) 80.
- [43] M. Bakkal, Shih, J. Albert, Samuel B. McSpadden, C.T. Liu, Ronald O. Scattergood, Light emission, chip morphology, and burr formationin drilling the bulk metallic glass. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 741–752.

## Two Stage Three Pass EDFA Design and EDFA Parameters' Optimization

 Murat YÜCEL<sup>1,\*</sup>  Emrah YİĞİT<sup>2</sup> 
<sup>1</sup> Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical Electronics Engineering, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> Gazi University Faculty of Technology, Graduate School of Informatics, Çankaya/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, two stage and triple pass erbium doped fiber amplifier (EDFA) is designed and EDFA's input signal wavelengths and powers, erbium doped fiber (EDF) lengths, and pump laser powers are optimized. In the scope of this study, 4 different fiber types (I6, I25, M5, M12) are used and for every fiber type, the optimizations are performed between the wavelengths 1530 nm – 1570 nm.

### Article Info:

Research article

Received: 28/02/2020

Revision 16/04/2020

Accepted: 22/04/2020

### Highlights

- Triple pass EDFA
- High optical gain
- EDFA parameters' optimization

### Keywords

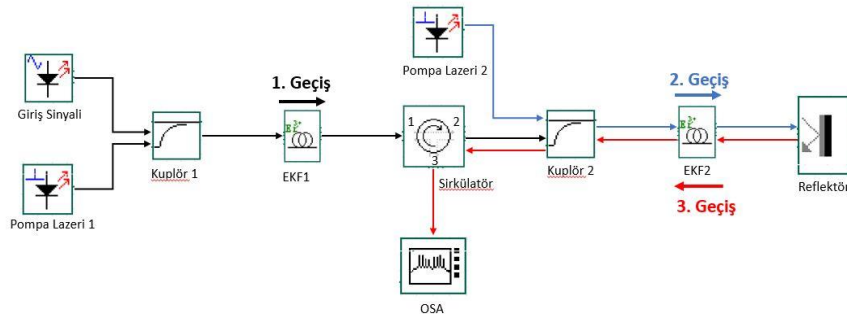
 Erbium Doped Fiber  
 Triple Pass  
 Two Stage  
 Optimization


Figure A. Two stage triple pass EDFA design

**Purpose:** In this study, various EDFA configurations are examined. By designing two stage triple pass EDFA configuration, different input parameters are optimized. With the aid of OptiSystem software, a study with high gain and low noise figure is performed.

**Theory and Methods:** The input parameters are optimized step by step during the whole simulation process. This study consists of 8 optimization stages. In every step, an input parameter is varied within a scale and according to the simulation results it is set to its optimum value by examining the gain and noise figure outputs. From the first EDF in design, first and the only pass is done; over the second EDF second and third passes achieved by using a reflector. In this way, a two stage and triple pass structure are formed.

**Results:** As a result of optimizations, 1555 nm for M5 and 1560 nm wavelengths for the other fiber types are attained as optimum values. In the 1480 nm pump laser wavelengths, for I6, I25, M5, and M12 fiber types 54.9, 54.3, 53.3, and 54.7 dB maximum gain and 3.7, 3.8, 3.9, and 3.3 dB minimum noise figure values is obtained, respectively.

**Conclusion:** Design and optimization of two stage triple pass EDFA are presented in this study. Optimized results are compared with the unoptimized input parameters outputs. Optimized parameters verifies us a spectacular improvement on high gain and low noise figure. During the optimization process, input signal with -30 dBm power and 1550 nm – 1560 nm wavelength is used. The fiber lengths are determined quite short which is an critical parameter and makes the design cost-effective. Besides, moderate pump power levels are obtained.

In addition, the proposed study, three stage four pass EDFA can be studied to attain further improvements on gain and noise figure outputs.



## İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Tasarımı ve EKFY Parametrelerinin Optimizasyonu

Murat YÜCEL<sup>1,\*</sup> Emrah YİĞİT<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Bölümü, Çankaya/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, iki aşamalı üç geçişli erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) tasarlanarak, EKFY'nin giriş sinyal dalga boyları ve güçleri, erbiyum katkılı fiber (EKF) uzunlukları ve pompa lazerlerinin güçleri optimize edilmiştir. Çalışma kapsamında, 4 farklı fiber türü (I6, I25, M5, M12) kullanılmış olup, her bir fiber türü için 1530 nm - 1570 nm dalgaboyu aralığında optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tasarımdaki ilk fiberden ilk ve tek geçiş yapılmış olup, ikinci fiberden yansıtıcı yardımı ile ikinci ve üçüncü geçişler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, iki aşamalı ve üç geçişli bir yapı oluşturulmuştur. Yapılan optimizasyonlar sonucunda M5 için maksimum kazanç 1555 nm'de, diğer fiber türleri için ise 1560 nm'de elde edilmiştir. 1480 nm pompa lazeri ile; I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için sırasıyla 54.9, 54.3, 53.3 ve 54.7 dB maksimum kazanç ve 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.3 dB minimum gürültü faktörü değerleri elde edilmiştir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 28/02/2020  
Düzeltilme: 16/04/2020  
Kabul: 22/04/2020

### Anahtar Kelimeler

Üç geçişli EKFY  
Yüksek optik kazanç  
EKFY parametrelerinin  
optimizasyonu

### Keywords

Erbiyum Katkılı Fiber  
Üç Geçiş  
İki Aşama  
Optimizasyon

## Two Stage Three Pass EDFA Design and EDFA Parameters' Optimization

### Abstract

In this study, two stage and triple pass erbium doped fiber amplifier (EDFA) is designed and EDFA's input signal wavelengths and powers, erbium doped fiber (EDF) lengths, and pump laser powers are optimized. In the scope of this study, 4 different fiber type (I6, I25, M5, M12) is used, for every fiber type the optimizations are performed between the wavelengths 1530 nm – 1570 nm. From the first EDF in design, first and the only pass is done; over the second EDF second and third passes achieved by using a reflector. In this way, a two stage and three pass structure are formed. As a result of optimizations, 1555 nm for M5 and 1560 nm wavelengths for the other fiber types are attained as optimum values. In the 1480 nm pump laser wavelengths, for I6, I25, M5, and M12 fiber types 54.9, 54.3, 53.3, and 54.7 dB maximum gain and 3.7, 3.8, 3.9, and 3.3 dB minimum noise figure values is obtained, respectively.

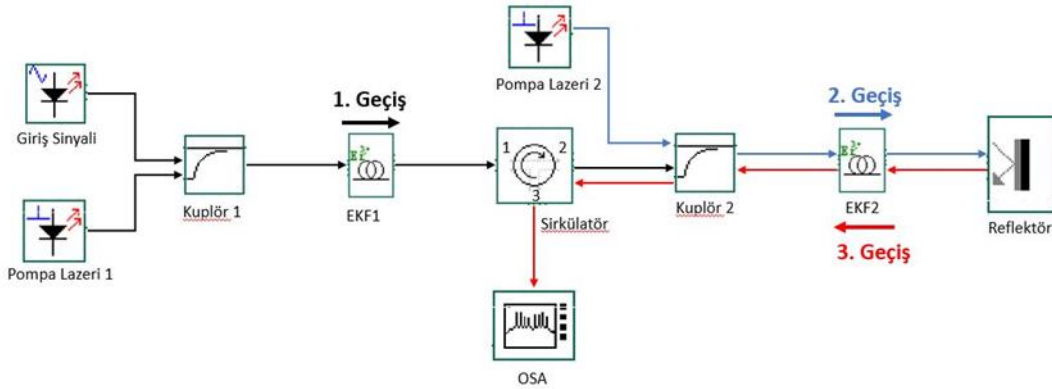
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Genişband haberleşme sistemlerinde, veri trafiğinin sürekli olarak artması nedeni ile düşük kayıplı ve uzak mesafeli yüksek hızlı veri iletişimi gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için fiber optik iletişim [1] hatları tercih edilmeye başlamıştır. Fiber optik iletişim yukarıda bahsedilen ihtiyaçlara cevap vermekle birlikte, özellikle uzun mesafe iletişimlerde (okyanus ötesi vb.) sinyal zayıflaması sorunu yaşanmaktadır. Mesafe sorununun çözümüne yönelik olarak ilk yıllarda optik sinyalin elektriksel sinyale dönüştürülerek gücünün yükseltilmesi metodu uygulanmıştır. Sonraki yıllarda ise optik-elektriksel dönüşüme gerek kalmadan ışık sinyalinin gücü optik yükselteçler [2-3] ile artırılmış ve ışığın uzun mesafeleri kat etmesi sağlanmıştır. 1987 yılında keşfedilmiş olup, optik yükselteç çözümlerinden biri olan ve bu çalışmada da kullanılan EKFY [4], hali hazırda birçok tasarımda da kullanılmıştır. Bu kapsamda, daha önce yapılmış çalışmalarda 2 aşamalı 2 geçişli [5], 2 aşamalı 3 geçişli [6-7], 3 aşamalı 3 geçişli [7], 3 aşamalı 4 geçişli [8] tasarımlar incelenmiştir. Yükseltilmiş uyarılmış yayılma (YUY)'i bastırabilmek için iki tane ayarlanabilir band geçiren filtrenin kullanıldığı 2 aşamalı 4 geçişli bir tasarım [9] ayrıca çalışılmıştır. 1550 nm dalgaboyu ve -50 dBm giriş gücünde 2 aşamalı 4 geçişli sistemlerin çalışıldığı düzeneklerde 54 dB [10], 62 dB [11], 61 dB [12] ve 61 dB [13] kazançlar elde edilmiştir. L band özelinde ise tek pompa kaynağı kullanılarak kısa bir EKF ile (8 m) ekonomik bir yükselteç [14] tasarlanmaya

çalışılmıştır. Yine aşama ve geçiş sayısının kazanç ve gürültü faktörü üzerine etkisini gösterebilmek adına tek aşamalı tek geçişli sistemden 2 aşamalı 4 geçişli sisteme kadar farklı konfigürasyonlar [15-16] değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise, Optisystem 16 programında 2 aşamalı 3 geçişli EKFY [17] düzeneği kullanılarak literatürde ilk defa 4 farklı ticari fiber türü (I6, I25, M5 ve M12) için de tüm giriş parametrelerinin (giriş sinyali dalga boyu ve gücü, EKF uzunlukları (EKF1 ve EKF2), pompa lazeri güçleri) optimize edildiği bir çalışma gerçekleştirilmiş olup, yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü değerleri elde edilmiştir.

## 2. İKİ AŞAMALI ÜÇ GEÇİŞLİ EKFY TASARIMI (TWO STAGE THREE PASS EDFA DESIGN)

İki geçişli ve üç aşamalı EKFY düzeneği Şekil-1’de yer almaktadır. Sistemde yer alan 4 farklı fiber türüne ait parametreler ise Tablo-1’de yer almaktadır. Düzenekte giriş sinyali ilk olarak birinci Pompa Lazeri 1 ile Kuplör 1’de birleşerek ilk fiberden (EKF1) geçiş yapmaktadır. Burada yükselen sinyal, sirkülatörün 1 nolu portundan girerek 2 nolu portundan çıkmakta, ikinci Pompa Lazeri 2 ile Kuplör 2’de birleşmekte ve ikinci fiberden (EKF2) geçmektedir. İkinci defa yükselen sinyal, reflektörden (yansıtıcı) geri dönerek EKF2’den ikinci kez geçiş yaparak tekrar yükseltilmiş ve üçüncü geçişini tamamlamıştır. Sinyal daha sonra sirkülatörün 2 nolu portundan girerek 3 nolu portundan optik spektrum analizöre (OSA) ulaşmış ve kazanç/gürültü ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 1. İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Düzeneği

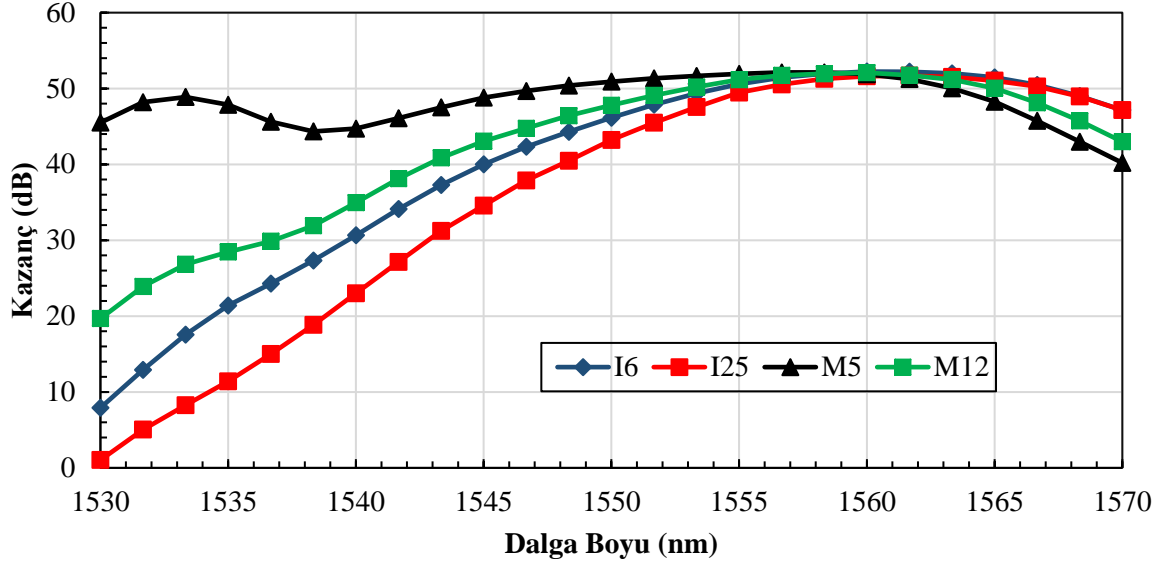
Tablo 1. Fiber Türleri Parametreleri [18]

| Parametreler                        | I6   | I25  | M5   | M12  |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| Nümerik Açıklık                     | 0,23 | 0,24 | 0,23 | 0,22 |
| İyon Ömrü (ms)                      | 10   | 10   | 10   | 10   |
| Yayıma (980 nm) (dB/m)              | 5,1  | 24   | 5    | 12   |
| Çekirdek Yarıçapı ( $\mu\text{m}$ ) | 1,55 | 1,4  | 1,6  | 1,7  |
| Erbiyum Yarıçapı ( $\mu\text{m}$ )  | 1,45 | 1,3  | 1,5  | 1,6  |
| İyon Yoğunluğu (ppm)                | 440  | 2200 | 400  | 900  |
| Fiber Uzunluğu (m)                  | 20   | 5    | 12   | 10   |

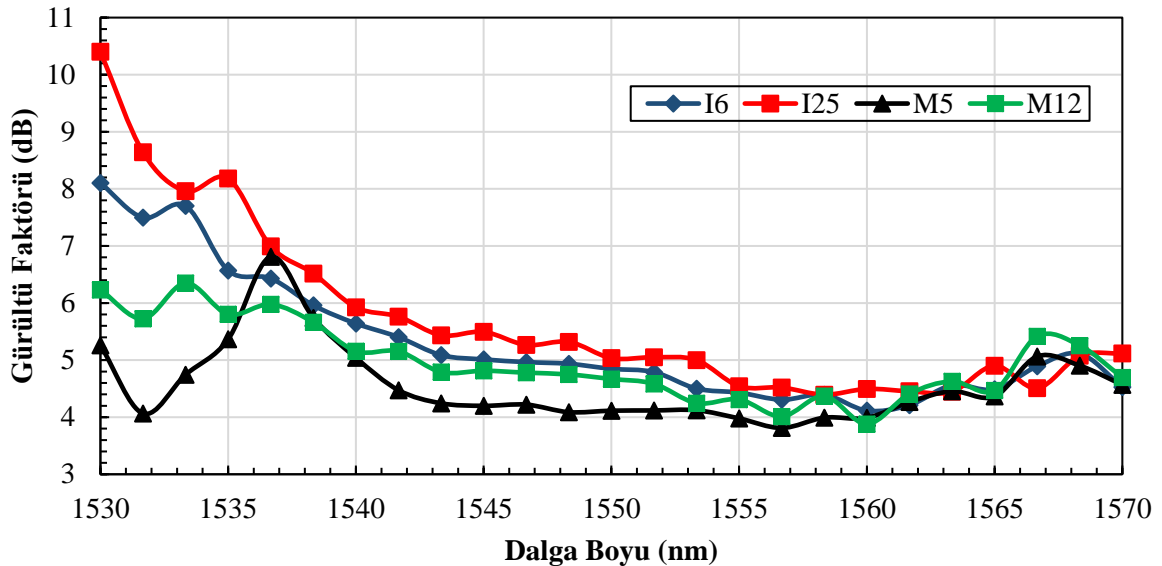
Çalışmada yapılan optimizasyon 8 aşamadan oluşmaktadır. Her bir aşamada ayrı bir giriş parametresi uygun görülen aralıkta değiştirilerek kazanç ve gürültü faktörü gözlenmiştir. En uygun değer bulunduktan sonra diğer aşamaya geçilmiştir.

İlk aşamada, farklı fiber türlerinin nümerik açıklık, çekirdek yarıçapı, erbiyum yarıçapı ve iyon yoğunlukları göz önüne alınarak sistemlerdeki fiber uzunluklarına belli değerler verilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yine pompa güçleri için belli değerler seçilmiş olup, giriş sinyalinin gücü -30 dBm

olarak ayarlanmıştır. Giriş sinyalinin dalga boyu 1530 nm – 1570 nm aralığında değiştirilerek Şekil-2’deki kazanç ve Şekil-3’teki gürültü faktörü grafikleri elde edilmiştir. Bu aşamada, en yüksek kazanç değeri 52.2 dB ile I6 fiberde; en düşük gürültü faktörü değeri ise 3.8 dB ile M5 fiberde gözlenmiştir.



Şekil-2. Optimize Edilmemiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Dalgaboyu Değişimine Karşılık Kazanç Değişimi



Şekil-3. Optimize Edilmemiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Dalgaboyu Değişimine Karşılık Gürültü Faktörü Değişimi

İkinci aşamada, ilk aşamadan gelen optimum sonuç olan 1560 nm dalga boyunda giriş sinyalinin gücü -50 dBm ile 0 dBm arası değiştirilerek sonuçlar alınmıştır. En yüksek kazanç 57.2 dB ile -50 dBm giriş gücünde

I6 fiber tasarımında elde edilmiştir. En düşük gürültü ise, 3.36 dB ile 0 dBm sinyal gücünde I25 ve M12 fiberler ile gerçekleştirilen tasarımlarda elde edilmiştir.

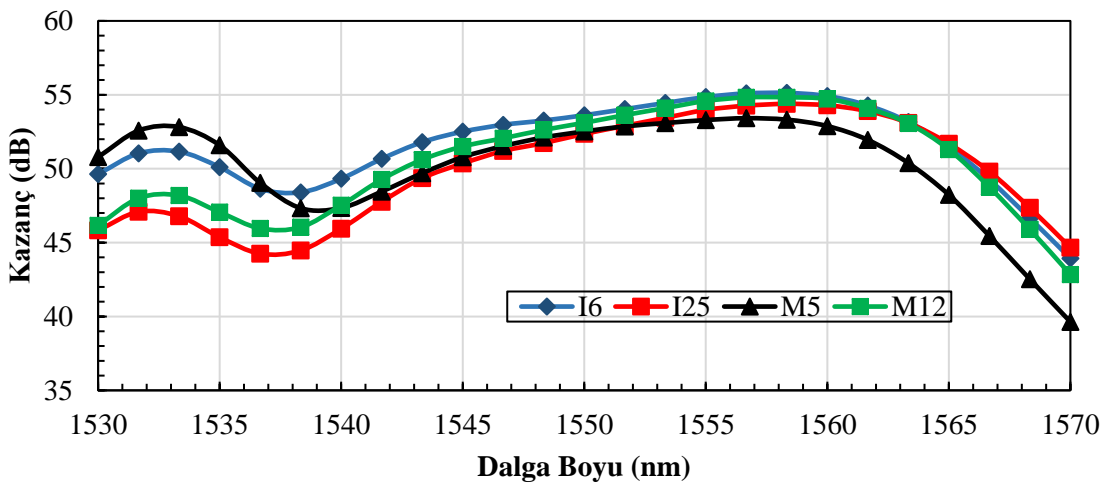
Üçüncü aşamada, 1560 nm dalga boyu ve -30 dBm'lik güce sahip giriş sinyali kullanılarak ilk fiberin uzunluğu, fiber türü de göz önüne alınarak optimize edilmeye çalışılmıştır. Fiber türüne göre seçilen optimizasyon aralığı erbiyum iyonunun katkılama yoğunluğuna göre seçilmiştir. Bu aşamada, optimizasyon öncesi seçilen aralıklar I6 ve M5 fiberleri için 1-25 m arası, I25 fiber için 1-7 m arası, M12 fiber için ise 1-15 m olarak belirlenmiştir. İdeal uzunluklar I6, I25, M5 ve M12 fiber için sırasıyla 6 m, 1.5 m, 11 m ve 3 m olarak ölçülmüştür.

Dördüncü aşamada, 1560 nm ve -30 dBm'lik giriş sinyali ve uygun ilk fiber uzunlukları (I6 için 6 m, I25 için 1.5 m, M5 için 11 m, M12 için 3 m) ile ilk pompa lazerinin gücü bulunmuştur. Pompa lazerinin gücü arttıkça kazancın da arttığı görülmekle birlikte; 10 mW – 1000 mW aralığında değişen pompa gücüne karşılık olarak, sistemin 10 mW ve 1000 mW pompa gücündeki kazançlarına bakılarak ortalama bir değerde karar kılınmıştır (I6, I25 ve M12 için 250 mW, M5 için 200 mW).

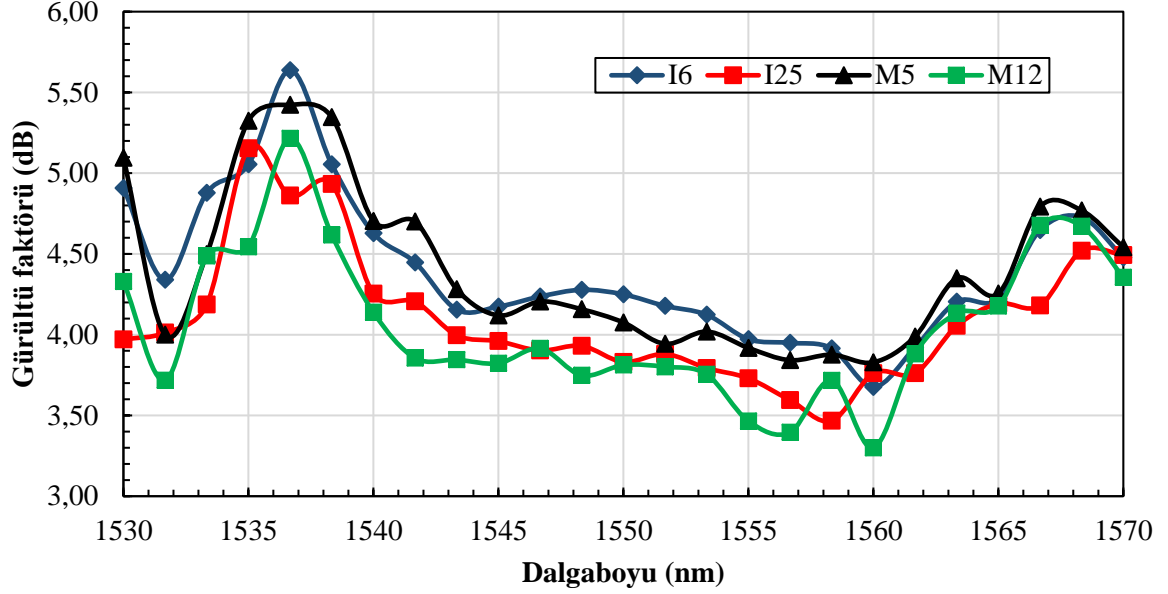
Beşinci aşamada, 1560 nm ve -30 dBm'lik giriş sinyali ve belirlenen ilk fiber uzunluğu ile ilk pompa gücü kullanılarak ikinci fiber uzunlukları hesaplanmıştır (I6 için 11 m, I25 için 2 m, M5 için 15 m ve M12 için 4 m).

Altıncı aşamada, 1560 nm dalgaboyu ve -30 dBm gücünde giriş sinyali ile belirlenen ilk ve ikinci fiber uzunluğu ile ilk pompa gücü kullanılarak ikinci pompanın gücü elde edilmiştir. Pompa lazerinin gücü bu aşamada 10 mW – 1000 mW arası değiştirilerek ilk pompa lazerinin gücünü belirlerken kullanılan metot izlenmiştir (I6 için 300 mW, I25 ve M5 için 200 mW, M12 için 250 mW).

Yedinci aşamada, belirlenen tüm parametreler kapsamında (-30 dBm gücündeki giriş sinyali, tüm pompa ve fiber uzunlukları) giriş sinyali tekrar 1530 nm – 1570 nm aralığında değiştirilerek sonuçlar gözlenmiştir. Aşağıda Şekil-4'de yer alan grafikte tüm fiber türlerinin kazanç; Şekil-5'te ise gürültü faktörü grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil-4 incelendiğinde tüm fiberlerin çıkış kazanç spektrumları benzer olmakla beraber en yüksek kazanç spektrumu I6 fiberinde elde edilmiştir. M5 fiber için en iyi kazanç değeri 1555 nm'de, diğer fiber türleri için ise 1560 nm'de tespit edilmiştir. Tüm fiber türleri için benzer kazanç spektrumların elde edilmesinin sebebi bütün fiberler için EKFY parametrelerinin optimizasyonudur.



Şekil-4. Optimize Edilmiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Dalgaboyu Değişimine Karşılık Kazanç Değişimi

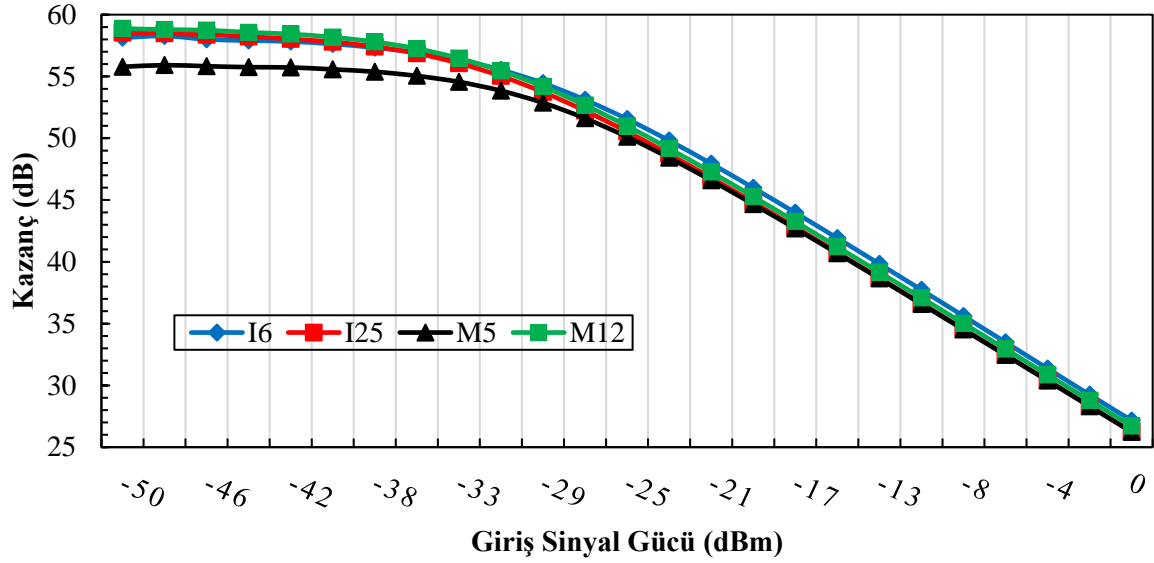


**Şekil-5.** Optimize Edilmiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Dalgaboyu Değişimine Karşılık Gürültü Faktörü Değişimi

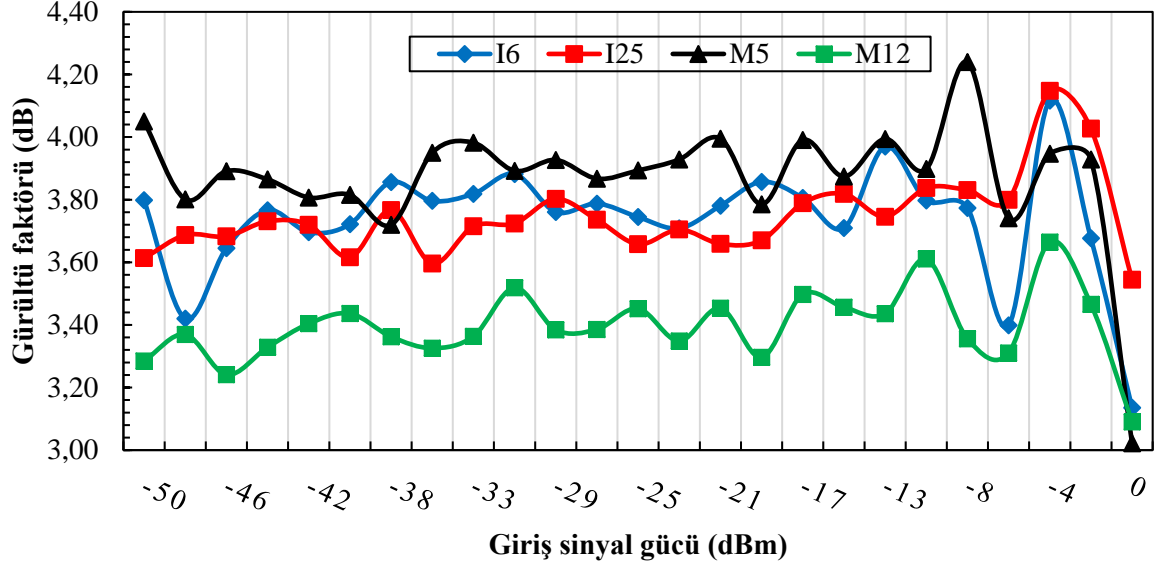
Şekil-5’de gürültü faktörü değişimi görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere yaklaşık değerler alındığında en düşük gürültüye M12 fiberi sahiptir. Ortalama değerler incelendiğinde en yüksek değerler I6 ve M5 fiberlerinde görülmüştür.

Sekizinci ve son aşamada ise optimize edilmiş giriş parametreleri baz alınarak sistemin giriş sinyalinin gücü -50 dBm ile 0 dBm arasında değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Simülasyon EKF türlerinin en yüksek kazançta sahip olduğu dalgaboyları ve pompa lazer güçleri için yapılmıştır. Kazanç ve gürültü faktörü değerleri Şekil-6 ve Şekil-7’de sırasıyla yer almaktadır. Şekil-6’da görüldüğü gibi, giriş sinyal gücü arttıkça çıkış kazancı azalmaktadır. Ayrıca çıkış kazancı -30 dBm giriş sinyal gücüne kadar doğrusal olarak artarken bu değerden sonra yükselteç doyum bölgesine yaklaştığı için doğrusal bölgeden çıkıldığı görülmektedir.





Şekil-6. Optimize Edilmiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Gücüne Karşılık Kazanç Değişimi



Şekil-7. Optimize Edilmiş Değerlere Göre Giriş Sinyal Gücüne Karşılık Gürültü Faktörü Değişimi

Şekil-7'de ise gürültü faktörü değişimi görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde en düşük gürültüye M12 fiberi sahiptir. Buna karşılık M5 fiberinin gürültü faktörü en yüksek değeri almaktadır. Ortalama değerler arasındaki fark ise 0.7 dB gibi düşük bir değerdir.

### 3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; iki aşamalı üç geçişli EKFY, 4 farklı fiber türü için optimize edilerek yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü değerleri elde edilmiştir. Giriş değerleri optimize edilmeden giriş sinyalinin dalga boyu ve sinyal gücü değiştirilerek elde edilen sonuçlar; optimize edilen giriş parametreleri ile tekrar simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Temel olarak -30 dBm giriş sinyal gücü ve 1550 nm – 1560 nm dalgaboyu aralığı ele alınarak giriş parametreleri optimize edilmiştir. M5 fiberi özelinde ise, Şekil-2’de yer alan grafikte de görüldüğü üzere düşük dalgaboylarında da (1530 nm – 1535 nm) yüksek kazanç elde edilmiştir. Bu durum, tüm fiber türleri içinde en düşük Er<sup>3+</sup> iyon yoğunluğuna sahip olan M5 fiberinin mezkur dalgaboylarında da doyuma ulaşmamış olması nedeni ile gözlenmiştir.

I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilmiş değerler Tablo-2’de; elde edilen maksimum kazanç ve minimum gürültü faktörü değerleri Tablo-3’te yer almaktadır.

**Tablo-2.** I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen giriş parametreleri

| <b>Fiber Türü</b> | <b>Giriş Sinyali</b> | <b>Pompa 1</b>    | <b>Pompa 2</b>    | <b>EKF-1</b> | <b>EKF-2</b> |
|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
| I6                | 1560 nm<br>-30 dBm   | 1480 nm<br>250 mW | 1480 nm<br>300 mW | 6 m          | 11 m         |
| I25               | 1560 nm<br>-30 dBm   | 1480 nm<br>250 mW | 1480 nm<br>200 mW | 1.5 m        | 2 m          |
| M5                | 1555 nm<br>-30 dBm   | 1480 nm<br>250 mW | 1480 nm<br>200 mW | 11 m         | 15 m         |
| M12               | 1560 nm<br>-30 dBm   | 1480 nm<br>250 mW | 1480 nm<br>250 mW | 3 m          | 4 m          |

**Tablo-3.** I6, I25, M5 ve M12 fiberleri için optimize edilen parametrelere göre sonuçlar

| <b>Fiber Türü</b> | <b>Kazanç</b> | <b>Gürültü Faktörü</b> |
|-------------------|---------------|------------------------|
| I6                | 54.9 dBm      | 3.7 dBm                |
| I25               | 54.3 dBm      | 3.8 dBm                |
| M5                | 53.3 dBm      | 3.9 dBm                |
| M12               | 54.7 dBm      | 3.3 dBm                |

Singh ve Marwaha [17] çalışmasına kıyasla elde edilen kazanç ve gürültü faktörü ise Tablo-4’te yer almaktadır.

**Tablo-4.** Literatür ile yapılan çalışmanın karşılaştırılması

| <b>Parametreler</b>            | <b>Singh ve Marwaha</b> |         |         | <b>Mevcut Çalışma</b> |         |         |
|--------------------------------|-------------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|
| <b>Giriş Sinyal Gücü (dBm)</b> | -40 dBm                 | -35 dBm | -30 dBm | -40 dBm               | -35 dBm | -30 dBm |
| <b>Kazanç (dB)</b>             | ~28 dB                  | ~28 dB  | ~27 dB  | ~58.2 dB              | ~57 dB  | ~55 dB  |
| <b>Gürültü (dB)</b>            | ~5.5 dB                 | ~5.6 dB | ~5.7 dB | ~3.4 dB               | ~3.3 dB | ~3.4 dB |

Tablo-4 değerlendirildiğinde; literatürdeki çalışmaya [17] kıyasla daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörü değerleri elde edildiği görülmektedir.

Sonuç olarak; M5 fiber hariç diğer tüm fiber türleri için giriş sinyali dalga boyu 1560 nm (M5 için 1555 nm) olarak belirlenmiştir. Pompalar için optimum güçler her bir durum için birbirine yakın değerler olan

200 mW – 300 mW aralığında elde edilmiştir. Kritik parametrelerden biri olan ve yükseltecin maliyetine direkt etki eden fiber uzunlukları ise her bir sistem özelinde birbirine yakın uzunluklarda hesaplanmıştır. Yapılan çalışmaya ek olarak; mevcut düzenek kullanılarak 3 aşamalı 4 geçişli tasarım ile daha yüksek kazanç ile daha düşük gürültü faktörü elde edilmeye çalışılabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Keiser, Gerd. (2000). Optical Fiber Communications. Singapore: McGraw-Hill, 2,5.
- [2] Becker, P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. San Diego: Academic Press, 1,13.
- [3] Celen, S., Özden, H., Uyar, E. İterbiyum-Katkılı Fiber Lazerle Q-Anahtarlamalı Modda İmplant Yüzeyi Mikro-İmalatı ve Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 2 (2014): 197-202.
- [4] Mears, R.J., Reekie, L., Jauncey, I.M. and Payne, D.N. (1987) Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 $\mu$ m. Electronics Letters, 23 (19), 1026-1028. (doi:10.1049/el:19870719).
- [5] Laming, R.I., Zervas, M.N. and Payne, D.N., Erbium-doped fiber amplifier with 54 dB gain and 3.1 dB noise figure. IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4(12), pp. 1345–1347, Dec. 1992.
- [6] Naji, A.W., Ibrahim, H.F.H., Ahmed, B., Harun, S.W. and Mahdi, M.A. Theoretical Analysis of Triple-pass Erbium-doped Fiber Amplifier. International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE 2010), 11-13 May 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [7] Akhter, F., Ibrahimy, M. I., Naji, A.W., and Siddiquei, H. R. Modeling and characterization of all possible triple pass EDFA configurations. International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(18), pp. 2656-2663, 9 May, 2012, DOI: 10.5897/IJPS12.172.
- [8] Akhter, F., Ibrahimy, M. I., Naji, A.W., and Siddiquei, H. R. Design and Characterization of a New Three-Stage Quadruple Pass EDFA. Journal of Applied Sciences, Vol. 12(19), pp. 2071-2076, 2012, DOI: 10.3923/jas.2012.2071.2076
- [9] Sellami, M., Sellami, A. and Berrah, S. Characterization and Modeling of Dual Stage Quadruple Pass Configurations. Physics Procedia 55, 416 – 420, 2014.
- [10] Al-Khateeb, K.A., Sellami, A. and Belloui, B., A High Gain EDFA Using Double-Pass Dual-Stage Amplification. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering, Vol. 2, pp: 812-814, May 9-11, 2006, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [11] Bouzid, B. High-Gain And Low-Noise-Figure Erbium-Doped Fiber Amplifier Employing Dual Stage Quadruple Pass Technique. Optical Review Vol. 3(17), pp. 100-102, 2010.
- [12] Naji, A.W., Mohammed, M.A., Zaidan, B.B., Zaidan, A.A., ALKhateeb, W., Al- Khateeb, K.A.S. and Mahdi, M.A. A Novel Theoretical Analysis Of Quadruple Pass Erbium Doped Fiber Amplifier. Int. J. Physc. Sci, Vol. 6(10), pp. 2393-2398, 2011, DOI: 10.5897/AJBM11.228.
- [13] Ali, S., Khalid, A.S. and Bouzid, B. A New Erbium-Doped Fiber Amplifier. Journal of Applied Sciences, Vol. 9(13), pp. 2498-2550, 2009.
- [14] Al-Mansoori, M. H., Al-Ghathithi, W. S. 56.6 dB high gain L-band EDFA utilizing short-length highly-doped erbium rare-earth material. J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 9, 14028 (2014), DOI: <http://dx.doi.org/10.2971/jeos.2014.14028>
- [15] Bouzid, B. Erbium-Doped Fiber Amplifier Review, Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Tunisia, 2016.

- [16] Bouzid, B. Behavioral Variations of Gain and NF Owing to Configurations and Pumping Powers. *Optics and Photonics Journal*, 2, 8-12, March 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/opj.2012.21002>
- [17] Singh, G., Marwaha, V. A Review Paper On Characterization Of Triple Pass Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *Indo Global college of Engineering, Abhipur, Punjab, India. Vol. 1, Spl. Issue 2 (May, 2014) e-ISSN: 1694-2310*
- [18] Yucel M., Ozoglu, Y.A., Goktas, H.H., Gündüz, A.E. and Burunkaya, M. (2019). Determination of the Temperature Independent Quiescent Regions for Different Types of Erbium-Doped Fibers. *Optik*, 183 (619-628).

## Crash Analysis of a Pre-Engineered Electromobile Vehicle

 Bora YILDIRIM<sup>ID</sup> Zekeriya ÖZCAN<sup>ID</sup> Erdem AKTAŞ\*<sup>ID</sup>

Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Beytepe/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info :

Research article  
 Received: 21/01/2020  
 Revision 24/04/2020  
 Accepted: 27/04/2020

In scope of this study, frontal collision of a pre-engineered electromobile vehicle to straight rigid wall is examined via ANSYS Workbench LS-DYNA computer aided engineering (CAE) software. The data obtained are compared with the critical limit values accepted by various authorities and the inferences were made regarding the injury status of dummy.

#### Highlights

- LS-DYNA
- Explicit Method
- Injury Criteria
- Case Studies

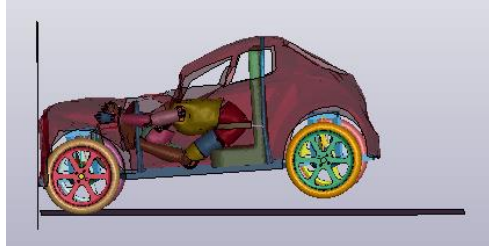


Figure A. Crash moment of numerical model to the wall

#### Keywords

Crash Analysis  
 Finite Element Method  
 Electromobile Vehicle  
 Dummy Model

**Purpose:** Main objective of this study was to examine different collision scenarios of a pre-engineered vehicle with a dummy including the usage of seat belt and various structural material types in a numerical analysis platform.

**Theory and Methods:** Internationally accepted injury criteria (HIC: Head Injury Criteria, CSI: Chest Severity Index and Axial Femur Forces) which will be the objective assessment tool for obtained results, are briefly explained. Technical data of electromobile vehicle and DC engine are provided. Orthotropic, isotropic and anisotropic material parameters of numerical model are tabulated. This section also includes initial and boundary conditions and mesh structure used in ANSYS Workbench LS-DYNA.

**Results:** In terms of axial femur forces, seat belted dummy models are subjected to lower axial forces for all kinds of structural material scenarios in comparison to unbelted dummy model (Unbelted dummy right femur: from -2,47 kN up to -5,48 kN; left femur: from -1,56 kN up to -4,02 kN. Belted dummy right femur: from 1,6 kN up to 3,75 kN, left femur: from 1,93 kN up to 3,28 kN). Resultant head and chest and injury criteria of belted dummies are far higher (from 220,8 up to 1355) than unbelted ones (between 168,7 and 209,1).

**Conclusion:** Under the light of the presented results, the first thing that draws attention is that head and chest injury parameters are lower in models without seat belt compared to models with seat belt. This situation, which initially convinces one to perceive that models without seat belts are safer, actually demonstrates the life-saving feature of the seat belt. The dummy model strain in the models with seat belts has been excessive due to the fact that the seat belt overcomes the inertia of the dummy model. In models without seat belts, the dummy model continued its movement towards the front of the vehicle while maintaining its inertia. Therefore, their head and chest strain parameters were lower than the models with seat belts.

In models without a seat belt, the feet of the dummy model directly hit the support plate, causing huge forces and moments to occur. In this case, the feet were severely damaged, the ankles turned upside down and the solution could not be continued. Assuming that the solution continues, it is straightforward to estimate that models without seat belts will be thrown out of the vehicle and they would be exposed to a serious injury risk.



## Önceden Tasarlanmış Elektromobil Aracın Çarpışma Analizi

Bora YILDIRIM<sup>ID</sup> Zekeriya ÖZCAN<sup>ID</sup> Erdem AKTAŞ<sup>ID</sup>

Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Beytepe/ANKARA

### Öz

Ulaştırma sektöründe yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorların enerji kaynağı olan fosil yakıtlara olan ihtiyaç sürekli artmasına rağmen rezervler ise sürekli olarak azalmaktadır. Bununla birlikte yakıt yanma reaksiyonu sonucu egzoz gazı emisyonlarının etkisi ile çevreye büyük zararlar verilmektedir. Bu nedenler ile alternatif enerji kaynakları ile çalışan araçlar geliştirilmeye başlanmıştır. Bu kapsamda, günümüzde tamamen elektrikli araç geliştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Jant içi elektrik motoru çalışmaları ise tamamen elektrikli araç geliştirmelerinden birisidir. Bu çalışmada, önceden tasarlanmış bir elektromobil aracın düz sert bir duvara önden çarpışması, ANSYS Workbench LS-DYNA bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımı aracılığı ile numerik olarak incelenmiştir. Analiz, yapısı gereği zamana bağlı dinamik bir analiz olduğundan dolayı açık (İng. Explicit) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak icra edilmiştir. Araç modeli içine kukla model yerleştirilerek kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde çarpışma etkisi ile oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerleri verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler, çeşitli otoriteler tarafından kabul görmüş olan yaralanma kritik sınır değerleri ile karşılaştırılarak kukla modelin yaralanma durumu ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur.

### Crash Analysis of a Pre-Engineered Electromobile Vehicle

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 21/01/2020  
 Düzeltme: 24/04/2020  
 Kabul: 27/04/2020

#### Anahtar Kelimeler

*Çarpışma Analizi*  
 Sonlu Elemanlar Yöntemi  
 Elektromobil Araç  
 Kukla Model

#### Keywords

*Crash Analysis*  
 Finite Element Method  
 Electromobile Vehicle  
 Dummy Model

#### Abstract

Although the need for fossil fuels, which is the energy source of internal combustion engines that are widely used in the transportation sector, increases continuously, the reserves are continuously decreasing. However, the fuel combustion reaction results in large damages to the environment due to effects of exhaust gas emissions. For these reasons, vehicles that work with alternative energy sources are being developed. In this context, the development of fully electric vehicles is being carried out today. In-wheel electric motor studies are one of the most fully electric vehicle developments. In scope of this study, frontal collision of a pre-engineered electromobile vehicle to straight rigid wall is examined via ANSYS Workbench LS-DYNA computer aided engineering (CAE) software. Since the analysis is a time-dependent dynamic analysis due to its structure, it has been performed by using explicit finite element method. The data of the acceleration, force and deflection values formed by collision effect on the head, chest and femur of the dummy were obtained by placing dummy into the vehicle model. The data obtained were compared with the critical limit values accepted by various authorities and the inferences were made regarding the injury status of dummy.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan geleneksel içten yanmalı motorların tarih sahnesine çıkışı 17. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. Gücünü fosil yakıtların yanma reaksiyonu sonucu elde eden motorlar, gerek fosil yakıtların gün geçtikçe tükenmesi gerekse de çevreye verdiği zararlar yüzünden günümüzde yerlerini alternatif enerjili araçlara bırakmaya başlamışlardır. Kimyasal enerji kaynağının yerini almaya başlayan elektrik enerjili araçlar gün geçtikçe yeni tasarımları ile otomobil pazarında ağırlığını hissettirmeye başlamıştır.

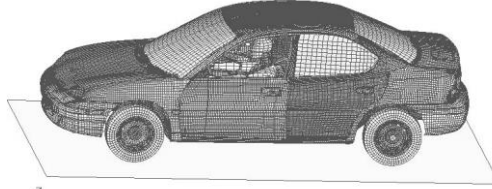
Ülkemizde ise geleneksel içten yanmalı motoru ile elektrik motorunu bünyesinde barındıran hibrit araç piyasası ile tam elektrikli araçların önünün açılacağı yadsınamaz bir gerçektir. Avantajlarının yanı sıra tam elektrikli araçların dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemli ise elektrik motorunun tahriğini

sağlayan araç bataryasının ömrünün kısa olmasıdır. Bu sorun kullanıcıya batarya değişimi veya kiralanması gibi ek maliyetler getirmektedir. Bu sorunun üstesinden gelinmesi için birçok ar-ge çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalardan önemli biri de jant içi elektrik motorları olarak gösterilebilir. Jant içi elektrik motorları ile herhangi bir güç aktarım elemanına ihtiyaç duyulmadan güç direk olarak tekerlere verilmektedir. Bu özelliği ile fazla ağırlığın ve güç aktarım elemanlarında vuku bulan güç kayıplarının önüne geçilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ise önceden tasarlanmış arka jant içi elektrik motorlarına sahip önceden tasarlanmış elektromobil aracın düz bir duvara çarpışması, sonlu elemanlar yazılımı ile nümerik olarak simüle edilecektir. Çarpışma analizi araç içinde bulunan kukla modelin (dummy) baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerlerinden yola çıkılarak yaralanma durumları ile ilgili değerlendirmelerde bulunulacaktır.

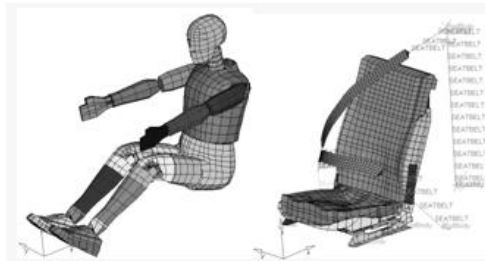
Çarpışma analizi konusunda literatüre geçmiş pek çok yayın bulunmaktadır. Ambati ve diğ. [1] tarafından yapılan nümerik çarpışma analizi bunlardan birisidir. Bu çalışmada Chevrolet C-1500 aracın yaklaşık 56 km/h hızla rijit bir duvara önden çarpması incelenmiştir. Aracın motor, radyatör, kapı, kaporta, tampon gibi parçalarının malzeme parametreleri değiştirilerek oluşan deformasyon incelenmiş ve NCAC araç modeli ile yapılan çarpışma analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Berzi ve diğ. [2] tarafından yapılmış olan diğer bir çalışmada, dört tekerlekli prototip elektrikli aracın dört ayrı çarpışma senaryosu üzerinde durulmuştur. Çarpışma senaryolarında, aracın rijit bir bariyere önden çarpması, araca bir otomobilin arkadan çarpması (ISO13232, tip 131), araca bir otomobilin yandan çarpması (ISO13232, tip 143) ve aracın bir otomobile yandan çarpması (ISO13232, tip 413) durumları konu alınmıştır. Her bir senaryoda, araç için kritik bileşen olarak belirlenen sağ ve sol bataryaların hasar durumu hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Li ve diğ. [3] kukla modele sahip bir aracın, 50 km/h hızla rijit bir duvar tarafından arkadan çarpılma durumunu incelemiştir. Analizde kullanılan araç modeli Şekil 1’de gösterilmektedir.



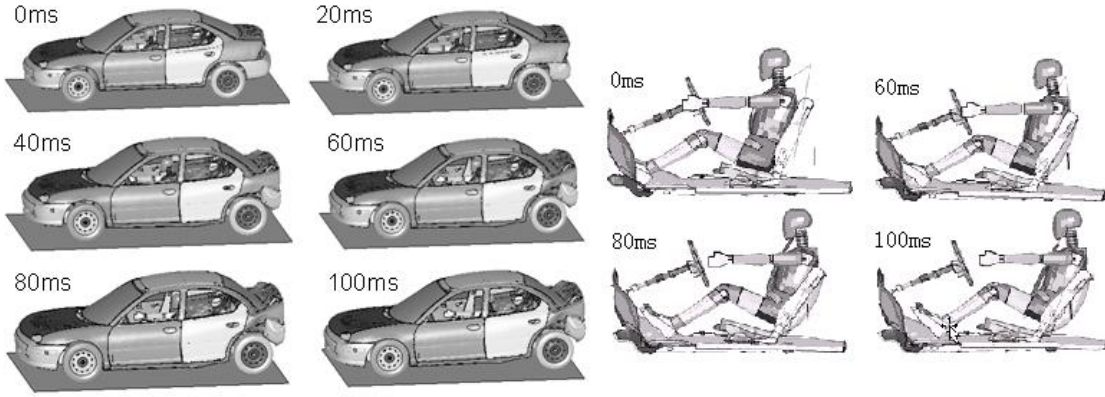
**Şekil 1.** Sonlu eleman araç modeli [3]

Kukla model olarak %50’lik Hibrit III kukla modeli kullanılmıştır. Kukla model için ayrıca emniyet kemeri oluşturulmuştur. Kukla model ve emniyet kemerli koltuk modeli Şekil 2’de gösterilmektedir.



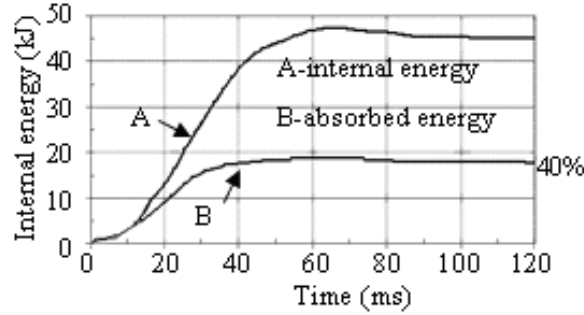
**Şekil 2.** Sonlu eleman kukla ve koltuk modeli [3]

Analiz sonunda aracın ve kukla modelin durumları Şekil 3’te yer almaktadır.



**Şekil 3.** Analiz sonrası aracın durumu (solda), kukla modelin durumu (sağda) [3]

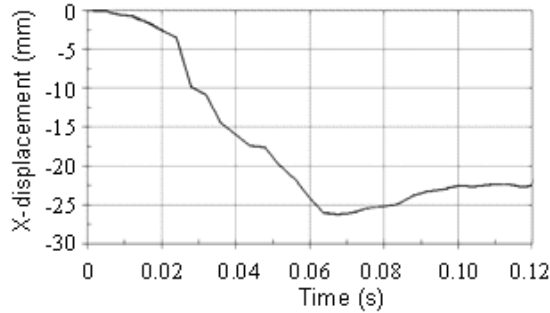
Analizde temel olarak aracın arka kısmının, yakıt tankının hasar durumları ve kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiği yaralanmaları incelenmiştir.



**Şekil 4.** Enerji sönmleme eğrisi [3]

Şekil 4'te gösterilen aracın arka yapısal parçalarının, 0-40 ms arasındaki iç ve sönmlenen enerji grafiklerine göre aracın arka tamponu toplam enerjinin %24,7'sine karşılık gelen 12,5 kJ enerjiyi sönmlemektedir. Aracın arka tarafı ise 7,74 kJ büyüklüğünde enerjiyi sönmleyebilmiştir. Buradan aracın enerjiyi sönmleyen arka tamponunun iyi bir etki yaptığı söylenebilmektedir. Ancak aynı durumun, aracın arka iskelet dizaynı için söylenemeyeceği görülmektedir.

Arkadan çarpışmalarda, yakıt deposunun deformasyonu ve yakıt sızdırmazlık durumu önemli bir değerlendirme unsurudur. Yakıt tankının destek köşebendinin sıkışması nedeni ile tankın alt kısmı ciddi deformasyona uğramıştır. Şekil 5'te yakıt tankının deformasyona uğramayan civata ile sabitlenmiş alt noktasına göre tankın arka duvarındaki ciddi deformasyon noktasının yer değiştirme grafiği yer almaktadır.



**Şekil 5.** Yakıt deposunun deformasyon sonucu yer değiştirmesi [3]

Grafik incelendiğinde GB-20072-2006 standardına göre yakıt deposu emniyeti sağlandığı görülmektedir.



Kukla modelin baş, göğüs ve uyluk ve uyluk kemiği yaralanma parametreleri Tablo 1’de görülebilmektedir. Baş yaralanma kriteri HIC, göğüs yaralanma kriteri THPC,  $C_{3ms}$  ve uyluk kemiği yaralanma kriteri FPC değerleri limitlerin altında kalmıştır. Ancak sürücü ve yolcu boyun korumasının geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 1.** Kukla model yaralanma kriterleri simülatif ve kritik değerleri [3]

| Yaralanma Kriterleri | Simülatif Değer               | Kriter       |
|----------------------|-------------------------------|--------------|
| HIC                  | 664                           | $\leq 1000$  |
| THPC                 | 30 mm                         | $\leq 50$ mm |
| $C_{3ms}$            | 48 g                          | $\leq 60$ g  |
| FPC                  | 1,6 kN (sol)<br>1,13 kN (sağ) | $\leq 10$ kN |

## 2. TEORİK ÖZET (THEORETICAL SUMMARY)

Bu bölümde yapılan analizlerin değerlendirmesine temel teşkil eden yaralanma kriterleri özetlenecektir. Yaralanma kriterlerine giriş yapmadan önce kısaltılmış yaralanma derecesi (AIS) üzerinde durulması önem arz etmektedir.

Otomotiv Tıbbi Gelişimi Derneği (AAAM) tarafından AIS, mevcut tıbbi terminoloji içerisinde uluslararası kabul görmüş bir yaralanma şiddeti derecelendirme aracı olarak tanımlanmaktadır. AIS, anatomiye dayalı vücudun değişik bölgelerindeki yaralanma şiddetini 1’den 6’ya kadar numaralandıran (1=en düşük, 6=en yüksek) küresel şiddet puanlama sistemidir. AIS, çarpışma sonucu yaralanan hastanın yaralanma şiddeti skoru (ISS) hesaplamasının temelidir [4].

AIS, yaralanmaları tanımlamak için standardize edilmiş bir terminoloji sağlar ve yaralanmaları şiddetine göre tasnif eder. AIS içinde her türlü sağlık ve araştırma kayıtları ileriye dönük olarak kodlanabilmektedir. AIS kodlarına, DSÖ Uluslararası Kökenli Hastalıkların Sınıflandırılması örneğinde olduğu gibi yaygın kullanılan hastalık ve yaralanma kodlarını haritalayan algoritmalar atanabilmektedir. Bu haritalamalardan bazıları travma kayıtlarına ve tıbbi kayıt yazılımlarına programlanmıştır. Bazıları da geliştiriciler tarafından sağlanmıştır [4].

Tablo 2’de AIS şiddet puanları yer almaktadır:

**Tablo 2.** AIS şiddet puanları [5]

| AIS | Şiddet kodu                         |
|-----|-------------------------------------|
| 0   | Yaralanma yok                       |
| 1   | Hafif                               |
| 2   | Orta                                |
| 3   | Ciddi                               |
| 4   | Ağır                                |
| 5   | Kritik                              |
| 6   | Maksimum (Ölümün kaçınılmaz olduğu) |
| 9   | Bilinmeyen                          |

Ek Teklif Edilen Düzenleme Duyurusu (SNPRM) tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tabloda her bir vücut bölümü için tavsiye edilen yaralanma kriteri ve kritik değerleri yer almaktadır.

Baş koruması için tavsiye edilen HIC [6-15], bütün kukla model büyüklükleri için uygun bir şekilde ölçeklendirilmiştir. SNPRM Nij 1,0 boyun kriteri, kritik değeri ile birlikte bütün kukla modeller için tavsiye edilmektedir.

Göğüs yaralanması olasılık oranlarının tahmininde kullanılan CTI [16-19] için tavsiye edilen göğüs sapması ve omurga ivmesi limit değerleri tavsiye edilmiştir. Uyluk kemiği yükü [20] ise sadece yetişkin kukla modeller için tavsiye edilmiştir [9].

**Tablo 3.** SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için tavsiye edilen yaralanma kriterleri [9]

| Tavsiye edilen kriter          | Büyük cüsseli erkek | Orta cüsseli erkek | Küçük cüsseli kadın | Çocuk (6 yaş) | Çocuk (3 yaş) | Bebek (1 yaş) |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|
| Baş kriteri: HIC <sub>15</sub> | 700                 | 700                | 700                 | 700           | 570           | 390           |
| Boyun kriteri:<br>SNPRM Nij    | 1,0                 | 1,0                | 1,0                 | 1,0           | 1,0           | 1,0           |
| Kritik Değerler                |                     |                    |                     |               |               |               |
| Çeki ve bası (N)               | 5440                | 4500               | 3370                | 2800          | 2120          | 1465          |
| Bükülme (Nm)                   | 415                 | 310                | 155                 | 93            | 68            | 43            |
| Uzama (Nm)                     | 166                 | 125                | 62                  | 39            | 27            | 17            |
| Göğüs kriteri                  |                     |                    |                     |               |               |               |
| 1. Omurga ivmesi (g)           | 55                  | 60                 | 60                  | 60            | 55            | 50            |
| 2. Göğüs sapması (mm)          | 70                  | 63                 | 52                  | 40            | 34            | 30            |
| Alt uzuv kriteri               |                     |                    |                     |               |               |               |
| Uyluk kemiği yükü (kN)         | 12,7                | 10,0               | 6,8                 | -             | -             | -             |

Bununla birlikte SNPRM tarafından önerilen kriterlere çeşitli dernekler, motorlar üreticileri tarafından çeşitli yorumlar yapılmıştır. Baş yaralanma kriteri (HIC) ile ilgili olarak Amerikan Tıp Asistanları Birliği (AAMA) öneride bulunmuştur. AAMA, Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenmiş olan 36 milisaniye HIC aralığı yerine Kanada Federal Motorlu Taşıt Güvenliği Standardında kullanılan 15 milisaniye aralığı ile değerlendirme yapılmasını önermiştir [9].

Ayrıca verileri analiz etmek için farklı bir istatistik tekniği ve değişik kukla model büyüklükleri için farklı ölçeklendirme tekniği önermiştir. AAMA tarafından önerilen HIC değerleri, NRPM tarafından önerilen değerler ile birlikte Tablo 4'te yer almaktadır.

**Tablo 4.** AAMA ve NRPM tarafından önerilen baş yaralanma kriterleri [9]

| Kukla model büyüklüğü      | AAMA tavsiyesi<br>HIC <sub>15</sub> | NRPM tavsiyesi<br>HIC <sub>36</sub> |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CRABI 12 aylık             | 390                                 | 660                                 |
| HIII – 3 yaş               | 570                                 | 900                                 |
| HIII – 6 yaş               | 723                                 | 1000                                |
| HIII – küçük cüsseli kadın | 779                                 | 1000                                |
| HIII – orta cüsseli erkek  | 700                                 | 1000                                |

Göğüs yaralanma kriteri ile ilgili olarak AAMA ve NRPM tarafından önerilen değerler ise Tablo 5'te yer almaktadır.

**Tablo 5.** AAMA ve NRPM tarafından önerilen göğüs yaralanma kriterleri [9]

| Kukla model                    | Göğüs sapması (mm) |      | Göğüs sapma oranı (m/s) |      | Göğüs ivmesi (g) |      |
|--------------------------------|--------------------|------|-------------------------|------|------------------|------|
|                                | AAMA               | NRPM | AAMA                    | NRPM | AAMA             | NRPM |
| CRABI<br>12 aylık              | 31                 | 37   | 7,6                     | -    | 50               | 40   |
| HIII<br>3 yaş                  | 36                 | 42   | 8,0                     | -    | 55               | 50   |
| HIII<br>6 yaş                  | 40                 | 47   | 8,5                     | -    | 60               | 60   |
| HIII<br>küçük cüsseli<br>kadın | 53                 | 62   | 8,2                     | -    | 73               | 60   |
| HIII<br>orta cüsseli<br>erkek  | 64                 | 76   | 8,2                     | -    | 60               | 60   |

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

Bu bölümde, 2015 yılı TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları için imal edilen elektromobil aracın analizinde izlenen aşamalar üzerinde durulacaktır. Analize giriş yapılmadan önce imal edilen araç özellikleri hakkında bilgi verilmesi daha uygun olacaktır. Araç teknik özellikleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

**Tablo 6.** Araç teknik özellikleri [21]

| Özellik   | Birim | Değer  |
|-----------|-------|--------|
| Uzunluk   | mm    | 2916,5 |
| Genişlik  | mm    | 1240   |
| Yükseklik | mm    | 1260   |

|                                |   |  |
|--------------------------------|---|--|
| Tekerlek sayısı                | adet  | 4  |
| Şasi                           | malzeme   | 40x40 mm çelik profil                                    |
| Ağırlık (pilotsuz)             | kg  | 130  |
| Kabuk                          | malzeme   | karbon elyaf-epoksi<br>kompozit şasi üstü kabuk<br>gövde |
| Fren sistemi                   | hidrolik, disk, pabuç, ön,<br>arka, el freni                            | ön, arka, el freni: hidrolik,<br>disk ve kaliperli fren  |
| Lastikler yarıçapı ön          | mm  | 300  |
| Lastikler genişliği ön         | mm  | 85   |
| Lastikler yarıçapı arka        | mm  | 300  |
| Lastikler genişliği arka       | mm  | 85   |
| Güneş paneli                   | tipi  | yok  |
| Güneş paneli verimliliği       | %   | -  |
| Güneş paneli alanı             | m <sup>2</sup>  | -  |
| Güneş paneli gücü              | Watt  | -  |
| Mppt                           | (var/yok);<br>kendi tasarım, hazır ürün                                 | yok  |
| Telemetri                      | (var/yok);<br>aktarılan bilgiler (hız, batarya<br>durumu, sıcaklık vb.) | var (hız, sıcaklık, akım,<br>voltaj)                     |
| Motor                          | tipi  | fırçasız DC motor (BLDC) –<br>kendi tasarım ve imalat    |
| Motor sürücü                   | (var/yok);<br>kendi tasarım, hazır ürün                                 | var (hazır ürün)   |
| Motor gücü                     | kW  | 1 kW x 2   |
| Motor verimliliği              | %   | 91   |
| Motor ağırlığı                 | kg  | 4,5 x 2 = 9  |
| Batarya                        | türü  | Li-FePO <sub>4</sub>                                     |
| Batarya nominal voltajı        | Volt  | 48   |
| Bataryanın maksimum<br>voltajı | Volt  | 54   |
| Nominal batarya gücü           | Wh  | 1000   |
| Yakıt pili gücü                | kW  | -  |
| Hidrojen tüpü sayısı           | #   | -  |

|                       |     |   |
|-----------------------|-----|---|
| Hidrojen tüpü basıncı | bar | - |
|-----------------------|-----|---|

Aracın arka tekerleklerinde jant içi 2 adet elektrik motoru kullanılmıştır. Yarış takımının kendi tasarım ve imalatı olan fırçasız DC motorun özellikleri Tablo 7’de yer almaktadır.

**Tablo 7.** Fırçasız DC motor özellikleri [21]

| Parametre                     | Değer                                       |
|-------------------------------|---|
| Anma çıkış gücü               | 1000 Watt                                   |
| Anma gerilimi                 | 48 Volt                                     |
| Kutup sayısı                  | 46  |
| Stator oluk sayısı            | 51  |
| Stator iç çapı                | 148 mm                                      |
| Stator paket uzunluğu         | 25,8 mm                                     |
| Stator sacı                   | M330-50A                                    |
| Oluk başına sarım sayısı      | 12  |
| Hava aralığı                  | 1 mm  |
| Rotor çeliği                  | St-37                                       |
| Mıknatis kalınlığı            | 3,2 mm                                      |
| Mıknatis malzemesi            | NdFeB-N40SH (150 °C)                        |
| Toplam ağırlık                | 3,32 kg                                     |
| Hava aralığı akı yoğunluğu    | 0,834 T                                     |
| Vuruntu torku                 | 0,0021 Nm                                   |
| Ortalama giriş akımı          | 22,868 A                                    |
| Spesifik elektrik yüklemesi   | 20,104 A/mm                                 |
| Stator sargısı akım yoğunluğu | 4,89 A/mm <sup>2</sup>                      |
| Demir kaybı                   | 53,677 W                                    |
| Bakır kaybı                   | 43,974 W                                    |
| Toplam kayıplar               | 97,652 W                                    |
| Verim, %                      | 91,103 (Sürtünme ve rüzgar kayıpları hariç) |
| Anma hızı                     | 452 d/d                                     |
| Anma momenti                  | 21,102 Nm                                   |
| Sargı düzenlemesi             | 3 faz, 51 oluk tam kalıp sarım              |

Aracın imalatı tamamlanmış görüntüsü Şekil 6’da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Aracın görüntüsü [21]

Analiz, aracın 7,1 m/s (25,56 km/h) hızla rijit bir duvara önden tam çarpışması durumu için yapılmıştır. ANSYS Workbench LS-DYNA yardımı ile yapılan analiz aşamaları detaylı olarak incelenecektir.

### 3.1. Analizde Kullanılan Model (Utilized Model in Analysis)

Analizi yapılan araç, Tablo 8’de adedi ve biçimi verilen parçalardan oluşmaktadır.

**Tablo 8.** Araç parçaları

| No | Parça Adı    | Parça Biçimi    | Adet |
|----|--------------|-----------------|------|
| 1  | Kabuk Kasa   | Yüzey (Surface) | 1    |
| 2  | Destek Sacı  | Yüzey (Surface) | 1    |
| 3  | İskelet Şasi | Katı (Solid)    | 1    |
| 4  | Koltuk       | Katı (Solid)    | 2    |
| 5  | Amortisör    | Katı (Solid)    | 4    |
| 6  | Jant         | Katı (Solid)    | 4    |
| 7  | Lastik       | Katı (Solid)    | 4    |

Araç parçalarından; iskelet şasi, destek sacı ve amortisörler yapı çeliği, kabuk kasa tek katmanlı dokuma karbon epoksi kompozit, koltuklar anizotropik silikon, jantlar alüminyum, lastikler kauçuk malzeme olarak aslına uygun tanımlanmıştır. Analizi tamamlayıcı parçalardan duvar ve zemin yapı çeliği olarak tanımlanmıştır. Analizde kullanılan izotropik elastik, anizotropik elastik, ortotropik malzemeler ve mekanik özellikleri Tablo 9-11 arasında gösterilmiştir.

**Tablo 9.** İzotropik elastik malzeme parametreleri

| Malzeme Özellikleri           | Yapı Çeliği | Alüminyum | Lastik  |
|-------------------------------|-------------|-----------|---------|
| Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ] | 7850        | 2770      | 2768    |
| Young modülü [Pa]             | 2,1E11      | 7,1E10    | 6,9E9   |
| Poisson oranı                 | 0,3         | 0,33      | 0,49    |
| Kayma modülü [Pa]             | 7,69E10     | 2,67E10   | 2,31E9  |
| Bulk modülü [Pa]              | 1,67E11     | 6,96E10   | 1,15E11 |

**Tablo 10.** Anizotropik elastik malzeme parametreleri

| Malzeme Özellikleri           | Silikon |       |       |      |      |      |
|-------------------------------|---------|-------|-------|------|------|------|
| Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ] | 2330    |       |       |      |      |      |
| Anizotropik elastisite        | 166E3   |       |       |      |      |      |
|                               | 64E3    | 166E3 |       |      |      |      |
| Young modülleri<br>[MPa]      | 64E3    | 64E3  | 166E3 |      |      |      |
|                               | 0       | 0     | 0     | 80E3 |      |      |
|                               | 0       | 0     | 0     | 0    | 80E3 |      |
|                               | 0       | 0     | 0     | 0    | 0    | 80E3 |

**Tablo 11.** Ortotropik malzeme parametreleri

| Malzeme Özellikleri            | Dokuma Karbon Epoksi Kompozit |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]  | 2330                          |
| Ortotropik elastisite          |                               |
| X yönündeki young modülü [MPa] | 59160                         |
| Y yönündeki young modülü [MPa] | 59160                         |
| Z yönündeki young modülü [MPa] | 7500                          |
| XY poisson oranı               | 0,04                          |
| YZ poisson oranı               | 0,3                           |
| XZ poisson oranı               | 0,3                           |
| XY kayma modülü [MPa]          | 17500                         |
| YZ kayma modülü [MPa]          | 2700                          |
| XZ kayma modülü [MPa]          | 2700                          |
| Ortotropik gerilme limitleri   |                               |
| X yönündeki çekme [MPa]        | 513                           |
| Y yönündeki çekme [MPa]        | 513                           |
| Z yönündeki çekme [MPa]        | 50                            |
| X yönündeki basma [MPa]        | -437                          |
| Y yönündeki basma [MPa]        | -437                          |
| Z yönündeki basma [MPa]        | -150                          |
| XY yönündeki kayma [MPa]       | 120                           |
| YZ yönündeki kayma [MPa]       | 55                            |
| XZ yönündeki kayma [MPa]       | 55                            |

### 3.2. Model Ağ Yapısı ve Başlangıç Koşullarının Oluşturulması (Creation of Model Mesh and Initial Conditions)

Modelin, sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilebilmesi için uygun bir ağ yapısı (mesh) oluşturulması gerekmektedir. Ağ yapısı oluşturmadan önce tanımlanan değerler Tablo 12’de gösterilmektedir.

**Tablo 12. Tanımlanan değerler**

| <b>Seçenek</b> | <b>Varsayılanlar</b>                               |                       |
|----------------|--|-----------------------|
| 1              | Fiziksel referans                                  | Eksplisit             |
| 2              | Eleman düzeni                                      | Lineer                |
| 3              | Eleman boyutu                                      | Varsayılan            |
| <b>Seçenek</b> | <b>Boyutlandırma</b>                               |                       |
| 1              | Uyarlanabilir boyutlandırma kullanımı              | Evet                  |
| 2              | Çözünürlük   | 5                     |
| 3              | Ağ yapısı düzeltmesi                               | Evet                  |
| 4              | Düzeltilme boyutu                                  | Varsayılan            |
| 5              | Geçiş  | Yavaş                 |
| 6              | Yayıma açısı merkezi                               | Kaba                  |
| 7              | Başlangıç tane boyutu                              | Montaj                |
| <b>Seçenek</b> | <b>Kalite</b>                                      |                       |
| 1              | Ağ yapısı kalitesini kontrol et                    | Evet, hatalar ile     |
| 2              | Hedef kalite                                       | Varsayılan (0,050000) |
| 3              | Yumuşatma  | Yüksek                |
| 4              | Ağ yapısı metriği                                  | Hiçbiri               |
| <b>Seçenek</b> | <b>Şişirme</b>                                     |                       |
| 1              | Otomatik şişirme kullan                            | Hiçbiri               |
| 2              | Şişirme seçeneği                                   | Yumuşak geçiş         |
| 3              | Geçiş oranı  | 0,272                 |
| 4              | Maksimum tabaka                                    | 5                     |
| 5              | Büyüme oranı                                       | 1,2                   |
| 6              | Şişirme algoritması                                | Ön                    |
| 7              | Gelişmiş seçenekleri göster                        | Hayır                 |
| <b>Seçenek</b> | <b>Gelişmiş</b>                                    |                       |
| 1              | Paralel parça ağ yapısı oluşturmak için CPU sayısı | Program kontrollü     |
| 2              | Yeniden denemelerin sayısı                         | 0                     |
| 3              | Rijit cisim davranışı                              | Tamamen ağ yapısı     |
| 4              | Rijit yüz ağ yapısı                                | Dörtgen/üçgen         |



|   |                       |                   |
|---|-----------------------|-------------------|
| 5 | Üçgen yüzey ağ yapıcı | Program kontrollü |
| 6 | Topoloji kontrolü     | Hayır             |

Fiziksel olarak hareket etmesi gereken araç ve parçalarına başlangıç koşulları alt başlığı ile öteleme ve/veya dönme hızı verilmesi gerekmektedir. Aracın bütün parçaları için sabit 7,1 m/s (25,56 km/h) hız değeri, lastik ve jant parçalarına ise ilaveten 23,665 rad/s (225,98 rpm) dönme hız değeri tanımlanmıştır.

#### 4. BULGULAR (FINDINGS)

Analizde, 6 farklı durum için kukla modelin baş, göğüs ve uyluk kemiklerinde çarpışma etkisiyle oluşan ivme, kuvvet ve sapma değerleri incelenecektir. Tablo 13'te analizi yapılacak olan durumlar gösterilmektedir.

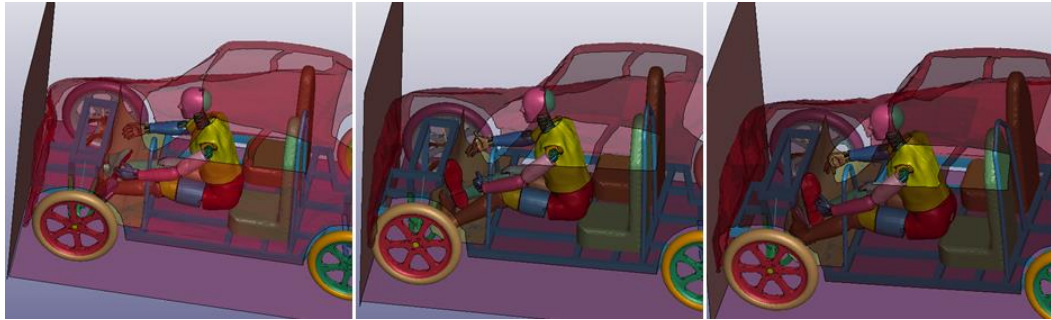
**Tablo 13.** Analiz senaryoları

| No | Emniyet Kemeri Durumu | Yapı Çeliği Elemanları Durumu |
|----|-----------------------|-------------------------------|
| 1  | Yok                   | Elastik                       |
| 2  | Yok                   | Plastik                       |
| 3  | Yok                   | Mukavim Plastik               |
| 4  | Var                   | Elastik                       |
| 5  | Var                   | Plastik                       |
| 6  | Var                   | Mukavim Plastik               |

Baş yaralanması durumu için baş yaralanma kriteri (HIC – Head Injury Criteria), göğüs yaralanması durumu için ise göğüs şiddet indeksi (CSI – Chest Severity Index) ve göğüs sapması parametreleri elde edilecektir. Uyluk kemikleri aksenal kuvvet grafikleri ile birlikte olası yaralanma durumları tespit edilebilecektir. HIC, CSI ve uyluk kemikleri grafiklerinin elde edilmesinde otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Channel Frequency Class (CFC) filtresi ile benzer olan LS-PrePost SAE filtresi (108 Hz) kullanılmıştır.

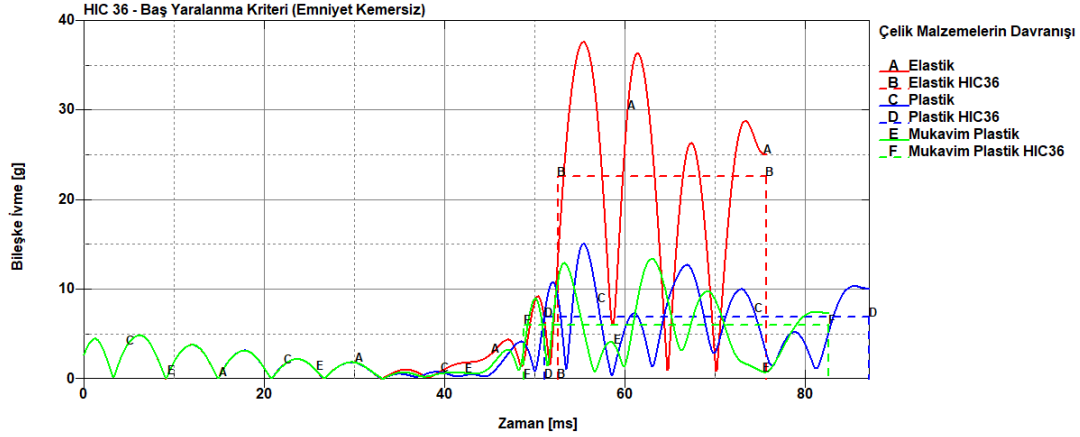
##### 4.1. Emniyet Kemersiz Durumlar için Bulgular (Findings for Cases without Seat Belt)

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 75,7487 ms sürmüştür. Plastisite özelliği sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 87,1227 ms sürmüştür. Mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm ise 82,6882 ms sürmüştür.



**Şekil 7.** Emniyet kemersiz durumlar için kukla modelin görünüşleri (Soldan sağa: elastik Model, plastik model, mukavim plastik model)

Görsellerden de anlaşılacağı üzere tüm modeller için (Elastik, Plastik ve Mukavim Plastik) emniyet kemeri tanımlanmadığından dolayı kukla modellerin ayak kısımları destek sacı parçasına çarparak kırılmış ve ayak bilekleri ters dönmüştür. Elastik, plastik ve mukavim plastik özellikleri sergileyen malzeme parametresi atanan modeller için elde edilen baş yaralanma kriteri değerleri Şekil 8’de gösterilmektedir.



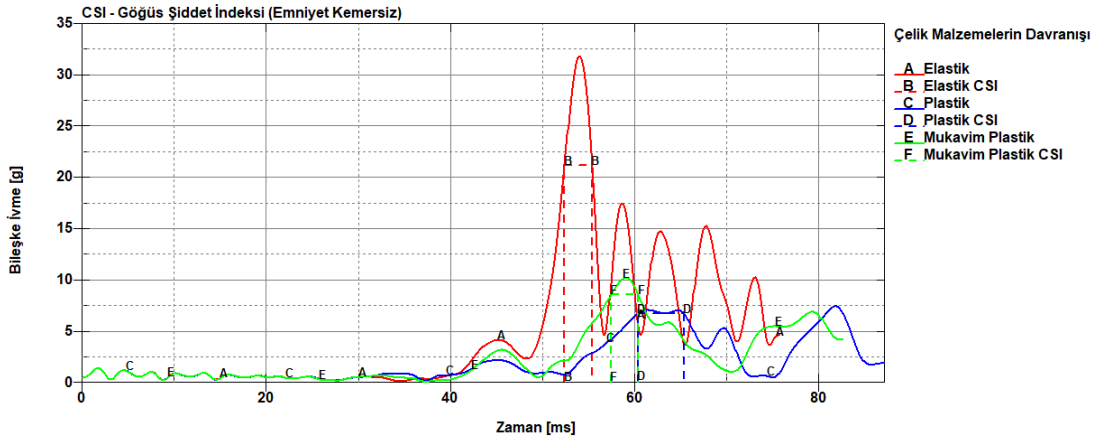
**Şekil 8.** Tüm modeller için baş yaralanma kriter değerleri

Elastik malzeme analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için değerler incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55,4 ms anında 37,7 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 209,1 olduğu görülmektedir.

Tablo 3’te belirtildiği üzere orta büyüklükteki Hibrit III erkek kukla model için 1000 HIC<sub>36</sub> değeri NRPM tarafından kritik sınır değer olarak önerilmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 210 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %2,87’dir.

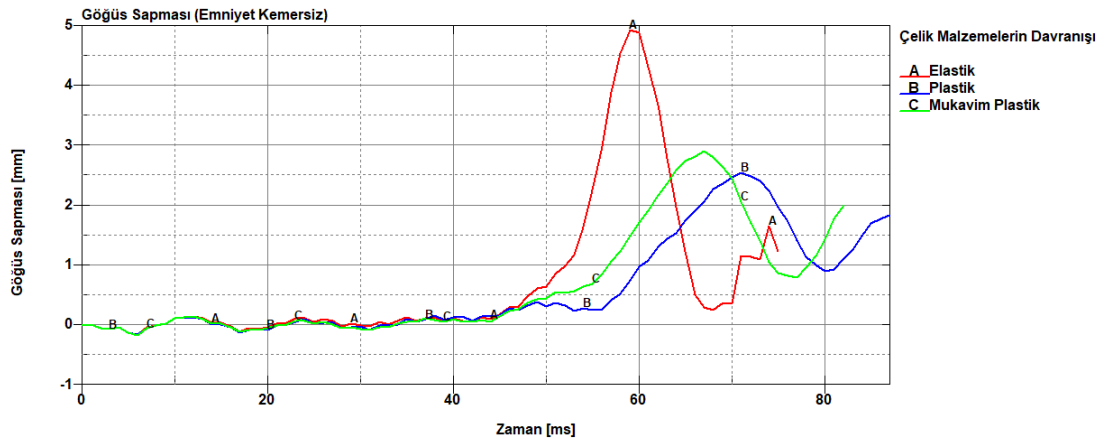
Plastik malzeme analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 55,4 ms anında 15,2 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 169,9 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. 170 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %1,54’tür.

Mukavim plastik analizinde kullanılan %50’lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 63 ms anında 13,4 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 168,7 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %47,21’dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 169 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %1,5’tir.



**Şekil 9.** Tüm modeller için CSI (Chest severity index) değerleri

Şekil 9 incelendiğinde, elastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 54 ms anında 31,9 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 21,22 g büyüklüğündedir. Plastik analiz sonucunda göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 81,8 ms anında 7,47 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 6,782 g büyüklüğündedir. Mukavim plastikte ise maksimum bileşke ivmenin 59 ms anında 10,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 8,602 g büyüklüğündedir.



**Şekil 10.** Tüm modeller için göğüs sapmaları

Şekil 10'daki göğüs sapmaları incelendiğinde elastik durumda maksimum sapmanın 59 ms anında 4,94 mm, plastikte 71 ms anında 2,56 mm, mukavim plastik için ise 67 ms anında 2,91 mm olduğu anlaşılmaktadır.

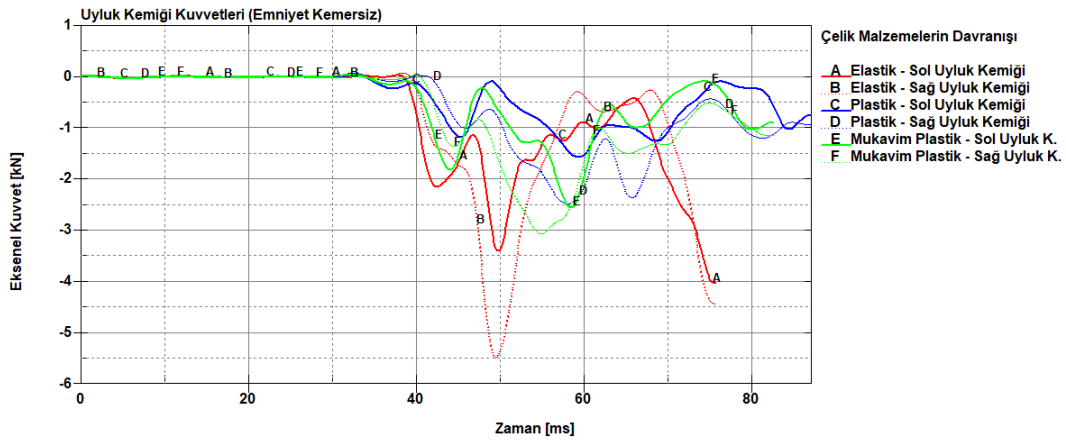
Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için göğüs yaralanma kriterleri olarak 3 ms aralığında 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) göğüs yaralanması riski %4,08'dir.

Plastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) göğüs yaralanması riski %1,42'dir.

Mukavim plastikte FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yaralanma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %94,68'dir.

Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) göğüs yaralanması riski %1,63'dür.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan aksenal kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 11'de yer almaktadır.



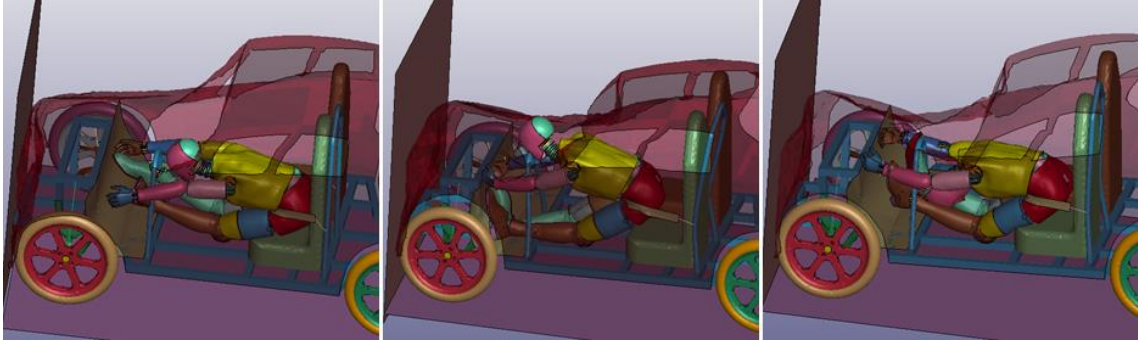
Şekil 11. Tüm modeller için zamana göre aksenal uyluk kuvvetleri

Sağ ve sol uyluk kemikleri için, tüm durumlarda kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 40 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve elastikte sağ uyluk kemiği için 49,5 ms anında 5,48 kN, sol uyluk kemiği için ise 75,7 ms anında 4,02 kN maksimum bası kuvveti oluşmaktadır. Plastikte sağ uyluk kemiği için 58,1 ms anında 2,47 kN, sol uyluk kemiği için ise 59,3 ms anında 1,56 kN, mukavim plastik için ise sağ uyluk kemiği için 54,9 ms anında 3,06 kN, sol uyluk kemiği için ise 58,5 ms anında 2,55 kN maksimum bası kuvvetleri oluşmaktadır.

Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN aksenal kuvvet sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastikte belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %35,46'dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri aksenal kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %4,98 ve %2,40'dır. Plastikte bu değerler uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %35,46'dır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %1,09 ve %0,68'dir. Mukavim plastikte ise uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre olasılık ( $AIS \geq 2$ ) %35,46'dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri aksenal kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %1,47 ve %1,13'dür.

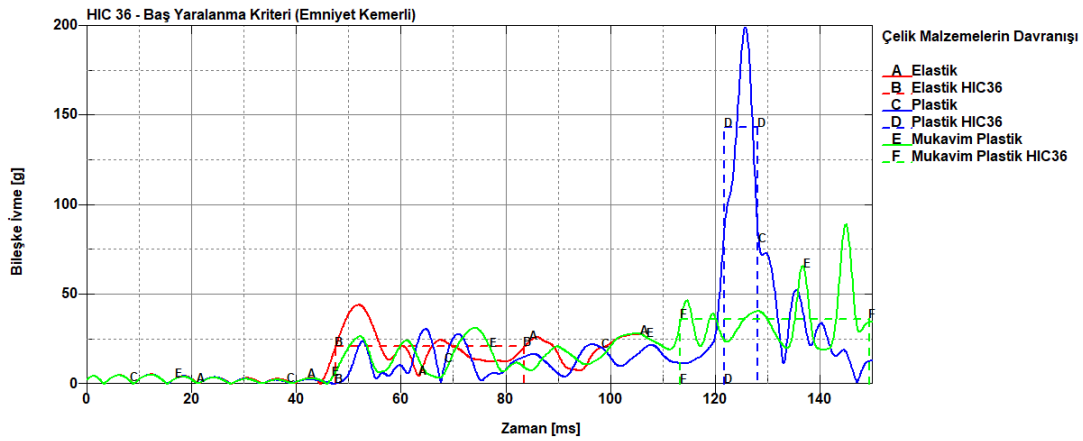
#### 4.2. Emniyet Kemerli Durumlar için Bulgular (Findings for Cases with Seat Belt)

Emniyet kemeri takılan modelde, şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 106,33 ms sürmüştür. Plastisite özelliği sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm, 150 ms sürmüştür. Mukavim plastik özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için yapılan çözüm de aynı şekilde 150 ms sürmüştür.



Şekil 12. Emniyet kemerli durumlar için kukla modelin görünüşleri (Soldan sağa: elastik model, plastik model, mukavim plastik model)

Emniyet kemerli modellerin hiçbirinde önceki modellerde olduğu üzere kırılma/bilek dönmesi vs. bulgulara rastlanmamış ve tüm modeller sorunsuz çalışmıştır. Emniyet kemerli durumlar için elastik, plastik ve mukavim plastik özellikleri sergileyen malzeme parametresi atanan modeller için elde edilen baş yaralanma kriteri değerleri Şekil 13'de gösterilmektedir.



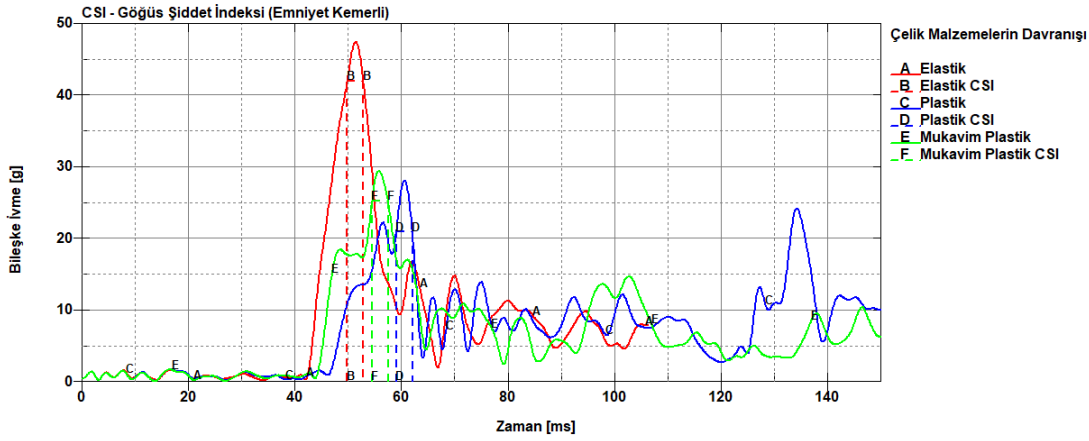
Şekil 13. Tüm modeller için baş yaralanma kriter değerleri (Emniyet kemerli)

Elastik malzeme analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için değerler incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 51,9 ms anında 44,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 220,8 olduğu görülmektedir.

Tablo 3'te belirtildiği üzere orta büyüklükteki Hibrit III erkek kukla model için 1000 HIC<sub>36</sub> değeri NRPM tarafından kritik sınır değer olarak önerilmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 221 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %3,22'dir.

Plastik malzeme analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 126 ms anında 200 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 1355 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde 1355 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin üstünde kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %61,41'dir.

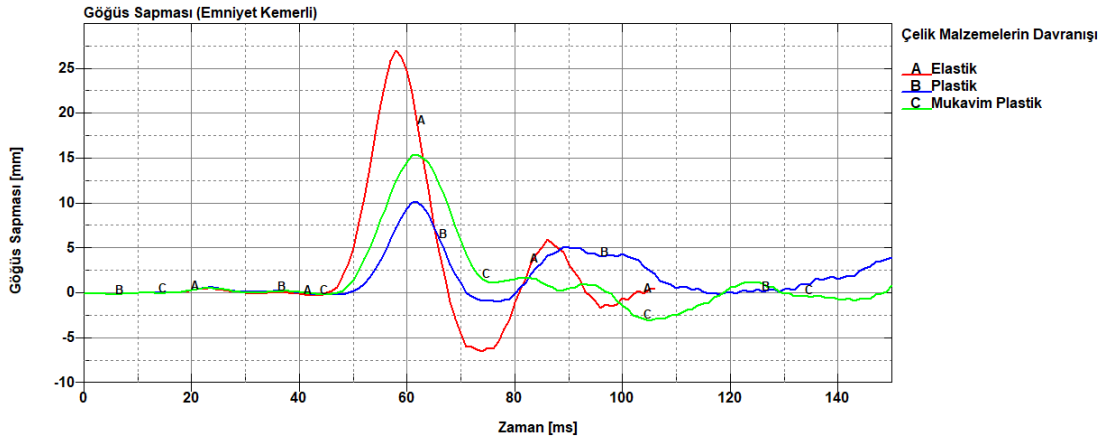
Mukavim plastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen grafik incelendiğinde baş merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 145 ms anında 89,3 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte maksimum bileşke ivmenin olduğu bölgede, HIC değerinin 382,6 olduğu görülmektedir. Belirlenen sınır değer için kafatasında kırık meydana gelme olasılığı, HIC yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) %47,21'dir. Bu bilgiler ışığında, analizde yaklaşık 383 HIC<sub>36</sub> değeri, kritik 1000 HIC<sub>36</sub> değerinin altında kalmıştır. HIC yaralanma riski eşitliğine göre ( $AIS \geq 2$ ) kafatasında kırık meydana gelme olasılığı %11,51'dir.



Şekil 14. Tüm modeller için CSI (Chest severity index) değerleri (Emniyet kemerli)

Şekil 14 incelendiğinde, elastik analizinde kullanılan %50'lik Hibrit III erkek kukla model için elde edilen göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 51,4 ms anında 47,6 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 42,11 g büyüklüğündedir. Plastik analiz sonucunda göğüs merkezindeki maksimum bileşke ivmenin 60,6 ms anında 28,2 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 21 g büyüklüğündedir.

Mukavim plastikte ise maksimum bileşke ivmenin 55,8 ms anında 29,5 g büyüklüğünde meydana geldiği görülmektedir. 3 ms aralığında omurga bileşke ivmesinin maksimum değeri ise 25,33 g büyüklüğündedir.



**Şekil 15.** Tüm modeller için göğüs sapmaları (Emniyet kemerli)

Şekil 15'deki göğüs sapmaları incelendiğinde elastik durumda maksimum sapmanın 58 ms anında 27,06 mm, plastikte 61 ms anında 10,19 mm, mukavim plastik için ise 62 ms anında 15,49 mm olduğu anlaşılmaktadır.

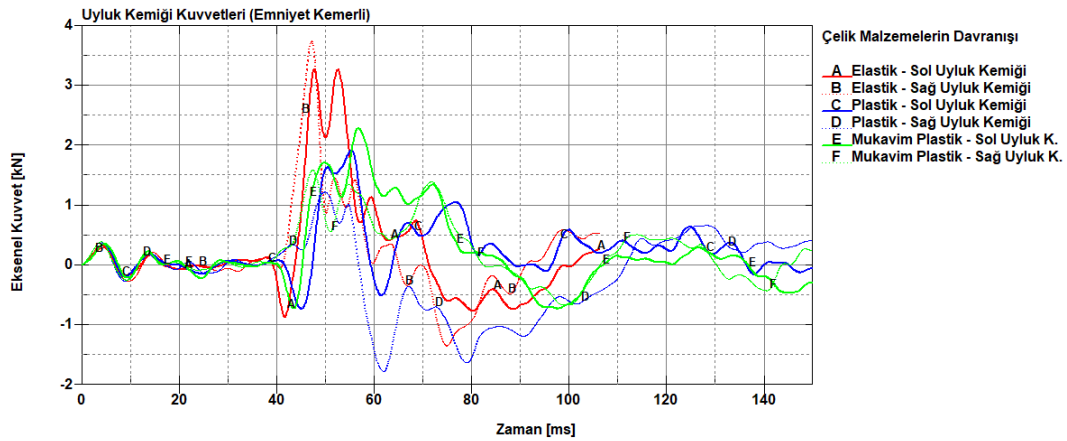
Tablo 2'de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için göğüs yarananma kriterleri olarak 3 ms aralığında 60 g omurga ivmesi ve 63 mm göğüs sapması değerleri sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) göğüs yarananması riski %39,24'tür.

Plastik durumda FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) %94,68'dir. Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) göğüs yarananması riski %5,51'dir.

Mukavim plastikte FMVSS 208 numaralı standardı için belirlenen sınır değerler kullanılarak hesaplanan CTI değeri 1,28'dir. Belirlenen sınır değerler için göğüs yarananma olasılığı, CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) %94,68'dir.

Buna göre analiz sonucunda elde edilen 3 ms aralığındaki maksimum göğüs ivmesi ve göğüs sapması değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. CTI cinsinden göğüs yarananma riski eşitliğine göre (AIS $\geq$ 2) göğüs yarananması riski %9,62'dir.

Sağ ve sol uyluk kemiklerinde oluşan aksenal kuvvetlerin zamana göre değişimi Şekil 16'da yer almaktadır.



**Şekil 16.** Tüm modeller için zamana göre eksenel uyluk kuvvetleri (Emniyet kemerli)

Sağ ve sol uyluk kemikleri için, tüm durumlarda kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde yaklaşık 40 ms anına kadar kemikler üzerinde kayda değer bir kuvvet oluşmamaktadır. Çarpışmanın etkisiyle bası kuvveti oluşmaya başlamakta ve elastikte Sağ uyluk kemiği için 47,2 ms anında 3,75 kN, sol uyluk kemiği için ise 47,7 ms anında 3,28 kN maksimum çeki kuvvetleri oluşmaktadır. Plastikte sağ uyluk kemiği için 62 ms anında 1,77 kN bası, sol uyluk kemiği için ise 55,3 ms anında 1,93 kN, mukavim plastikte sağ uyluk kemiği için 47,4 ms anında 1,6 kN çeki, sol uyluk kemiği için ise 56,7 ms anında 2,29 kN çeki maksimum kuvvetleri oluşmaktadır.

Tablo 2’de gösterildiği üzere SNPRM tarafından FMVSS 208 numaralı standardı için orta cüsseli erkek kukla model için uyluk kemiği yaralanma kriteri olarak 10 kN eksenel kuvvet sınır değer olarak tavsiye edilmiştir. Elastikte belirlenen sınır değer için uyluk kemiği yaralanma olasılığı, uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %35,46’dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %2,09 ve %2,73’tür.

Plastikte bu değerler uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) %35,46’dır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %0,76 ve %0,82’dir. Mukavim plastikte ise uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre olasılık (AIS≥ 2) %35,46’dır. Buna göre analiz sonucunda elde edilen sağ ve sol uyluk kemikleri eksenel kuvvet değerleri sınır değerlerin altında kalmaktadır. Uyluk kemiği yaralanma riski eşitliğine göre (AIS≥2) sağ ve sol uyluk kemikleri yaralanması riskleri sırasıyla %0,69 ve %0,99’dur.

### 4.3. Sonuçların Doğrulaması (Verification of the Results)

Bu bölümde, sonuçları elde edilen 6 farklı durumun doğrulaması yapılacaktır. Doğrulama, kinetik ve toplam enerji dengesi üzerinden yapılacaktır. Analizlerde yapılan çözümün doğruluğunun kontrolünün sağlanması için toplam enerji verisi kullanılabilir. Toplam enerji dengesi eşitliği, icra edilen simülasyonun hassasiyetinin tespit edilmesinde kullanılır:

$$\underbrace{E_{kin} + E_{int} + E_{si} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg}}_{E_{total}} = E_{kin}^0 + E_{int}^0 + W_{ext} \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan;

$E_{kin}$ , kinetik enerjiyi (kinetic energy)

$E_{int}$ , iç enerjiyi (internal energy)

$E_{si}$ , kayan ara yüzey enerjisini (sliding interface energy)

$E_{rw}$ , sert duvar enerjisini (rigid wall energy)

$E_{damp}$ , sönümlenme enerjisini (damping energy)



$E_{hg}$ , kum saati enerjisini (hourglass energy)

$E_{kin}^0$ , ilk kinetik enerjisi (initial kinetic energy)

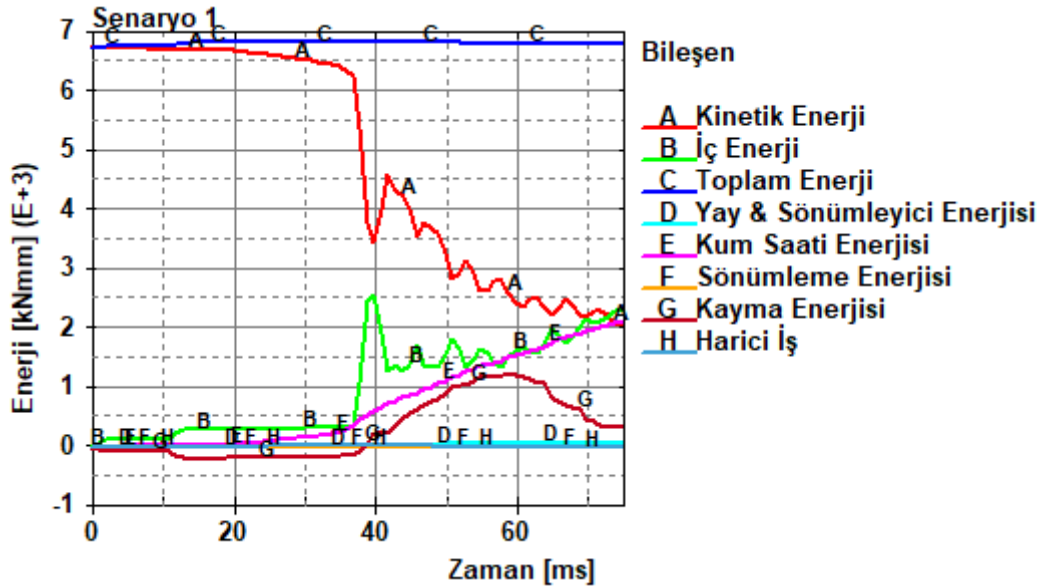
$E_{int}^0$ , ilk iç enerjisi (initial internal energy)

$W_{ext}$ , harici işi (external work)

$E_{total}$  ise toplam enerjisi (total energy) ifade etmektedir.

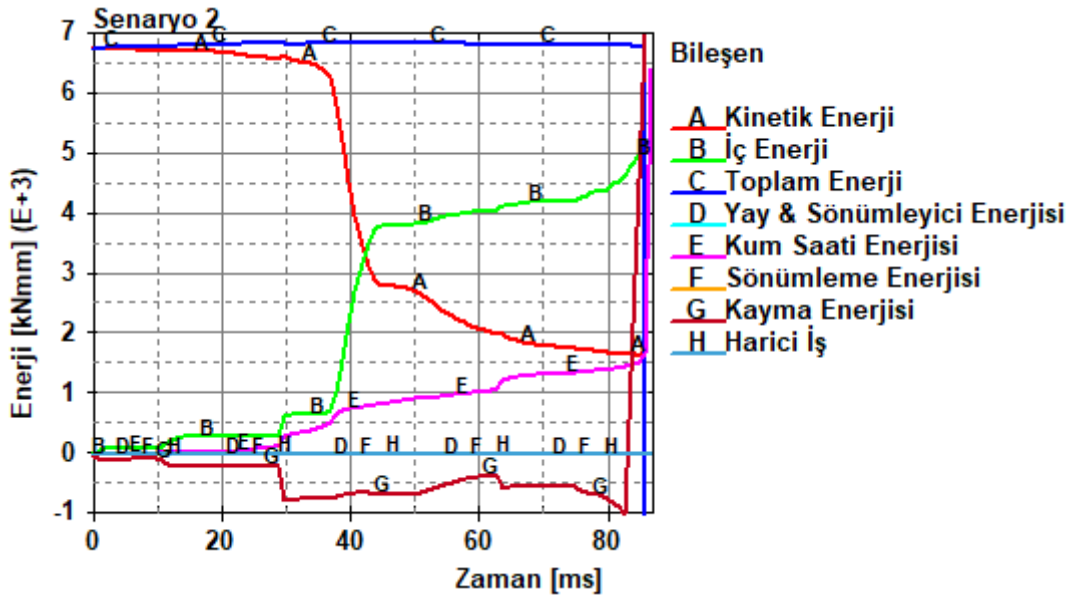
Yukarıdaki eşitlik, sisteme giren işin, yapılan işe eşit olduğunu göstermektedir. Denklemden oluşabilecek herhangi bir eşitsizlik analizin hatalı olduğunu gösterecektir. Analizi yapılan 6 farklı durum için enerji grafikleri elde edilerek toplam enerji kontrolü yapılacaktır. Analiz başlangıcı ve sonundaki toplam enerji değerleri ile yüzdelik enerji değişimleri elde edilecektir.

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 17’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde  $t = 0$  ms ile  $t = 75$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,79 olarak hesaplanmıştır.



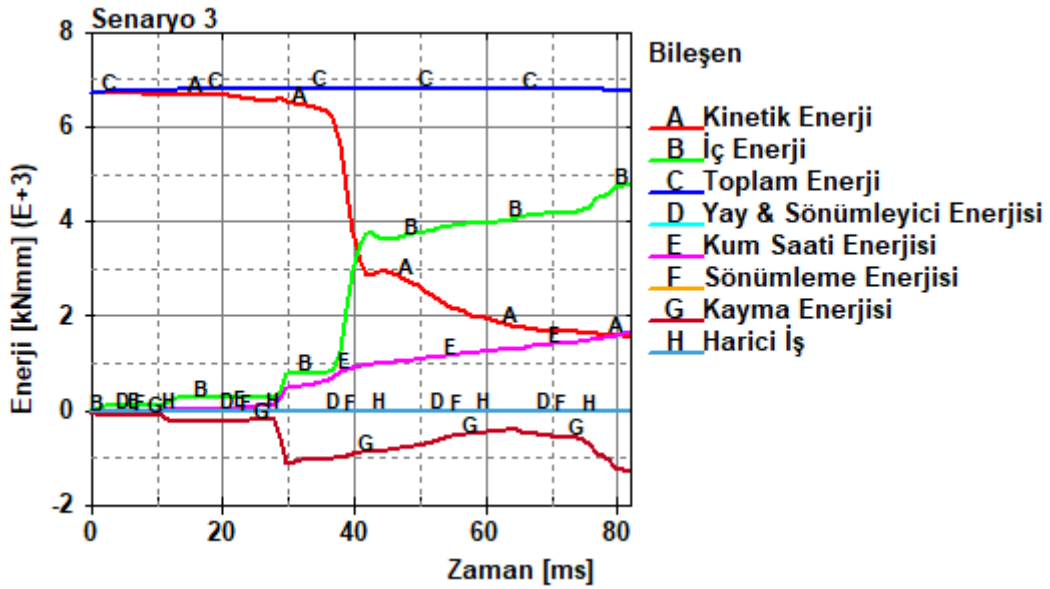
Şekil 17. Durum 1 için enerji dengesi

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 18’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Durum 2’nin çözüm sonunda kukla modelin sağ ayak kısmı destek sacı parçasına çarpmaktadır. Çarpmanın etkisi ile kukla modelin sağ ayak kısmı elemanları negatif hacimden dolayı aşınmaya (erode) başlamıştır. Aşınmanın başladığı andan itibaren enerji değerleri pik değere ulaşmış ve kararsız olmaya başlamıştır. Bu yüzden aşınma başlamadan önceki toplam enerji dikkate alınarak doğrulama yapılmıştır. Bu itibarla  $t = 0$  ms ile  $t = 86$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,56 olarak hesaplanmıştır.



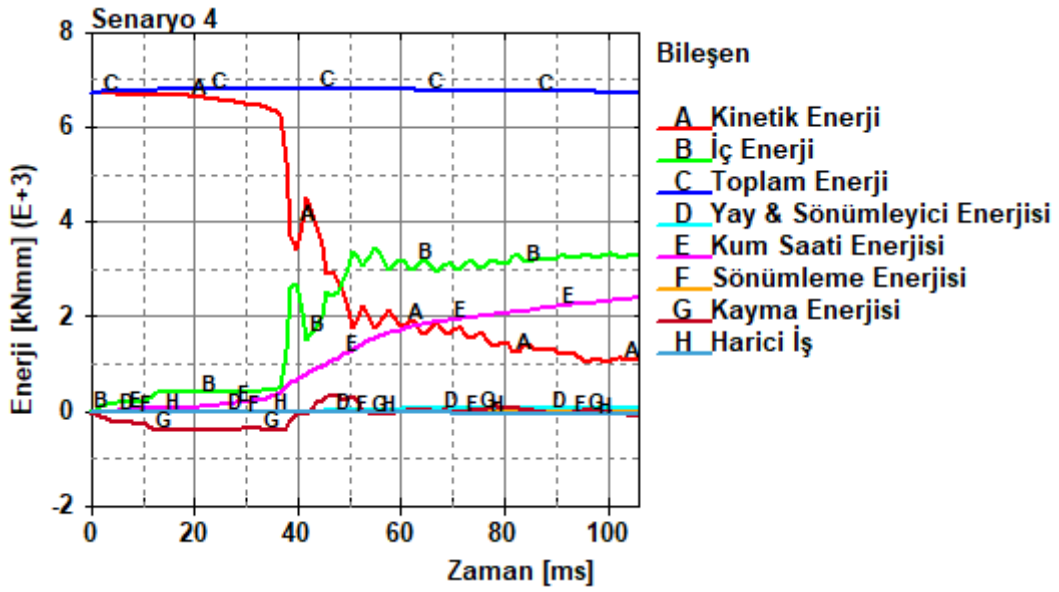
Şekil 18. Durum 2 için enerji dengesi

Emniyet kemersiz ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 19'da gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde  $t = 0$  ms ile  $t = 82$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,92 olarak hesaplanmıştır.



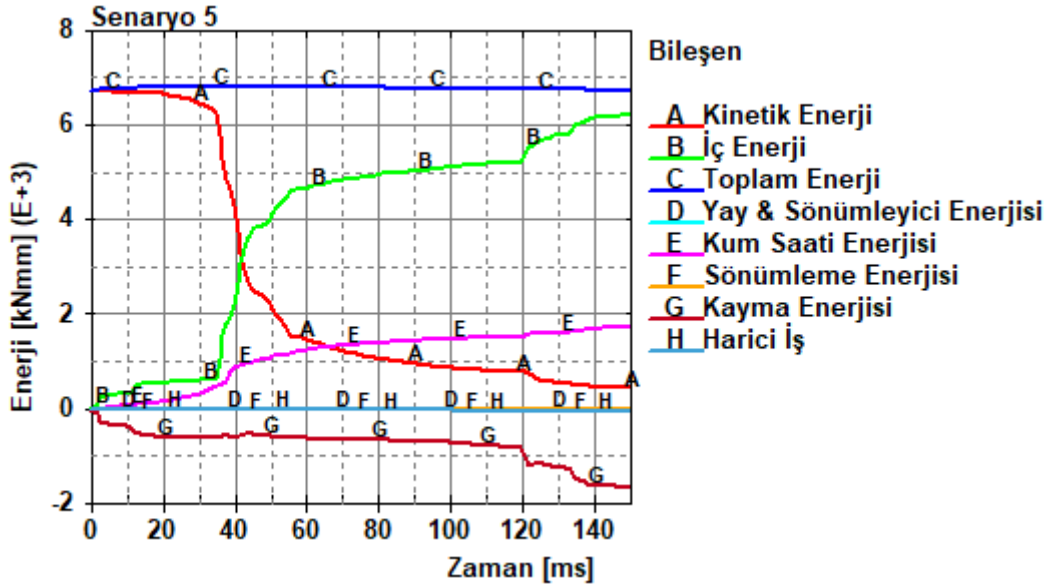
Şekil 19. Durum 3 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına elastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 20'de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde  $t = 0$  ms ile  $t = 106$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,28 olarak hesaplanmıştır.



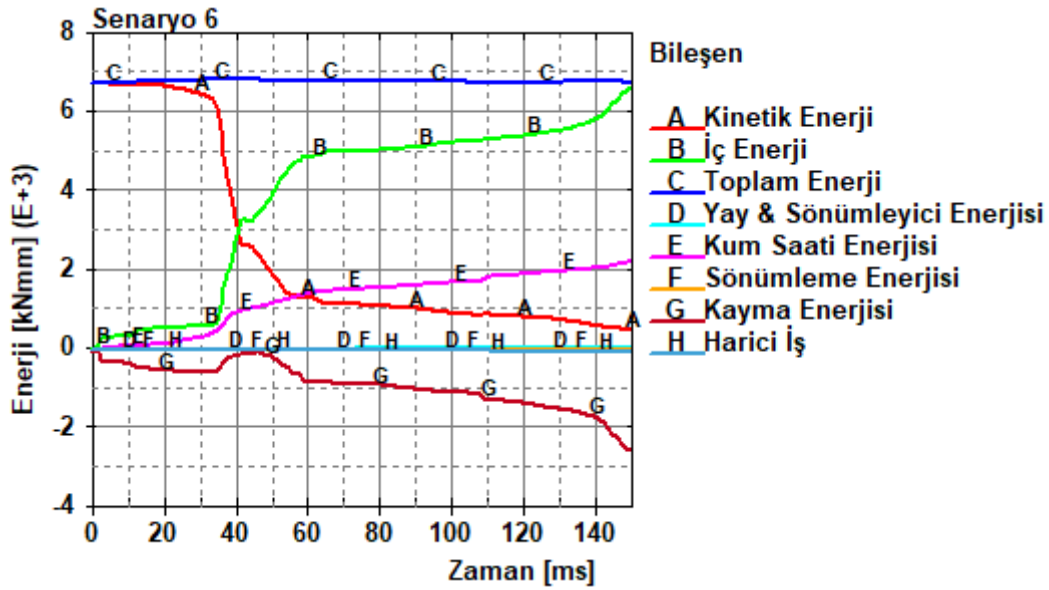
Şekil 20. Durum 4 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 21’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde  $t = 0$  ms ile  $t = 150$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 21. Durum 5 için enerji dengesi

Emniyet kemerli ve şasi, amortisör, destek sacı parçalarına mukavim plastiki özellikler sergileyen malzeme parametresi atanan model için elde edilen ve Şekil 22’de gösterilen enerji-zaman grafiği yardımıyla toplam enerji kontrolü yapılmıştır. Analizde  $t = 0$  ms ile  $t = 150$  ms anına kadar geçen sürede toplam enerji değişikliği %0,35 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Durum 6 için enerji dengesi

Tüm analiz durumlarında aracın ilk hızı 7,1 m/s (7,1 mm/ms) idi. Bununla birlikte araç ana bileşenleri üzerinde araç kütlelerini arttıracak bir değişken kullanılmamıştır. Şasi, amortisör ve destek sacı parçalarının yalnızca mukavemetleri ile ilgili parametreleri değiştirilmiştir. Emniyet kemeri tanımlanan analizlerde, emniyet kemeri kayda değer bir kütle artışına sebebiyet vermeyecektir.

Emniyet kemersiz modellerin analizlerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde başlangıç kinetik enerjilerinin  $6,76425 \times 10^3$  kNmm olduğu görülmektedir.

Emniyet kemerli modellerin analizlerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde ise başlangıç kinetik enerjilerinin  $6,76442 \times 10^3$  kNmm olduğu görülmektedir.

Buna göre emniyet kemerinin oluşturduğu başlangıç kinetik enerji değerinin  $1,69922 \times 10^{-1}$  kNmm olduğu anlaşılabilmektedir.

Emniyet kemerli ve kemersiz analiz modellerinin başlangıç kinetik enerji değerlerinin birbirine eşit olması analizlerin doğru kurgulandığının bir göstergesidir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu bölümde, 6 farklı durum için yapılan çarpışma analizlerinin sonuçlarının, bir birbirleri ile karşılaştırılmasının yapılması sureti ile çeşitli değerlendirmelerde bulunulacaktır. Sonuçların daha rahat değerlendirilebilmesi amacı ile aşağıda yer alan Tablo 14 oluşturulmuştur.

Tablo 14. Tüm durumlar için parametreler

| Sıra | Durum                                    | Analiz Süresi (ms) | HIC   | 3 ms Aralıkta Maksimum Göğüs İvmesi (g) | Göğüs Sapması (mm) | Sağ/Sol Uyluk Kemikleri Maksimum Kuvveti (kN) |
|------|--|--------------------|-------|---|--------------------|---|
| 1    | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği elastik | 75,7487            | 209,1 | 21,22                                   | 4,94               | -5,48/-4,02                                   |

|   |   |         |       |       |       |             |
|---|---|---------|-------|-------|-------|-------------|
| 2 | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği plastik            | 87,1227 | 169,9 | 6,78  | 2,56  | -2,47/-1,56 |
| 3 | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği mukavim<br>plastik | 82,6828 | 168,7 | 8,60  | 2,91  | -3,06/-2,55 |
| 4 | Emniyet kemerli,<br>Yapı çeliği elastik             | 106,33  | 220,8 | 42,11 | 27,06 | 3,75/3,28   |
| 5 | Emniyet kemerli,<br>Yapı çeliği plastik             | 150     | 1355  | 21    | 10,19 | -1,77/1,93  |
| 6 | Emniyet kemerli,<br>Yapı çeliği mukavim<br>plastik  | 150     | 382,6 | 25,33 | 15,49 | 1,6/2,29    |

Analizi yapılan 6 durum için ilk dikkat çeken husus emniyet kemeridir. Emniyet kemeri olmayan modellerde, kukla modelin ayakları direk olarak destek sacına çarparak çok büyük kuvvet ve momentlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durumda ayaklar çok ciddi hasar almış, ayak bilekleri ters dönmüş ve çözüme devam edilememiştir. Kukla modellerin eylemsizliğini koruduğu emniyet kemersiz modellerde, baş ve göğüs zorlanma parametrelerinin emniyet kemerli modellere nazaran daha küçük kaldığı görülmektedir. Uyluk kemiği kuvvetleri ise emniyet kemerinin olmamasından dolayı aynı malzeme parametresine sahip modeline göre daha büyük çıkmıştır.

Çözümün devam ettiği varsayıldığında emniyet kemersiz modellerde, manken modelin araçtan dışarı fırlayarak ciddi yaralanma riskine maruz kalacağı tahmin edilebilmektedir. Tüm durumlar için inceleme yapıldığında ise 5 numaralı durum için yüksek oranda kafa travması ihtimali bulunduğu görülmektedir. Emniyet kemeri incelemesinin ardından aracın yapı çeliği parçalarının malzeme özelliği ve dayanımı hakkında değerlendirme yapılabilir. Analiz süresinin, tüm durumlar için aynı olmamasından dolayı 75 ms anındaki parametrelerin referans alınması sureti ile değerlendirme yapılması daha uygun olacaktır. Tablo 15'te 75 ms anında tüm durumlar için baş, göğüs ve uyluk kemikleri değerlere yer almaktadır.

**Tablo 15.** Tüm durumlar için parametreler (75 ms)

| Sıra | Durum   | Bileşke Baş<br>İvmesi<br>(g) | Bileşke Göğüs<br>İvmesi<br>(g) | Göğüs<br>Sapması (mm) | Sağ/Sol Uyluk<br>Kemikleri<br>Maksimum<br>Kuvveti<br>(kN) |
|------|---|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| 1    | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği elastik            | 37,7                         | 31,9                           | 1,23                  | -5,48/-3,94   |
| 2    | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği plastik            | 15,2                         | 7,1                            | 1,98                  | -2,47/-1,56   |
| 3    | Emniyet kemersiz,<br>Yapı çeliği mukavim<br>plastik | 13,4                         | 10,3                           | 0,87                  | -3,06/-2,55   |
| 4    | Emniyet kemerli,<br>Yapı çeliği elastik             | 44,3                         | 47,6                           | -6,07                 | 3,75/3,28   |
| 5    | Emniyet kemerli,                                    | 30,9                         | 28,2                           | -7,23                 | -1,77/1,93  |

|   |  |      |      |      |          |
|---|--|------|------|------|----------|
|   | Yapı çeliği plastik                                |      |      |      |          |
| 6 | Emniyet kemerli,<br>Yapı çeliği mukavim<br>plastik | 31,4 | 29,5 | 1,27 | 1,6/2,29 |

Sunulan veriler ışığında, ilk dikkat çeken durum emniyet kemersiz modellerde baş ve göğüs yaralanma parametrelerinin, emniyet kemerli modellere nazaran daha düşük çıkmasıdır.

Başlangıçta emniyet kemersiz modellerin daha güvenli olduğu algısı veren bu duruma aslında emniyet kemerinin hayat kurtarıcı özelliği neden olmaktadır. Emniyet kemerli modellerdeki kukla model zorlanmaları, emniyet kemerinin kukla modelin eylemsizliğini yenmesi neticesinde fazla çıkmıştır. Emniyet kemersiz modellerde ise kukla model eylemsizliğini koruyarak aracın ön tarafına doğru hareketini sürdürmüştür. Bu yüzden baş ve göğüs zorlanma parametreleri emniyet kemerli modellerdekine göre düşük çıkmıştır.

Emniyet kemeri durumuna göre uyluk kemiği zorlanmaları incelendiğinde ise emniyet kemersiz modellerdeki uyluk kemiği zorlanmalarının, emniyet kemerli eş modellere göre biraz daha büyük çıktığı görülmektedir. Bu duruma ayak kısmının araç destek sacına çarpması neden olmuştur. Tüm durumlar incelendiğinde yapı çeliği elastiki özelliğe sahip modellerdeki baş, göğüs ve uyluk kemikleri zorlanmaları, plastiki parametrelere sahip modellere göre daha büyük çıkmıştır. Bu duruma elastiki parametrelere sahip çeliğin üzerindeki enerjiyi atamaması sonucu manken modele olumsuz etki oluşturmasının neden olduğu tahmin edilmektedir.

Elastik parametrenin bir olumsuzluğu da emniyet kemerli modeller incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Emniyet kemerli ve araç yapı çeliği malzemelerine elastiki parametreler atanan modelin çözümü, 106,33 ms anında sonlanmıştır. Halbuki plastiki ve mukavim plastiki parametrelere sahip modellerde çözüm sorunsuz olarak tamamlanmıştır. Üzerindeki enerjiyi plastik deformasyon ile üzerinden atamayan şasinin ön koruyucu çubuk kısmı, kukla modelin sol ayak uzvu ile temas ederek çözümü kararsızlaştırmıştır. Aracın, plastik deformasyona sahip olan modelleri kıyaslandığında ise mukavim plastiki parametrelere sahip modellerde, plastiki parametrelere sahip modellere nazaran baş zorlanmaların biraz daha düşük ve yakın değerde olduğu, bileşke göğüs ivmelerinin biraz yüksek olduğu, göğüs sapmalarının ise düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte uyluk kemikleri aksel zorlanmaları incelendiğinde emniyet kemersiz modeller için mukavim plastiki parametrelere sahip modeldeki zorlanma, plastiki parametrelere sahip modeldekine göre fazladır. Emniyet kemerli model incelendiğinde ise sağ ve sol uyluk kemikleri zorlanmaları, plastiki veya mukavim plastiki parametrelere sahip modeller için değişiklik göstermektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Ambati, K.V.N.S. Srikanth, P. Veeraraju, Simulation of Vehicular Frontal Crash-Test, Int. J. Appl. Res. Mech. Eng. (2012) 2231–5950. doi:10.13140/RG.2.2.11183.38560.
- [2] L. Berzi, N. Baldanzini, D. Barbani, M. Delogu, R. Sala, M. Pierini, Simulation of Crash Events for an Electric Four Wheel Vehicle, Procedia Struct. Integr. 12 (2018) 249–264. doi:10.1016/j.prostr.2018.11.090.
- [3] G. Zhao, L. Xie, Y. Guo, J. Li, Analysis and Evaluation on the Rear-End Crash of the Car with a Dummy, in: 2009 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom., IEEE, 2009: pp. 475–478. doi:10.1109/ICMTMA.2009.385.
- [4] AAAM, The Abbreviated Injury Scale (AIS), <https://www.aaam.org/abbreviated-injury-scale-ais/> (Erişim tarihi: 19 Mayıs 2019).
- [5] EEVC Working Group 14 Report, Development of Test Procedure for Energy-absorbing Front Underrun Protection Systems for Trucks, 1996.

- [6] B. McHenry, Head Injury Criterion and the ATB, ATB Users' Gr. (2004) 1–8.
- [7] C.W. Gadd, Criteria for Injury Potential, in: Impact Accel. Stress Symp., National Academy of Science, Washington DC, 1962: pp. 141–144.
- [8] J. Versace, A Review of the Severity Index, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1971. doi:10.4271/710881.
- [9] R. Eppinger, E. Sun, F. Bandak, M. Haffner, N. Khaewpong, M. Maltese, S. Kuppa, T. Nguyen, E. Takhounts, R. Tannous, A. Zhang, R. Saul, Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems–II, Natl. Highw. Traffic Saf. Adm. (1999). doi:10.1080/08993408.2013.838066.
- [10] P. Prasad, H.J. Mertz, The Position of the United States Delegation to the ISO Working Group 6 on the Use of HIC in the Automotive Environment, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1985. doi:10.4271/851246.
- [11] V.R. Hodgson, L.M. Thomas, Breaking Strength of the Human Skull Versus Impact Surface Curvature, Wayne State Univ. (1977).
- [12] V.R. Hodgson, L.M. Thomas, J. Brinn, Concussion Levels Determined by HPR Windshield Impacts, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1973. doi:10.4271/730970.
- [13] C. Got, A. Patel, A. Fayon, C. Terrière, G. Walfisch, Results of Experimental Head Impacts on Cadavers: The Various Data Obtained and Their Relations to Some Measured Physical Parameters, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1978. doi:10.4271/780887.
- [14] C. Terriere, G. Walfisch, A. Fayon, C. Got, F. Guillon, A. Patel, J. Bureau, Acceleration, Jerk and Neck Flexion Angle: Their Respective Influences on the Occurrence of Brain Injury, ISO, TC 22, SC 12, GT-6 (USA-13), Doc. No. 118. (1982).
- [15] E. Hertz, A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture, Assoc. Adv. Automot. Med. (1993).
- [16] V.K. Lau, D.C. Viano, Influence of impact velocity and chest compression on experimental pulmonary injury severity in rabbits, J. Trauma - Inj. Infect. Crit. Care. (1981). doi:10.1097/00005373-198112000-00003.
- [17] J.D. Horsch, J.W. Melvin, D.C. Viano, H.J. Mertz, Thoracic Injury Assessment of Belt Restraint Systems Based on Hybrid III Chest Compression, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1991. doi:10.4271/912895.
- [18] J.Y. Foret-Bruno, F. Hartemann, C. Thomas, A. Fayon, C. Terrière, C. Got, A. Patel, Correlation Between Thoracic Lesions and Force Values Measured at the Shoulder of 92 Belted Occupants Involved in Real Accidents, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1978. doi:10.4271/780892.
- [19] N. Yoganandan, D. Skrade, F.A. Pintar, J. Reinartz, A. Sances, Thoracic Deformation Contours in a Frontal Impact, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1991. doi:10.4271/912891.
- [20] H.J. Mertz, A.L. Irwin, J.W. Melvin, R.L. Stanaker, M.S. Beebe, Size, Weight and Biomechanical Impact Response Requirements for Adult Size Small Female and Large Male Dummies, in: SAE Tech. Pap., SAE International, 1989. doi:10.4271/890756.
- [21] S. Solmaz, S. Üzümlü, Gtech-Revolution Yarış Takımı Tübitak Alternatif Enerjili Araç Yarışları Teknik Tasarım Raporu.

## Classification of News according to Age Groups Using NLP

 Rabia KONTUK<sup>ID</sup> Metin TURAN\*<sup>ID</sup>

Istanbul Commerce University, Department of Computer Engineering, Maltepe/İSTANBUL

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the classification of news texts according to the relevant age groups was achieved by natural language processing method. A dictionary is constructed in order to use for classification. During the creation of the dictionary, tokenization, morphology, and remove stop word operations is applied to the news, respectively.

#### Article Info:

Research article

Received: 07/02/2020

Revision 17/04/2020

Accepted: 29/04/2020

#### Highlights

- Tokenization
- Morphology
- Remove Stop Words

#### Keywords

News Age Group

Detection

Age Group Dictionary

Zemberek

Natural Language

Processing

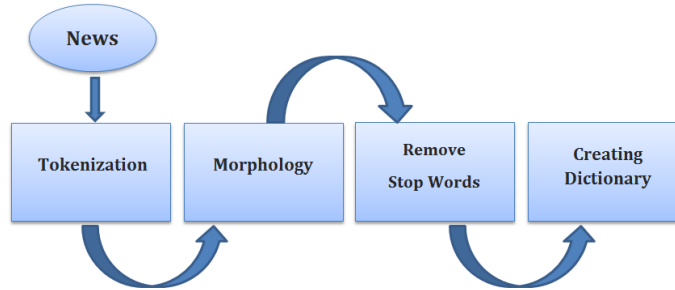


Figure A. Dictionary stages

**Purpose:** The purpose of this study is to help news sites' make a classification to prevent both neglecting the ethical elements of the news (sexuality, swearing, rape etc.) and being accessible by every age group. Especially in order to prevent the children from being harmed by the content published in moral and psychological terms, and not to be encouraging, the news appropriate for age groups should be readable.

**Theory and Methods:** Zemberek Library was used for Natural Language operations of Turkish news texts. Childhood, Youth and Adult age groups were determined by using Havighurst's Development Theory. A data set has been created using real Turkish web sites' news about the age groups. Data set divided into training and test parts. The training news was used to create a dictionary. Test news was tested applying the proposed model on the created dictionary.

**Results:** The developed dictionary (excluding verb) was applied to the test news and the highest success was determined in the Adult age group. The overall success of the dictionary was found to be 70% correct.

**Conclusion:** In this study, a dictionary is proposed to determine the age groups of the news. While creating the dictionary, Natural Language processing operations were carried out using the Zemberek Library on the data set containing the news. Then, the frequency of the term was calculated for each word in the news (except verb) and the words that were found meaningful in the relevant age groups; age group information is included in the dictionary with the number of times seen in the news. The dictionary developed was tested and 70 percent accuracy was achieved.





## NLP Kullanılarak Haberlerin Yaş Gruplarına Göre Sınıflandırılması

Rabia KONTUK<sup>ID</sup> Metin TURAN<sup>ID</sup>

*İstanbul Ticaret Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Maltepe/İSTANBUL*

### Öz

Bu çalışmada, Doğal Dil İşleme kullanılarak elektronik ortamlardaki haberlerin yaş gruplarına göre etiketlenmesi amaçlanmıştır. Haber sitelerinden toplanan haber veri setinin eğitim amaçlı seçilmiş olanları, NLP Zemberek Kütüphanesi kullanılarak Python dili ile işlenmiş, Havighurst'un "Gelişim Kuramı"nın güncel duruma adapte edilmiş Çocukluk, Ergenlik ve Yetişkinlik yaş gruplarını temsil edebilecek kelime sözlüğü oluşturulmuştur (her kelimenin hangi yaş grubuna uygun olduğu). Daha sonra, bu sözlük kullanılarak haber veri setinin test amaçlı seçilmiş olanlarının sınıflarını belirlemek üzere bir sınıflandırıcı önerilmiştir. Testler sonucunda, geliştirilen sözlüğün 0.70 oranında doğru sınıfı tespit edebildiği görülmüştür.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 07/02/2020  
 Düzeltme: 17/04/2020  
 Kabul: 29/04/2020

### Anahtar Kelimeler

*Haber Yaş Grubu Tespiti*  
 Yaş Grubu Sözlüğü  
 Zemberek  
 Doğal Dil İşleme

### Keywords

*News Age Group*  
 Detection  
 Age Group Dictionary  
 Zemberek  
 Natural Language  
 Processing

## Classification of News according to Age Groups Using NLP

### Abstract

In this study, it is aimed to label the news in electronic media according to age groups by using Natural Language Processing. The selected ones for training in the news dataset collected from the news sites were processed in Python language using the NLP Zemberek Library, and a vocabulary dictionary that could represent Childhood, Adolescence and Adult age groups of Havighurst's Development Theory adapted to the current situation was created (which age group of each word as appropriate). A classifier was then proposed to determine the classes of the news dataset selected for testing using this dictionary. As a result of the tests, it was seen that the developed dictionary can detect the correct class with a success rate of 0.70.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayatın her alanında hızla gelişen teknoloji ve beraberinde getirdiği internet ağı çok kısa sürede her türlü bilgiye ulaşmaya olanak sağlamaktadır. Bilginin yaygın fakat kirli bir hal alması karşısında, bilginin erişilmesinden çok doğru bilgiye ulaşma ihtiyacı önem kazanmıştır. Bilgi kirliliğinin ve sınırsız paylaşımların sanal dünyada gezinen kitlelere (özellikle de yetişkin olmayanlar için) bir tık uzaklıkta olması aslında bir sınırlandırılmanın gerekli olduğunu göstermektedir.

Her ne kadar insanlar kendilerini ve yakınlarını korumak üzere internet için servis sağlayıcılar tarafından veya doğrudan kullanıcı tarafından uygulanan kişisel filtreler olsa da, bunlar açıkça genellikle cinsel içerikli kaynaklar üzerinde yoğunlaşmıştır. Fakat internetin yaygın kullanımı beraberinde insanlara yeni alışkanlıklar da kazandırmıştır. Buna en güzel örnek, basılı gazetelerin artık yerini elektronik haber sitelerine bırakmış olmasıdır. Açıkçası bu durum ise, günlük yaşam içinde yer alan ve hiç de ahlaki olmayan veya şiddet içeren haberleri de kontrol altına alabilmenin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

İnternetin haber üretimi ve sunumunu kolaylaştırıcı olanakları sayesinde, basılı gazetelere kıyasla çok daha fazla habere yer verilebilmektedir. Bununla birlikte, gerek habercilerin daha fazla ve anlık haber sunma kaygısı, gerekse yeterli mesleki bilgiye sahip olmamaları ve daha da önemlisi tıklanma sayısını

(popülerlik) artırma kaygısı haberin niteliksel ve etik unsurlarının ihmal edilmesine sebep olabilmektedir. Bu hatalar, söz konusu kullanıcının çocuk olduğu düşünüldüğünde çok daha önemli bir hal almaktadır [5].

Bu husus göz önüne alınarak, bu çalışmada doğal dil işleme ile elektronik haberlerin uygun yaş gruplarına göre sınıflandırılması istenmektedir. Yaş grupları belirlenirken Havighurst'ün "Gelişim Kuramı" temel alınmıştır (Tablo 1). Bu kuramda 6 kategoriye ayrılan yaş grupları, internet kullanım yaşı öngörüsüne göre (ilkokul çağı başlangıcı) yeniden düzenlenerek 3 kategoriye –çocukluk (6-13 yaş), ergenlik (13-18) ve yetişkinlik (18+) olmak üzere– indirgenmiştir.

**Tablo 1.** Havighurst Gelişim Kuramı [4]

| Yaklaşık Yaş                            | Karakteristik Görevler  |
|---|---|
| <b>Erken Çocukluk (Doğum - 6 yaş)</b>   | Yürümeyi, katı yiyecek yemeyi, konuşmayı, tuvalet kullanmayı öğrenir; cinsiyet farklarının toplumsal doğrularını öğrenir. Bu evrenin sonuna doğru, daha kavramsal görevler beklenir, doğruyu yanlıştan ayırabilir, vicdan geliştirmeye başlar, okumayı öğrenmeye hazırlanır; işaretlerin (örneğin gülümseme) kelimelerin yerine geçebildiğini öğrenir.  |
| <b>Orta çocukluk (6-12/13 yaşlar)</b>   | Oyun oynamada gerekli fiziksel becerileri öğrenir, akranlarla birlikte olmayı öğrenir; uygun kadınsı ya da erkeksi toplumsal rolü öğrenir, okuma, yazma ve hesaplama temel becerileri geliştirir; vicdan, ahlak ve değerler geliştirmeye devam eder, özerklik geliştirmeye başlar, temelde demokratik olan toplumsal tutumlar geliştirir.   |
| <b>Ergenlik (13-18 yaşlar)</b>          | Duygusal ve fiziksel olarak olgunlaşır. Her iki cinsten akranlarla olgun ilişkiler kurar, toplumsal olarak kabul edilen erkeksi ya da kadınsı toplumsal rolü öğrenir. Fizikselini kabul eder ve bedenini etkili biçimde kullanır, ana babadan ve diğer yetişkinlerden duygusal bağımsızlık kazanır, evlilik ve aile yaşamı için hazırlanır, bir mesleğe hazırlanır ve davranışlarını belirleyecek bir dizi değer ve ilke kazanır. |
| <b>Erken Yetişkinlik (18-35 yaşlar)</b> | Eş seçer, yakın bir ortakla yaşamayı öğrenir, yuva kurar, mesleğine başlar, vatandaşlık sorumluluklarını kabul eder, toplumsal ilişkiler kurar.   |
| <b>Orta Yaş (35-60 yaşlar)</b>          | Ergenlerin sorumlu kişiler olmasına yardım eder; toplumsal ve vatandaşlık sorumluluğu kazanır, mesleki doyum elde eder, orta yaşın fiziksel değişikliklerine uyum sağlar, yaşlanan ana babaya uyum sağlar.  |
| <b>İleri Olgunluk (60 yaşın ötesi)</b>  | Azalan fiziksel güce, eşin ölümüne, azalan ya da sabit kalan gelire uyum sağlar, akranlarıyla yakınlık kurar.   |

Doğal Dil İşleme alanında, sözlük oluşturma işlemleri üzerine günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar birçok dil için uygulansa da çoğunlukla İngilizce dili üzerine yapılmıştır. Literatürdeki sözlük çalışmalarını, Türkçe ve diğer diller olmak üzere iki grupta incelemek faydalı olacaktır.

Diğer diller için ilk çalışmalardan biri olan ve 1999 yılında ABD İngilizcesi için Silverman K., Anderson V., Bellegarda J., Lenzo K. ve Naik D. tarafından geliştirilen "Victoria" adlı sözlüğün tasarımı ve koleksiyonu tanıtılmıştır. Bu sözlük, Apple Computer'da konuşma sentezi araştırma ve geliştirmesini desteklemek amacı ile oluşturulmuştur. Çalışmada üretilen sonuçlarda ise, böyle bir sözlüğün oluşturulmasında gerçek dünya koşullarının çoğunu karakterize eden çarpıklıklar ve gürültü gibi etkenlerden dolayı daha düşük sentez kalitesine neden olacağı ve böyle bir konuşma sentezi sözlüğünün bir araya getirilmesinin çok büyük zorluklar yaratacağı kaydedilmiştir [7].

1999 yılındaki diğer bir önemli çalışma ise Riloff E. tarafından İngilizce dili için yapılan “AutoSlog” adlı sözlüktür. AutoSlog sözlüğünde amaçlanan, ilgili MUC-4 terörizm metinlerini ve bunlara ilişkin cevap anahtarları kullanılarak bilgi çıkarımı yapmaktır. Bu sözlük ile %98 oranında çok iyi bir sonuç elde edilmiştir [8].

2004 yılında Tsalidis Ch., Vagelatos A. ve Orphanos G. tarafından modern Yunanca dili için bir sözlük oluşturulmuştur. Çalışmanın yapılma amacı, modern Yunanca'nın morfolojik ve söz dizimsel seviyelerde işlenmesi için elektronik formda bir sözlüğünün olma zorunluluğudur. Çünkü modern Yunanca çok yönlü bir dil ve eski Yunanca'dan taşınan birçok karakteristik özelliği bulunan bir yazım sistemidir. Bu çalışma ile modern Yunanca'yı karakterize eden ve her türlü elektronik formdaki Doğal Dil İşlemede geçerli kılan özellikleri vurgulanmıştır [10].

2011 yılındaki bir diğer çalışmada, Këpuska V. Z. ve Rojanasthien P. İngilizce dili için konuşma grubu oluşturmuşlardır. Bu çalışmada, film ve dizilerin DVD'lerinden konuşma grubu oluşturmak için bir veri toplama sistemi sunulmuştur (konuşma tanıma, vurgu, perde, tonlama, duraksama analizi için). Çalışmanın avantajı olarak DVD'lerden sözlük üretiminin, geleneksel bir konuşma grubu elde etme yöntemine kıyasla önemli ölçüde düşük maliyetli olması verilmiştir. Buna ek olarak, verilerin toplanmasının ve sözlüğe dönüştürülmesinin de daha kısa süre alacağı kaydedilmiştir. Çalışmanın sonucunda sözlüğün konuşma grubu oluşturmak için yararlı ve çok yönlü olduğu gösterilmiştir [9].

Türkçe, her ne kadar geniş bir coğrafyada 60 milyon kişi tarafından anadili olarak konuşulan bir dil olsa da Türkçe üzerindeki Doğal Dil İşleme çalışmaları ancak son 15-20 yıl içinde hız kazanmıştır [6].

Bu çalışmaların günümüzde en başarılı örneklerinden biri, çoğu Türkçe NLP çalışmalarında kullanılan, Aktaş Y., Yılmaz İnce E. ve Çakır A.'nın çalışmalarında da yardımcı kütüphane olarak kullanılan 2007 yılında Akın A. A. ve Akın M. D. tarafından hazırlanan ve bu projede de faydalanılan “Zemberek” adlı kütüphanedir [1]. Bu çalışmaya makalenin ileriki bölümlerinde detaylandırılarak yer verilecektir.

2014 yılında Eryiğit G. tarafından geliştirilen İTÜ Türkçe Doğal Dil İşleme Yazılım Zinciri [21], Zemberek'in aksine açık kaynak kodlu olmayan NLP yazılımıdır. Bu yazılım Türkçe karakter dönüştürücü (asciifier/deasciifier), sözcük ayrıştırıcı/cümle bölücü (tokenizer/sentence splitter), yazım denetleyici (spell checker), biçim bilimsel çözümleyici/belirsizlik giderici (morphological analyzer/disambiguator), varlık ismi tanıma (named entity recognizer) ve bağımlılık çözümlemesi (dependency parser) gibi araçlardan oluşan bir platformdur. Bu platform, hem bir web ara yüzüne hem de bir uygulama programlama ara yüzüne (API) sahiptir. Böylece farklı seviyelerdeki kullanıcılar bu platformdan faydalanabilmektedir [20].

Türkçe ile ilgili çalışmanın en başarılı örneklerinden biri, 1985 yılında Princeton Üniversitesi Bilişsel Bilimler Laboratuvarı'nda Miller tarafından başlatılmış olan ve günümüzde en yaygın olarak kullanılan “WordNet” sözlüğüne [19], 2017 yılında Aktaş Y., Yılmaz İnce E. ve Çakır A., tarafından Türkçe dili için sağlanan bilişim sözlüğüdür. Çalışmada bilgisayar ağ terimlerinin ontolojik tabanlı oluşturulması işleminin otomatikleştirmesi, Türkçe dilinde kelimeler arası eş anlam yakın anlam gibi anlamsal bağlantılara sahip sözlüklerin uygun bir şekilde bir araya getirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sözlükte 140.009 adet kelime bulunmaktadır. Çalışılan alanın sadece bilgisayar ağ terimleri ile sınırlandırılması çalışmanın başarısını oldukça arttırmıştır. Ontolojik bilgisayar ağları sözlüğüne veri girişi yapılan kelime sayısı arttıkça başarı artmış, anlaşılabilirlik azalmıştır [11].

Bu araştırmanın motivasyonunu, haber sitelerinin anlık haber yayınlama kaygısı ile haberlerin niteliksel ve etik unsurlarını (cinsellik, küfür, argo, tecavüz, silah, şiddet) ihmal etmesi ve yayınlanan haberlerin bazı yaş grupları tarafından okunmasının sakıncası oluşturmuştur. Bu sebeple özellikle çocukların, gerek ahlaki ve gerekse psikolojik anlamda yayınlanan içeriklerden zarar görmemesi, örnek teşkil edip özendirilmemesi adına, yaş gruplarına uygun haberlerin okunabilir olması gereklidir. Bu alanda bildiğimiz kadarı ile dünyada uygulanan ilk çalışma olarak da önemlidir. Bu amaçla çalışmada mevcut probleme çözüm olmak üzere, haberlerin ilgili yaş gruplarına uygun olarak sınıflandırılmasına yönelik Türkçe haberler için bir model önerilmiş ve uygulanmıştır.

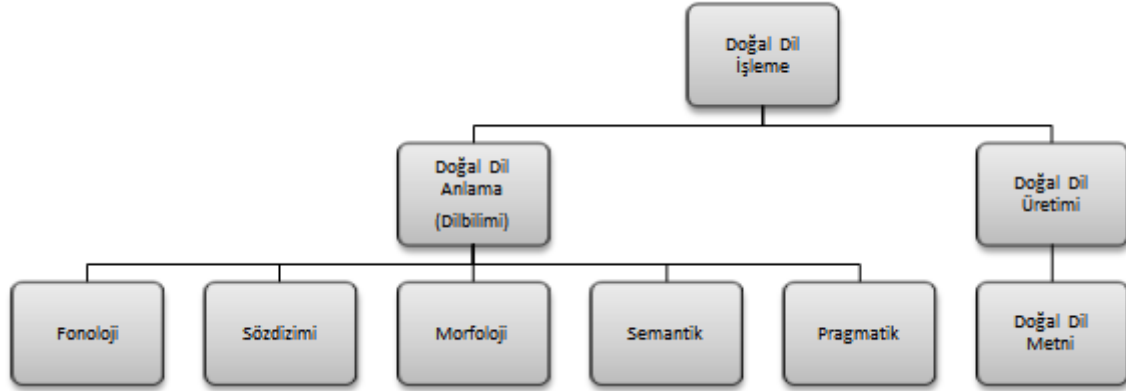
Bu çalışmanın ikinci bölümünde çalışmada kullanılan Doğal Dil İşleme, Terim Frekansı ve NLP Zemberek Kütüphanesi kavramlarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde belirtilen probleme uygun olarak önerilen yöntemden ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Son olarak dördüncü bölümde ise önerilen yöntemle birlikte ulaşılan sonuçlara ve sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

## 2. İLGİLİ KAVRAMLAR (RELATED CONCEPTS)

### 2.1. Doğal Dil İşleme (Natural Language Porcessing)

Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing) son zamanlarda insan dilini hesaplamalı olarak temsil etmek ve analiz etmek için kullanılmaktadır [13]. Bu durum esasında, doğal dillerin bilgisayar veya elektronik cihazlarda temsil edilebilmesini sağlamaya yönelik çalışmalar olarak görülebilir.

Doğal Dil İşleme bilgisayarların doğal dilleri işleme sürecidir. Bu süreç insan bilgisayar etkileşimi biliminin altında veya hesaplamalı dil bilimi olarak da görülebilir. Bu dilin hesaplanması ve özelliklerinin tanınması durumudur [12]. Doğal Dil İşlemenin (DDİ) geniş sınıflandırılması aşağıdaki Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Doğal Dil İşlemenin geniş sınıflandırılması [13]

Doğal Dil İşleme, üzerinde çalışılacak birçok konuyu da beraberinde getirmiştir. Bu konular aşağıda verilmiştir [14].

- Yazım yardımcı araçlarının geliştirilmesi
- Yazım yanlışlarının düzeltilmesi
- Bul ve değiştir
- Basılı bir metni okuma (optik olarak metin okuma) ve okuma yanlışlarını düzeltme
- Bir metnin özetini çıkarma
- Metnin içerdiği bilgiyi çıkarma
- Bilgiye erişim
- Metni anlama
- Bilgisayarla sesli etkileşim
- Bilgisayarın konuşması (metni seslendirme)
- Konuşmayı anlama (konuşmayı metne dönüştürme)
- Soru yanıt dizgeleri
- Yabancı dil okuma yardımcı araçları
- Yabancı dilde yazma yardımcı araçları
- Doğal diller arası çeviri

## 2.2. Terim Frekansı (Term Frequency)

Dokümanlarda en önemli özellik olan terimlerin (çoğunlukla kelime yerine kullanılır) önemi ve taşıdığı bilgi belirlenirken çeşitli metrikler kullanılır. Bunlardan en önemlisi Terim Frekansı (Term Frequency) metriğidir. Terim Frekansı (TF), metin madenciliğinde en yaygın kullanılan sayısal gösterimdir ve terim sıklığı anlamına gelmektedir. Kısaca, TF değeri bir terimin bir dokümanda görünme sayısını ifade eder [16].

Bu çalışmada veri setindeki terimlerin taşıdıkları bilgi miktarını belirlemek üzere Terim Frekansı (TF) metriği kullanılmıştır. Var olan haberlerin birinden çok bağımsız ve aykırı olmasından dolayı daha iyi sonuçlar elde etmek adına Terim Frekansı tercih edilmiştir.

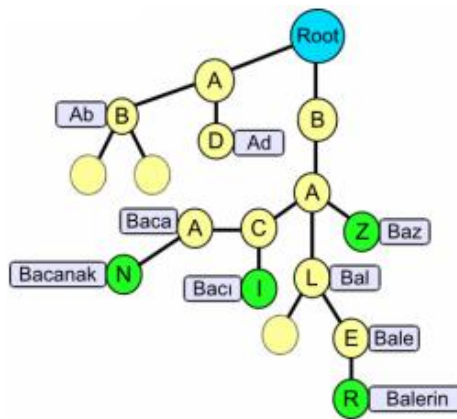
## 2.3. NLP Zemberek Kütüphanesi (NLP Zemberek Library)

Veri setindeki haberler üzerinde yapılacak dil bilimi işlemleri, terimlere ayrıştırma (Tokenization), terim yapı türü (Morphology) belirleme ve önemsiz terimleri (Stop Words) silme için, Ahmet Afşin Akın ve Mehmet Dünder Akın tarafından geliştirilmiş, Java tabanlı Türk dili Zemberek Kütüphanesi kullanılmıştır.

Zemberek Kütüphanesi ile çerçeve yazım denetimi, morfolojik ayrıştırma, kök bulma (Stemming), kelime oluşturma, kelime önerme, yalnızca ASCII karakterleri kullanılarak yazılan sözcükleri dönüştürme ve heceleri çıkarma gibi temel NLP işlemleri yapılabilmektedir. NLP Zemberek Kütüphanesi iki ana bölümden oluşmaktadır; dil yapısı bilgisi ve Doğal Dil İşleme işlemleri. Çekirdek kitaplık Doğal Dil İşlemeye özgü algoritmalar içerir ve dil uygulamalarına gerekli araçları sağlar. Çekirdek kütüphane özellikle Türk dilleri için tasarlanmış olsa da, herhangi bir özel dil uygulaması içermez. Bu esnekliği sağlamak için çeşitli yardımcı mekanizmalar ve soyutlamalar kullanılmaktadır. Her dil uygulaması, önceden tanımlanmış dilbilgisi gereksinimlerine uymaktan ve gerekli dil verilerini sağlamaktan sorumludur.

NLP Zemberek kütüphanesinin avantajlarından biri de açık kaynak kodlu olmasıdır [18].

Zemberek, kök sözlük tabanlı bir ayrıştırıcı kullandığından, bir kök bulma mekanizması gerektirir. Ayrıştırıcı, kök adaylarını bularak ayrıştırma işlemine başlar. Zembereğin kullandığı kök ağacı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Doğrudan çevrimsel kelime grafiği ağacı [1]

### 3. YÖNTEM (METHOD)

#### 3.1. Veri Seti (Dataset)

Çalışma kapsamında üzerinde çalışılması gereken bir veri setine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda Türkiye'nin en çok okunan haber sitelerinden Hürriyet ve çocuklara, gençlere özel hazırlanan ilk ve tek haber sitesi Yumurtalı Ekmek adlı haber sitesi kullanılarak, toplamda 3925 haberi içeren bir veri seti Tablo 2'de sayısal dağılımı verildiği üzere oluşturulmuştur [2,3].

**Tablo 2.** Haber sitelerinden alınan toplam haber sayıları

| Haber Sitesi    | Toplam Haber Sayısı |
|-----------------|---------------------|
| Yumurtalı Ekmek | 1313                |
| Hürriyet        | 2612                |
| <b>Toplam</b>   | <b>3925</b>         |

Veri setinin, Havighurst'ün gelişim kuramının uyarlanmış yaş gruplarına göre etiketlenilmesi, gönüllü Rehberlik ve Psikolojik Danışmanlar tarafından yapılmıştır. Veri setindeki haberlerin sınıflandırılmış halinde, Çocukluk (6-13 yaş) yaş grubu için 1313 adet, Ergenlik (13-18) yaş grubu için 1189 adet ve Yetişkinlik (18+) yaş grubu için 1423 adet haber bulunmaktadır. Bu veri setinin %70'i eğitim ve %30'u sınav amaçlı kullanılmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

#### 3.2. Veri Ön İşleme (Data Preprocessing)

Veri ön işleme, herhangi bir veri kümesindeki ilk işlemdir ve gerçek veri işleme başlamadan önce yapılan tüm işlemlerden (verinin doğruluğu, eksiklerinin giderilmesi, normalleştirme gibi işlemler) oluşur. Bu işlem ile veriler üzerinde herhangi bir analiz yapılmasını engelleyebilecek veri problemlerini çözme, verinin doğasını anlama, daha anlamlı bir veri analizi yapma ve belirli bir veri kümesinden daha anlamlı bilgiler elde etme gibi faydalar sağlayabilir [17].

Bu amaçla, veri ön işleme de öncelikle RSS ile toplanmış haberlerin, eğitim amaçlı olarak belirlenmiş olanlarının HTML etiketleri temizlenerek düz bir metin haline getirilmesi sağlanmıştır. Daha sonra haberlerde bulunan noktalama işareti, link, etiket, sembol, emoji, tarih, saat ve sayı gibi metin olmayan her türlü ifade NLP Zemberek kütüphanesi ile veri setinin içerisinden kaldırılmıştır. Metin olmayan tüm ifadelerin veri setinin içerisinden kaldırılmasından sonra var olan tüm kelimeler küçük harfe çevrilerek farklılıklar ortadan kaldırılmıştır (metin birimleri normalleştirilmiştir, aynı forma getirilmiştir).

Daha sonra haber metinleri, NLP Zemberek kütüphanesinin sözcüklere ayırma (tokenization) işlemi kullanılarak terimlere ayrılmıştır. Elde edilen her terim (kelime) için kök bulma işlemi uygulanmış ve NLP Zemberek kütüphanesinin biçim bilgisi (morphology) işlemi ile kelimenin en yalın haline ulaşılmıştır. Sözlük oluşturma işleminde kolaylık sağlaması açısından, ulaşılan her kök formunun tipi de (sıfat, zarf vb.) etiketlenmiştir.

Veri ön işlemenin son basamağı olarak, elde edilen terimlere NLP Zemberek kütüphanesi ile anlamsız kelimeleri silme (remove stop words) işlemi uygulanmış, tek başına anlam ifade etmeyen her terim kelime listesinden çıkarılmıştır.

#### 3.3. Sözlük Oluşturulması (Creating Dictionary)

##### 3.3.1. Terim Frekanslarının Hesaplanması (Calculating Term Frequency)

Bu aşamada sözlüğü anlamlı kelimelerle oluşturabilmek için öncelikle, her haber içinde bulunan kök formundaki terimlerin görülme sıklığı hesaplanmıştır (TF değeri). Aşağıdaki Tablo 3'teki örnekte rehberlik ve psikolojik danışman tarafından önceden Yetişkin grubu için uygun görülüp etiketlenen bir

haberin, ön işlemeden geçtikten sonra kalan terimlerinin TF değerleri görülmektedir. Bu işlem her haber için yapılmaktadır.

**Tablo 3. Haberlerin terim frekanslarının belirlenmesi**

| Yaş Grubu   | Haberin Terimleri   | Terim Frekansları   |
|-------------|---|---|
| Yetişkinlik | İlçe, uyuşturucu, esrar, uyuşturucu, komutan, ekip, ilçe, uyuşturucu, astsubay, üstçavuş, komutan uyuşturucu, madde, kılık, bahçe tabanca, tüfek, esrar | {'ilçe': 2, 'uyuşturucu': 4, 'esrar': 2, 'komutan': 2, 'ekip': 1, 'astsubay': 1, 'üstçavuş': 1, 'madde': 1, 'kılık': 1, 'bahçe': 1, 'tabanca': 1, 'tüfek': 1} |

### 3.3.2. Eşik Değeri Bulma (Finding the Threshold Value)

Her haberin terim frekansları bulduktan sonra haber bazında anlamlı kelimeleri seçmek üzere bir eşik değeri uygulanmıştır. Bu eşik değeri Formül 1'deki gibi ilgili haberdeki her kelimenin TF değerleri toplanarak haberde geçen toplam kelime sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Böylelikle hesaplanan ortalama değerinden büyük olan TF değerli kelimeler seçilerek, sözlükteki uygun yaş grubunda ilk kez geçiyorsa haber sayısı değeri bir olarak (bir haberde görüldü anlamında) eklenir, daha önce geçmiş ise haber sayısı toplamı bir artırılarak mevcut kayıt güncellenir. Bu işlem tüm eğitim setindeki haberler için tek tek uygulanarak, sözlük oluşturmaktadır.

$$Ortalama = \frac{\sum \text{Habere ait her kelimenin TF değeri}}{\text{Haberdeki toplam kelime sayısı}} \quad (1)$$

Tablo 3'te örneği verilen haber için Formül 1 uygulandığında ortalama değer 1 olarak bulunur. 1'den büyük ve 1'e eşit geçme sıklığı olan terimler ilgili yaş grubu için Tablo 4'te görüldüğü gibi (her haber için) sözlüğe eklenmektedir.

**Tablo 4. Terimlerin Sözlüğe eklenmesi**

| Yaş Grubu   | Ortalamadan Büyük Olup Sözlüğe Eklenen Terimler | Haber Sayısı |
|-------------|---|--------------|
| Yetişkinlik | İlçe  | 1            |
| Yetişkinlik | Uyuşturucu                                      | 1            |
| Yetişkinlik | Esrar   | 1            |
| Yetişkinlik | Komutan   | 1            |

### 3.3.3. Sözlüğün Elde Edilmesi (Dictionary)

Sözlük oluşturulurken aynı yaş grubu için başka bir haberde eşik değerinden büyük olup sözlüğe eklenecek terim aynı ise (daha önce sözlüğe eklenmiş ise) sözlükte tutulan haber sayısı değeri 1 artırılır. Böylece terimlerin yaş gruplarına uygun şekilde dağılımı görülmektedir. Tamamlanan sözlüğün küçük bir kısmı Tablo 5'te bulunmaktadır. Elde edilen sözlük ve özellik değerleri veri tabanında tutulmaktadır.

**Tablo 5. Oluşturulan sözlük**

| Yaş Grubu   | Ortalamadan Büyük Olup Sözlüğe Eklenen Terimler | Haber Sayısı |
|-------------|---|--------------|
| Yetişkinlik | İlçe  | 174          |
| Yetişkinlik | Uyuşturucu                                      | 49           |
| Yetişkinlik | Alkol   | 12           |
| Çocukluk    | İlçe  | 27           |
| Çocukluk    | Öğretmen  | 101          |
| Ergenlik    | Spor  | 82           |
| Ergenlik    | İlçe  | 30           |

### 3.4. Yaş Grubu Tahmini (Age Group Prediction)

Veri setinde sınama için ayrılmış her haberde önemli görülen (ortalama frekanstan yüksek) terimlerin hepsini değerlendirerek, bu haber için bir yaş grubu tahmininde bulunulması gereklidir. Bu amaçla haberin önemli terimleri göz önünde bulundurularak, 3 yaş grubu için (sözlükte yer alan geçtikleri haber sayısına uygun şekilde) ayrı ayrı puanlandırılır. Haberlerde geçme sıklığı değeri en yüksek olan yaş grubu bu haberin etiketi olarak belirlenir. Tablo 6’da görüldüğü gibi sınama kısmında var olan bir haberin terimleri yer almaktadır. Bu terimlerin oluşturulan sözlükte her yaş grubuna uygun haber sayısı değerleri toplanarak bir puan elde edilmiş olur. Tablo 6’da verilen haber örneği için Yetişkinlik yaş grubu seçilmektedir.

Sınama için ayrılan haberler için de önceden haberin uygun görülen bir (rehberlik ve psikolojik danışman tarafından manuel olarak belirlenen) yaş grubu bilgisi belirlenmiş durumdadır. Böylece sınanan her haber için olması gereken ve tahmin edilen olmak üzere iki yaş grubu bilgisi yer almaktadır. Sınama için kullanılan haber sayıları 3 yaş grubu içinde 272 tane (eşit) olacak şekilde alınmıştır.

**Tablo 6. Yaş grubu tahmini puanlama aşaması**

| Yaş Grubu   | kuzey | Terör | Örgüt | Sevk | Pikap | petrol | devriye | Puan        |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------|--------|---------|-------------|
| Çocukluk    | 35    | 0     | 12    | 2    | 0     | 7      | 0       | 56          |
| Ergenlik    | 11    | 1     | 4     | 1    | 0     | 1      | 1       | 19          |
| Yetişkinlik | 122   | 415   | 370   | 94   | 1     | 31     | 31      | <b>1064</b> |

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

Veri setinin sınanmaya ayrılmış kısmında bulunan haberler kullanılarak sözlük başarısı ölçülmüştür. Daha önceden belirtildiği gibi sınama verisinin önceden etiketlenen yaş grubu ve daha sonra puanlama sonucu belirlenen bir yaş grubu bulunmaktadır. Hata matrisi (confusion matrix) doldurulurken, “Gerçek” değeri için atanmış yaş grubu etiketi ve “Tahmin Edilen” değeri için ise puanlama sonucu belirlenen yaş grubu dikkate alınmıştır. Sonuçlara göre sözlüğün doğruluk (accuracy) değeri %70 bulunmuştur. Çalışmanın hata matrisi değerleri Tablo 7’de ve hata matrisinden üretilen sonuçlar ise Tablo 8’de görülmektedir.



**Tablo 7. Confusion Matrix**

|        |             | Tahmin Edilen |          |             |
|--------|-------------|---------------|----------|-------------|
|        |             | Çocukluk      | Ergenlik | Yetişkinlik |
| Gerçek | Çocukluk    | 266           | 0        | 6           |
|        | Ergenlik    | 194           | 46       | 32          |
|        | Yetişkinlik | 15            | 0        | 257         |

**Tablo 8. Çalışma sonucunda elde edilen Confusion Matrix'ten üretilen sonuçlar**

|                           | Tutarlılık (Precision) | Hatırlama (Recall) | F1-Değeri   |
|---------------------------|------------------------|--------------------|-------------|
| Çocukluk(6-13 yaş)        | 0.56                   | 0.98               | 0.71        |
| Ergenlik(13-18 yaş)       | 1.00                   | 0.17               | 0.29        |
| Yetişkinlik(18+ yaş)      | 0.87                   | 0.94               | 0.91        |
| <b>Doğruluk</b>           |                        |                    | <b>0.70</b> |
| <b>Ağırlıklı Ortalama</b> | 0.81                   | 0.70               | 0.64        |

Tablo 8'de yer alan kavramlar şu şekilde açıklanmaktadır [15].

**Tutarlılık (Precision):** Tutarlılık çok sınıflı bir karışıklık matrisidir. Pozitif olarak tahmin edilen örneklerden, kaçının gerçekten pozitif olduğunu göstermektedir.

**Hatırlama (Recall):** Pozitif olan örneklerden, ne kadarının pozitif olarak tahmin edildiğini gösteren bir metriktir.

**F1-Değeri:** Tutarlılık (Precision) ve Hatırlama (Recall) değerlerinin harmonik ortalamasıdır.

**Doğruluk (Accuracy):** Doğru sınıflandırılan örnek sayısının toplam örnek sayısına oranı olarak hesaplanır.

**Ağırlıklı Ortalama:** Her üç grup için elde edilen bir metrik değerinin ortalamasıdır.

Hata matrisinden üretilen sonuçlara göre çalışmada üretilen sözlük Çocukluk (6-13 yaş) yaş grubu ve Yetişkinlik (18+) yaş grubu için daha anlamlı sonuçlar verirken Ergenlik (13-18) yaş grubu için düşük bir sonuç üretmiştir. Sonuçlar, ergenlik yaş grubu için üretilen kelimelerin, hem çocukluk hem de yetişkinlik kelimelerinden tam olarak ayrıştırılmadığını göstermektedir. Bu durum gelecek çalışmalarda ele alınması gereken önemli bir tespittir.

Gelecekte TF değerinin yanı sıra, anlamlı kelimelerin tespiti için farklı yöntemler (Helmholtz ilkesi veya Rake algoritması) kullanılabilir. Bunun yanı sıra sözlük tabanlı bir model yerine, derin öğrenme modeli kullanılarak başarımların değerlerinin kıyaslanması mümkündür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akın A.A., Akın M. D. Zemberek, an open source NLP framework for Turkic Languages, (2007).
- [2] Hürriyet, 21 Eylül 2019, Erişim adresi: [www.hurriyet.com](http://www.hurriyet.com)
- [3] Yumurtalı Ekmek, 21 Eylül 2019, Erişim adresi: [www.yumurtaliekmek.com](http://www.yumurtaliekmek.com)

- [4] Çok F. Gelişim psikolojisi, kuramlar, yöntemler ve yaşamın ilk yılları (kısaltarak çeviri), Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Dergisi, 2 (26), s. 641-670, DOI: 10.1501/Egifak\_0000000479, (1993).
- [5] Fırat F. Çocuk odak‘sız’ habercilik: internet gazetelerinde çocuk içerikli haberlerin sunumu ve etik ihlaller, Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi, 2(4), (2016).
- [6] Ofłazer K. Türkçe ve Doğal Dil İşleme (Turkish Natural Language Processing), Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 2(5), (2012).
- [7] Silverman K., Anderson V., Bellegarda J., Lenzo K. and Naik D. Design and Collection of a Corpus of Polyphones And Prosodic Contexts for Speech Synthesis Research and Development, (1999).
- [8] Riloff E. Automatically Generating Extraction Patterns From Untagged Text, AAAI'96: Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence, Vol. 2, s. 1044–1049, (1996).
- [9] Kėpuska V. Z., Rojanasthien P. Speech Corpus Generation from DVDs of Movies and TV Series, Journal of International Technology and Information Management: Vol. 20: Iss. 1, Article 4. (2011).
- [10] Tsalidis Ch., Vagelatos A. and Orphanos G. An electronic dictionary as a basis for NLP tools: TheGreek case, ArXiv cs.CL/0408061 (2004).
- [11] Aktaş Y., Yılmaz İnce E., Çakır A. Doğal Dil İşleme Kullanarak Bilgisayar Ağ Terimlerinin Wordnet Ontolojisinde Uyarlanması, SDÜ Teknik Bilimler Dergisi, (2017).
- [12] Şeker S. E. Doğal Dil İşleme(Natural Language Processing), Yönetim Bilişim Sistemleri Ansiklopedisi, 4(2), (2015).
- [13] Khurana D., Koli A., Khatler K., Singh S. Natural Language Processing: State of The Art, Current Trends and Challenges, ArXiv abs/1708.05148 (2017).
- [14] Adalı E. Doğal Dil İşleme, Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 2(5), (2012).
- [15] Dev, 14 Nisan 2020, Erişim adresi: <https://dev.to/overrideveloper/understanding-the-confusion-matrix-264i>
- [16] Binici K. Kütüphane ve Bilgi Biliminde Tema ve Yönelim, Hiper yayın, s. 41-84, İstanbul, (2018).
- [17] İlhan U. Application Of K-NN and FPTC Based Text Categorization Algorithms to Turkish News Reports, (2001).
- [18] GitHub, 20 Eylül 2019, Erişim adresi: <https://github.com/ahmetaa/zemberek-nlp>
- [19] WordNet, 03 Şubat 2020, Erişim adresi: <https://wordnet.princeton.edu/>
- [20] Uludoğan G., Özçelik R., Parlar S., Ercan G., Yıldız O. T. User Interfaces for Turkish Natural Language Processing, (2019).
- [21] Eryiğit G. ITU Turkish NLP Web Service, s. 1-4, DOI: 10.3115/v1/E14-2001, (2014).

## An Alternative Bus Stop Design Proposal for Ankara

Kemal YILDIRIM\*<sup>ib</sup> Buğra ERGÜN<sup>ib</sup>

Gazi University Faculty of Technology, Department of Woodworking Industrial Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 24/02/2020  
Revision 29/04/2020  
Accepted: 08/05/2020

#### Highlights

- City planning.
- Bus stop design.
- Urban furniture.

#### Keywords

Ankara  
Bus Stop  
Hittite Sun Course  
Design  
Traffic Accident

In this study, a unique bus stop design proposal was developed for the city of Ankara, inspired by various Hittite Sun Course examples that lived in these lands thousands of years ago, in order to protect passengers from accidents that may occur at bus stops and to become a part of the city identity of the stops.



Figure A. Ankara bus stop design proposal

**Purpose:** In this study, it is aimed to protect the passengers at the bus stops against effects such as rain, snow, sun and traffic accidents, to improve the comfort conditions, to design an original bus stop suitable for the ergonomic, technological, cultural and aesthetic requirements of the passengers.

**Theory and Methods:** Sketch works of the bus stop were inspired by the Hittite Sun Course, and then the main form that forms the shell of the stop was modeled with AutoCAD and 3D Max programs in the computer environment. As a result of the evaluations made later, the final form was decided and drawing and visualization studies were completed.

**Results:** It was inspired by the dome structures of Mimar Sinan and the Hittite Sun Course form dating back to 4250 years, as the stops are part of the city's identity, as they are protected against possible natural effects and accidents at bus stops, and for this purpose, a unique bus stop design proposal has been developed for Ankara province. In addition, the energy needed will be produced and stored with solar panels placed on the roof of this new generation bus stop, designed with a sustainable city approach.

**Conclusion:** The bus stop designed for the city of Ankara; It is an original urban equipment design proposal that is expected to protect passengers waiting at the bus stop against natural effects such as rain, snow and traffic accidents thanks to the reinforced steel plates and carbon fiber reinforced composite surface coating material used in the shell of the shell, and also to establish an effective bond with the historical texture of the city. Thanks to the solar panels placed on the stop, the energy needed for night lighting and information screens can be provided and the equipment such as phones and tablets of the passengers waiting at the stop can be charged.



## Ankara İçin Alternatif Bir Otobüs Durağı Tasarım Önerisi

Kemal YILDIRIM\* Buğra ERGÜN

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaçşeri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, otobüs duraklarında yolcuların yağmur, kar, güneş gibi etkilere ve trafik kazalarına karşı korunması, durakların konfor koşullarının iyileştirilmesi, yolcuların ergonomik, teknolojik, kültürel, estetik vb. gereksinimlerinin karşılanması için özgün bir otobüs durağı tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Bu maksatla, yolcuların otobüs duraklarında karşılaşılabileceği muhtemel doğal etkilere ve trafik kazalarına karşı korunması ve durakların kent kimliğinin bir parçası haline gelmesi amacıyla, Mimar Sinan'ın kubbeli yapılarından ve Ankara'nın tarihi geçmişi ile bağ kuran ve 4250 yıl öncesine tarihlenen Güneş Kursu formundan esinlenilerek, Ankara ili için özgün bir otobüs durağı tasarım önerisi geliştirilmiştir. Sürdürülebilir bir kent anlayışıyla tasarlanan bu yeni nesil otobüs durağının üst örtüsüne yerleştirilen güneş panelleri sayesinde ihtiyaç duyulan enerji üretilebilecek ve depolanabilecektir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 24/02/2020  
Düzeltilme: 29/04/2020  
Kabul: 08/05/2020

### Anahtar Kelimeler

Ankara  
Otobüs Durağı  
Hitit Güneş Kursu  
Tasarım  
Trafik Kazası

### Keywords

Ankara  
Bus Stop  
Hittite Sun Course  
Design  
Traffic Accident

## An Alternative Bus Stop Design Proposal for Ankara

### Abstract

In this study, it is aimed to protect the passengers at the bus stops against effects such as rain, snow, sun and traffic accidents, to improve the comfort conditions, to design an original bus stop suitable for the ergonomic, technological, cultural and aesthetic requirements of the passengers. For these reasons, it was inspired by the dome structures of Mimar Sinan and the Hittite Sun Course form dating back to 4250 years, as the stops are part of the city's identity, as they are protected against possible natural effects and accidents at bus stops, and for this purpose, a unique bus stop design proposal has been developed for Ankara province. In addition, the energy needed will be produced and stored with solar panels placed on the roof of this new generation bus stop, designed with a sustainable city approach.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kentler, tarih boyunca insanlar arasındaki düzen kurucu ilişkileri, sosyal ve kültürel değişimleri şekillendiren, sosyolojik, demografik ve ekonomik bakımdan farklılıklar gösteren fiziksel yaşam mekânlarıdır [1]. Geçmişten buyana birçok faktöre bağlı olarak sürekli değişen ve şekillenen kentler, zaman içerisinde kendilerine özgü bir görünüme kavuşurlar. Kentlerin sahip oldukları bu değerler bütününe kentsel kimlik adı verilmektedir [2]. Kimlik, genel olarak doğadaki herhangi bir canlıyı veya objeyi diğer canlı ve objelerden ayıran, öncelikle onun görsel, işitsel vb. duygularla algılanan, kendine özgü olma durumu ile ifade edilmektedir [3]. Kentler süreç içerisinde kendine özgü bir kimliğe sahip olurlar ve oluşan o kimlikle anılır ve o kimlikle de yaşarlar [4]. Bu noktada, kimlik, kent imgesini etkileyen, kentlere göre farklı ölçek ve yorumlarla kendine özgü özellikleri barındıran, sosyal, kültürel, fiziksel, ekonomik, tarihsel ve forma dayalı unsurlarla şekillenen, geçmiş ve geleceği birbirine bağlayan anlamlı bir bütünlüktür [5,6].

Tarihi mekânlar ve kentsel donatılar, kent kimliği ve kültürünü oluşturan kurucu bir niteliğe sahiptir. Bu noktada, günümüzde etkin olan tektipleştirici yaklaşımdan kentleri kurtarmak için kentlere yeni bir kimlik

kazandırmaya çalışmak yerine, kentin tarihi dokusundan faydalanılarak o kente özgü kültürel özelliklerin keşfedilmesi ve günün koşullarıyla ilişkilendirilip kent kimliğinin sürekliliği sağlanabilir. Kentlerin gelenekselleşmiş değerleri ve deneyimlerine göre, günümüzün sosyal, kültürel, psikolojik, ekonomik, teknolojik, ergonomik, estetik faktörleri çerçevesinde oluşan sorunlarına daha etkili çözümler getirilebilecektir. Kentler, günlük yaşamın bir parçası olarak, çeşitli fikirleri, tercihleri, sosyal ilişkileri barındırması yanında, tarihiyle, mimari özellikleriyle, özgün değerleriyle farklılaşırlar. Kültürel ortamda var olan kentler, devamlılığını ve gelişimini de kültürel zenginliğe borçludur [6].

Kent kimliğini oluşturan donatı elemanları, çoğu kez doğal etkilere ve sosyo-kültürel özelliklere göre şekillenirler [7]. Kent donatı elemanları, kentin dokusunu ve kimliğini oluşturan yapı elemanları arasında yer alır [2]. Kent mobilyası olarak ta isimlendirilen donatılar; insanların kent içindeki eylem gereksinimlerini karşılayan ve birbirleriyle iletişimini sağlayan, yaşamını kolaylaştıran, mekânlara işlevsel ve estetik bakımdan belirli bir değer kazandıran elemanlardır [8-10]. Bu nedenlerle, kentsel donatılar sadece işlevsel amaçlı değil, aynı zamanda kent peyzajını tamamlayıcı özellikleri bakımından da büyük önem taşırlar [10], aynı zamanda kent içindeki sürekliliğin ve bütünlüğün birer aracıdır [8].

Kuşkun [11], Bulut ve ark. [10] ve Özgeriş [2] çalışmalarında, kent donatı elemanlarını işlevlerine göre duraklar, gölgelikler, pergolalar gibi üst örtü elemanları, zemin kaplamaları, banklar ve oturma elemanları, aydınlatma elemanları, işaret ve bilgi levhaları, sınırlandırıcılar, su elemanları, kiosklar, büfeler gibi satış birimleri, heykel gibi sanatsal objeler ile bisiklet park yerleri, çöp ve posta kutuları ile bitkisel öğeler şeklinde sınıflandırmışlardır.

Kentsel donatılar; insanların gereksinimleri doğrultusunda sosyal ve kültürel özellikleri, donatıdan beklentileri, değer yargıları ile belli bir çevre düzeni içerisindeki işlevsel gerekliliklere göre şekillenir. Kent kimliği ile bütünleşen donatı elemanları teknik, estetik ve işlevsel bakımdan kentte süreklilik gösterirler. Bu süreklilik, salt bir şekilde sisteme dayalı değil, aynı zamanda herkesin anlayabileceği ve kullanabileceği bir ‘dil’ özelliğine sahip olmasındandır. Bu nedenle, donatı elemanları gerçekleştirdiği işlevsel görevler yanında, kent kimliğiyle ilişkileri bakımından, kentin anlamsal ve simgesel özelliklerini oluşturması bakımından önemlidir [8,9]. Buna göre, kent kimliği ile özgün bir bağ kuran donatı elemanlarının tasarımında; ilgili standartlar, ergonomik ilkeler, işlevsellik ve estetik gibi unsurlar dikkate alınmalı; kolay taşınabilir, kullanım yerinde montajlanabilir, eskiyen ve/veya yıpranan parçaları değiştirilebilir, kolay bakım yapılabilir, trafik kazalarına karşı sağlam ve korunaklı, vandalizme karşı dayanıklı olmalıdır. Bu bilgiler ışığında, kent donatı elemanları arasında önemli bir yere sahip olan otobüs duraklarının planlanmasında gerekli olan temel bilgiler “TS 11783” [12] ve “TS 12174” [13] adlı standartlarda yer almaktadır. Bu standartlarda erişim kolaylığı, emniyet ve güvenlik açısından uyulması gereken kurallar, durak cebi ve yol kenarı otobüs durakları yer seçimi kriterleri ve ölçüleri gibi bilgiler bulunmaktadır.

Otobüs durakları konumlandırıldıkları yerlere göre (1) hat sonu terminaller, (2) hat boyu duraklar, (3) otobüs hattı kesişme noktaları aktarma alanları ve (4) türler arası aktarma yapılan terminaller şeklinde dört grupta toplanmaktadır [14]. Otobüs duraklarında hat uzunluğu, sefer sayısı ve süreleri, konumu, park alanları ve kaplama koşulları, yolcu sayısı, yoğunluğu, yolcuların rota seçimi gibi hususlar [15] planlamayı etkilemektedir. Otobüs duraklarının planlanmasını etkileyen bir diğer önemli konuda, son zamanlarda öne çıkan “solar enerjili otobüs durağı” tasarım uygulamalarıdır. Örneğin Gaziantep ilimizde de kullanılmaya başlanan bu yeni nesil solar enerjili yapılarda durağın aydınlatılmasının sağlanabildiği bildirilmektedir. Benzer uygulamalarda, bilgilendirme panoları ile durakta bekleyen yolcuların telefon, tablet, engelli aracı gibi cihazları için gerekli enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Doğan ve Özuysal [15] çalışmada, durakta bulunan bilgilendirme sistemlerinin, yolcuların en uygun ulaşım türünü ve varış zamanını seçmelerine yardımcı olduğu, karayolu tabanlı bir kısım bilginin gözetim cihazlarıyla toplandığı ve yolcu bilgi sistemlerine iletilmek üzere yönetim bilgi sistemine işlendiği bildirilmektedir. Örneğin görme engelli bireylerin seyahat edilen çevrede karşılaştığı sosyal ve fiziksel engeller, kişinin güvenlik içerisinde bağımsız hareket ve yönelim becerisini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, yolcuların karakteristikleri ve yeteneklerine uygun akıllı durakların tasarımı oldukça önemli bir ihtiyaç olarak görülmektedir [16].

Bu bilgiler ışığında, Ankara’nın Batıkent bölgesinde kullanılan hat boyu otobüs durağı örneği Şekil 1’de verilmiştir. Kentiçi ana arter üzerinde bulunan bu durak alanında; dairesel kesitli metal taşıyıcıların

oluşturduğu gövdenin üzeri kavisli camlardan oluşan bir üst örtüyle, önü ve sağ yanı açık, sol yanı reklam panosu, arka kısmı ise şeffaf camlarla kapatılmış, iç orta kısımda ise üç kişilik bir oturma elemanı bulunan bir kent donatısıdır. “TS 11783” [12] ve “TS 12174” [13] standartlarına ve gelişmiş uygulamalara göre, bu durakta bilgilendirme ve solar enerji sistemleri bulunmamakla birlikte, trafik akış yönünden gelebilecek her türlü kaza risklerine karşı korumasız olmakla birlikte, sol yan ve arka kısmı kapalı olduğu için yolcuların kaçış yolları da bulunmamaktadır.



*Şekil 1. Ankara hat boyu otobüs durağı [17]*

Yukarıda ele alındığı üzere trafik güvenliği konusu, insan hayatı için oldukça önemli olmasına karşın, maalesef bu konu otobüs durakları özelinde bilimsel çalışmalarda yeterince yer bulamamıştır. Bu eksikliğe katkı olması için planlanan bu çalışmayla, bu konuda toplumsal farkındalık oluşturularak merkezi ve yerel yöneticilerin dikkatlerinin çekilmesi, yolcuların yağmur, kar, güneş gibi etkilere ve trafik kazalarına karşı korunması, konfor koşullarının iyileştirilmesi, yolcuların ergonomik, teknolojik, kültürel, estetik vb. gereksinimlerinin karşılanması için özgün bir otobüs durağı tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Bu maksatla tasarlanan otobüs durağının tasarım fikrinin oluşturulması sürecinde, Mimar Sinan’ın kubbeli yapılarından ve Ankara’nın tarihi geçmişi ile bağ kuran ve 4250 yıl öncesine tarihlenen Güneş Kursu formundan esinlenilmiştir.

### 1.1. Problemin Tanımlanması (Identification of the Problem)

Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO) verilerine göre, her yıl dünyada 1,2 milyon kişinin trafik kazalarında yaşamını yitirdiği bildirilmektedir [18]. Bu sonuç, yaşanan trafik kazalarının insanın yaşama hakkına ve yaşam kalitesine olan etkisini açıkça göstermektedir. Bu acı dolu, istenmeyen trafik kazalarına karşı gerekli önlemler alınmadığı takdirde, ekonomik kayıplar bir yana, daha milyonlarca insanın hayatı ve yaşam kalitesi tehdit altında olmaya devam edecektir. Ülkemizde son beş yıl içerisinde yazılı ve görsel basında yer alan otobüs durağı kazası sonuçları Tablo 1’de, örnek görseller ise Şekil 2’de verilmiştir.



*İstanbul Üsküdar*



*Bursa Nilüfer*

*Şekil 2. Otobüs durağı kazaları [19]*

**Tablo 1.** Ülkemizde son beş yıl içerisinde yaşanan otobüs durağı kazası sonuçları [19]

| Yılı | Kaza Yeri             | Kaza Şekli (Durağa Çarpma) | Kaza Sonucu                              |
|------|-----------------------|----------------------------|--|
| 2019 | İstanbul Beşiktaş     | Halk otobüsü               | 1 kişi vefat etti, 12 kişi yaralandı     |
|      | İstanbul Küçükçekmece | Otomobil                   | 1 kişi vefat etti                        |
|      | İstanbul Maltepe      | Hafif ticari araç          | 1 kişi yaralandı                         |
|      | İstanbul Fatih        | Motosiklet                 | 3 kişi yaralandı                         |
|      | İstanbul Sarıyer      | Tır                        | 3 kişi yaralandı                         |
|      | Ankara Mamak          | Halk otobüsü               | 4 kişi vefat etti, 10 kişi yaralandı     |
|      | Sakarya Pamukova      | Tır                        | 2 kişi vefat etti, 3 kişi yaralandı      |
|      | Bursa Nilüfer         | Otomobil                   | 1 kişi yaralandı                         |
| 2018 | İstanbul Üsküdar      | Otomobil                   | 3 kişi vefat etti, birçok kişi yaralandı |
|      | İstanbul Kadıköy      | Midibüs                    | İkisi ağır 6 kişi yaralandı              |
|      | İzmir Bornova         | Kamyonet                   | 5 kişi yaralandı                         |
|      | Trabzon Akçaabat      | Minibüs                    | Birisi ağır 5 kişi yaralandı             |
| 2017 | Muğla Dalaman         | Otomobil                   | Birisi ağır 5 kişi yaralandı             |
|      | Malatya               | Otomobil                   | 1 kişi vefat etti, 1 kişi yaralandı      |
| 2016 | Denizli               | Otomobil                   | 1 kişi vefat etti                        |
|      | İzmir Güzelbahçe      | Otomobil                   | 2 kişi vefat etti                        |
| 2015 | Ankara Dikimevi       | Belediye otobüsü           | 12 kişi vefat etti, 12 kişi yaralandı    |
|      | İstanbul Sarıyer      | Halk otobüsü               | 2 kişi vefat etti                        |
| 2014 | Ankara Kazan          | Otomobil                   | 2 kişi yaralandı                         |
|      | Ankara                | Belediye otobüsü           | 1 kişi vefat etti                        |
|      | Bursa Nilüfer         | Otomobil                   | 2 kişi vefat etti                        |
|      | İstanbul Kabataş      | Halk otobüsü               | İkisi ağır 13 kişi yaralandı             |

Bu trafik kazaları, son beş yıl içerisinde yüzlerce insanımızın duraklarda yaşamını yitirdiğini ve yaralandığını göstermektedir. Hâlbuki Anayasanın 15. ve 17. maddesi ile Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi'nin 2. maddesinde “insanların yaşama hakkı güvence altına alınmıştır” denilmektedir. Bu hukuksal koruma taahhüdüne göre, insanların trafik kazalarına karşı korunmalarının sağlanması devletin ve kurumlarının asli görevleri arasındadır.

## 1.2. Problemin Önemi ve Sınırlılıkları (Importance of Problem and Limitations)

Durakta bekleyen yolcular; yağmur, kar, güneş gibi çeşitli doğal etkilere karşı, ayrıca çarpılma, sıkıştırılma, ezilme gibi trafik kazası etkilerine karşı korunma ihtiyacı duyabilirler ve korunma isteğinde bulunabilirler. Şekil 1'de görülen mevcut otobüs durağı bir kısım doğal etkilere karşı koruma sağlarken, yaşanan trafik kazalarına bakıldığında, kazalara karşı ise yeterince emniyetli bir koruma sağlayamadığı görülmektedir. Ayrıca mevcut durakların tasarım karakteristikleri ile kentin tarihsel dokusu arasında da özgün bir bağ kurulamadığı görülmektedir.

Hâlbuki kentin geçmişi ile kuracağı anlamlı bir bağ, onun ulusal ve uluslararası düzeylerde değerini artıracaktır. Bu noktadan hareketle, otobüs duraklarının hem doğal etkilere, hem de trafik kazası etkilerine karşı koruma sağlaması, aynı zamanda kentin tarihsel dokusuyla anlamlı bir bağ kurması bu hayati problemin çözümü için önemli olabilir.

## 1.3. Yöntem (Method)

Bu çalışmada varsayılan araştırma probleminin çözümüne katkı sunulması amacıyla, hem yolcuların otobüs duraklarında karşılaşabileceği kazalara karşı korunması, hem de durakların kent kimliğinin bir parçası olabilmesi için günümüzden binlerce yıl önce bu topraklarda yaşamış olan Hattilere ait çeşitli Güneş Kursu örneklerinden esinlenilerek Ankara ili için özgün bir otobüs durağı tasarım önerisi geliştirilmiştir.

Bu yaklaşım temelinde, ilk olarak Güneş Kurslarından alınan ilhamla otobüs durağının eskiz çalışmaları yapılmış, daha sonra durağın kabuğunu oluşturan ana form bilgisayar ortamında AutoCAD ve 3D Max programlarıyla modellenmiştir. Daha sonra yapılan değerlendirmeler neticesinde nihai forma karar verilmiş olup, çizim ve görselleştirme çalışmaları tamamlanmıştır (Şekil 4 ve 5).

## 2. OTOBÜS DURAĞI TASARIM ÖNERİSİ (BUS STOP DESIGN PROPOSAL)

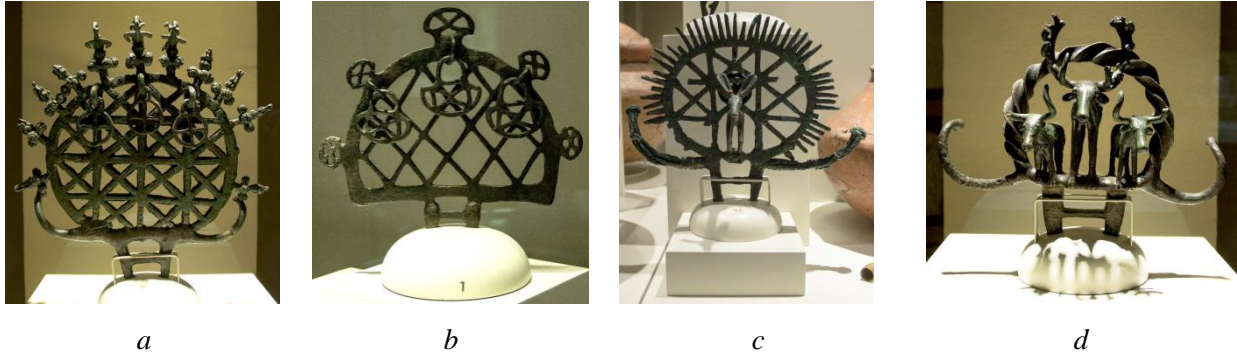
Özet kısmında açıklandığı üzere bu çalışmada, Mimar Sinan'ın kubbeli yapılarından ve Ankara'nın tarihi geçmişi ile bağ kuran Güneş Kursu formundan esinlenilmiştir. Sinan'ın yapılarıyla ilgili yapılan bilimsel çalışmalar, kubbenin düşey, yatay ve diğer yükleri aksel olarak zemine aktarabildiğini ve dolayısıyla momente ve çekmeye doğası gereği maruz kalmadığı için en sağlam form olduğunu göstermiştir [20-22].

Ankara kenti için hem kubbenin bu üstün özelliğinden faydalanılarak, hem de 4250 yıl öncesine tarihlenen ve kent için simgesel bir özellik taşıdığı düşünülen Güneş Kursu'ndan esinlenilerek bir otobüs durağı tasarımı önerisi geliştirilmiştir. Tasarlanan otobüs durağının ana formunda, daha önce Bilgin'in [21] dört farklı kubbeli yapı sistemlerini incelediği çalışmasında ele aldığı 1. tipe yakın simetriye sahip ve ana kubbe ikişerli iki farklı dört rijitlikli kemere oturan taşıyıcı sistemden faydalanılmıştır. Bilgin çalışmasında, ana kubbenin tepe noktasındaki deplasmanı 0.94 mm, ana kubbenin kemere bağlı bulunduğu noktada düşey deplasmanı 0.79 mm iken, aynı noktada yan deplasmanı ise 0.05 mm olarak açıklamıştır.

Yukarıdaki açıklamalar çerçevesinde, yolcuların yağmur, kar, güneş gibi etkilere ve trafik kazalarına karşı korunması, konfor koşullarının iyileştirilmesi, yolcuların ergonomik, teknolojik, kültürel, estetik vb. gereksinimlerinin karşılanması amacıyla tasarlanan otobüs durağı; malzeme, konstrüksiyon, üretim teknolojisi gibi teknik özellikleri bakımından aşağıda değerlendirilmiştir.

### 2.1. Koruyucu Kabuğun Tasarımı (Design of the Protective Shell)

Otobüs durağının kabuğunun tasarımında Ankara için simgesel bir özellik taşıyan Güneş Kursu'ndan esinlenilmiştir. MÖ. 3000. yüzyılın ikinci yarısında Alacahöyük'ün "güneş taparlığı" egemenliğine tanıklık eden 35 Güneş Kursu bulunmaktadır [23,24]. Öne çıkan bazı Güneş Kursu örnekleri Şekil 3'de verilmiştir. Hitit öncesi döneminin yani Hatti döneminin bir eseri olduğu belirtilen Güneş Kursu, bir tanesi gümüşten diğerleri tunçtan yapılmış olup, günümüzden yaklaşık 4250 yıl önce dini merasimlerde kullanılmıştır. Güneş Kursunu oluşturan yuvarlağın, dünyayı ya da güneşi temsil ettiği düşünülmektedir. Altta, iki adet boynuz benzer çıkıntının ne olduğu ise kesin olarak henüz bilinmemektedir. Üzerinde yer alan çıkıntılar ise doğanın çoğalmasını, üremeyi temsil etmektedir. Kuşlar da aynı şekilde yine doğanın çoğalmasını, doğadaki özgürlüğü anlatmaktadır [25].



Şekil 3. Güneş Kursu örnekleri [26]

Şekil 3'de verilen ilk iki Güneş Kursu'nun (Şekil 3a, 3b) üzerindeki halkalar sallandığında tıpkı Mehter Takımındaki gibi huşu veren sesler çıkarmaktadır. Üç ve dördüncü Güneş Kurslarında (Şekil 3c, 3d) çift boğa boynuzu üzerinde türü pek belli olmayan hayvan heykelciğinin etrafını çevreleyen çelenkten ışınlar çıkmakta olup, genel görünüşü güneşi andırmaktadır. Güneş Kurslarının gümüş daire veya tunçtan daire, yarım daire veya baklava biçimli, çiçek tomurcuklarıyla oluşturulmuş, çoğu zaman da kafes delikli örnekleri bulunmaktadır. Aynı zamanda içlerinde ve kenarlarında tanrıları temsil ettiği düşünülen boğa ve geyik gibi hayvanlar yer almaktadır [23,24,26,27]. Ayrıca, Kurs'un ana gövdesini yerle buluşturan "H" formunda iki güçlü ayak motifi dikkati çekmektedir. Sonuçta, Güneş Kursları, Anadolu uygarlığının güçlü ve son derece etkileyici bir eseri olarak Eti firmasının, Ankara ve Hacettepe Üniversitelerinin kurumsal logolarına yansımış, Ankara'nın sembolü olmuştur.



Bugün pek çok tasarıma ve tasarımcıya esin kaynağı olan Güneş Kursları, Anadolu'nun zengin kültürünü günümüze yansıtır niteliktedir. Hemen her alanda karşılaşılan Güneş Kursu motifi bazen bilinçsizce yozlaştırılarak kullanılabilir. Tasarımcıların kültür ürünlerini geleceğe aktarırken orijinalini bozmadan stilize etmesi, tasarlaması ve yorumlaması gerekir. Bilimsel verilerden esinlenilerek hazırlanan eserler, kültürel mirasların güncellenerek toplumla paylaşılmasında önemli rol oynamaktadır [24]. Yukarıda tanıtılan Güneş Kurslarından alınan ilhamla tasarlanan otobüs durağının dijital görselleri Şekil 4'de verilmiştir.



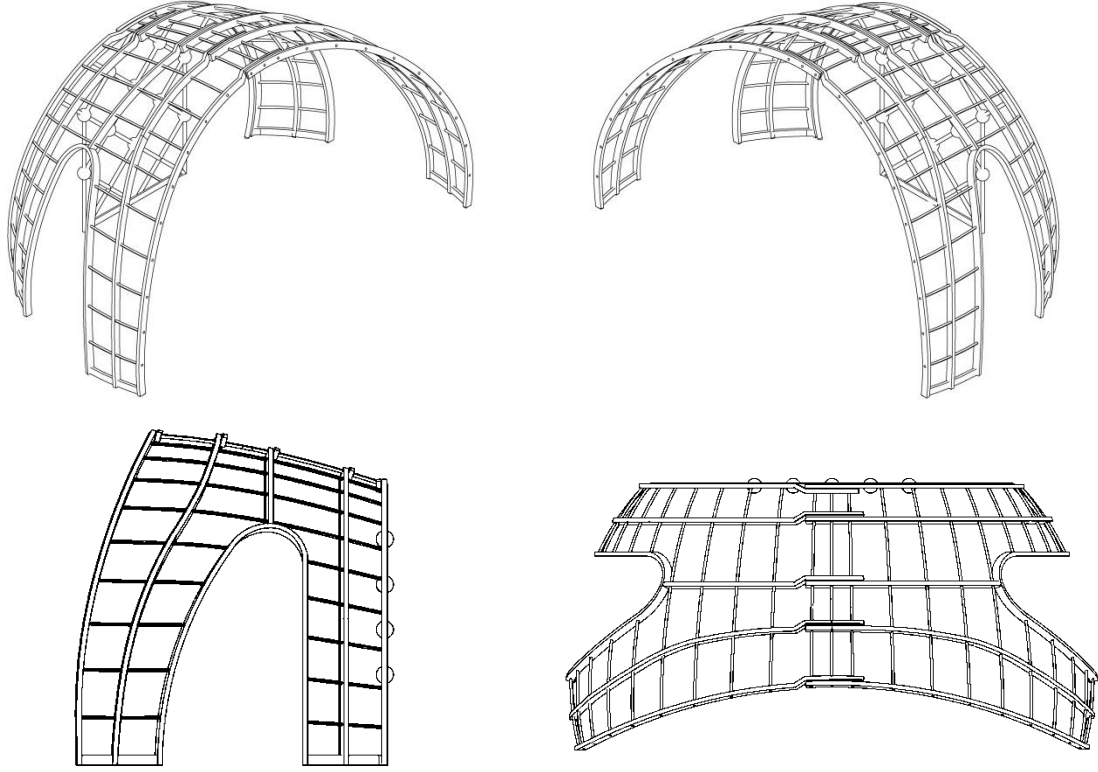
*Şekil 4. Ankara otobüs durağı tasarım önerisi*

Şekil 4'de verilen otobüs durağının ana formu güneşi, arka diyagonal çaprazlama yüzeyin sağ ve sol yanındaki kaçış açıklıkları kuşkanadını ve özgürlüğü, orta kısımdaki oturma elemanı kuşun yere basan her iki ayağını, arka diyagonal çaprazlama yüzey gövdesini ve baklava dilimli boşluklar ise kuşun göğsünü temsil etmektedir.

Otobüs durağını oluşturan koruyucu kafes; üretim yerinde montajlanan 3 ayrı parçadan oluşmakta olup, bu parçalar bir araya getirilip, kubbenin kavisine göre bükülmüş 30x70 mm kesitli dayanımı artırılmış çelik lamaya açılmış 20 mm çapındaki deliklere, yine çelik çubuklar geçirilerek başlarından somun ile sabitlenmektedir. Otobüs durağının arka kısmını oluşturan kemer boşluğunun dikeyde orta iç kısmına montajlanan arka diyagonal çelik çaprazlamalarla olası çekme ve basma yüklerine karşı kafese ilave mukavemet özelliği kazandırılmıştır. Her kafes parçasında kavis verilmiş 30x70 mm çelik lama ve 20 mm çapında çelik çubuk, iki adet kafes parçasını birleştirmek için 3 adet 20 mm çapında çelik çubuk kullanılmıştır (Şekil 5). Koruyucu çelik kafesi oluşturan düşey ve yatay elemanlar birbirine montajlandıktan sonra dışa doğru oluşabilecek deplasmanı önlemek için kubbenin yere basan ayaklarının geldiği alt kısımlarındaki 21 mm çapındaki delikler, zemine sabitlenen beton pabucun ortasındaki 20 mm çapında ve 50 mm boyundaki cıvatalara geçirilerek somun ile sabitlenmektedir.

Otobüs durağının kubbesini oluşturan formun taşıyıcı iskeletini oluşturmak için basma ve çekme yüklerine karşı çok yüksek performans özelliği gösteren ısıl işlemle dayanımı artırılmış ve yoğunluğu

yaklaşık 7,83 g/cm<sup>3</sup> çelik malzeme seçilmiştir. Ayrıca çeliğin korozyona karşı direncini artırmak için akrilik fırın boya işlemi yapılması önerilebilir.



**Şekil 5.** Isıl işleme dayanımı artırılmış çelik koruyucu kafes

Koruyucu kafesin iç ve dış yüzeyinin formuna göre şekillendirilip, istenilen renk ve desende hazırlanan karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozit (kftp) yüzey malzemesi kullanım yerinde kolaylıkla montajlanabilir. Böylece bu kompozit malzeme estetik görünüşü yanında çelik kafese yüksek mukavemet özelliği de kazandırmış olacaktır. Zaman içerisinde güneşin ve hava koşullarının bozucu etkileri sonucu eskiyen kompozit kaplama malzemeleri periyodik aralıklarla değiştirilebilir.

## 2.2. Otobüs Durağının Diğer Özellikleri (Other Features of Bus Station)

Sürdürülebilir bir kent anlayışıyla tasarlanan bu yeni nesil otobüs durağının üst kısmına yerleştirilen güneş panelleriyle enerji üretilecek ve depolanabilecektir. Bu solar enerjili otobüs durağının ürettiği enerjiyle, tasarruflu aydınlatma sistemine sahip gece aydınlatması yapılabilecek, ayrıca durakta bekleyen yolcuların telefon, tablet, engelli aracı gibi ekipmanları da şarj edilebilecektir. Akıllı durak yolcu bilgilendirme sistemiyle aşağıda ihtiyaç duyulan gereksinimler karşılanabilecektir.

- Toplu taşıma araçlarının duraklara giriş ve çıkış saatleri anlık olarak ekranlarda görülebilecektir.
- Sistem, coğrafi konum bilgilerini toplu taşıma araçlarında bulunan takip cihazlarıyla GPRS ile akıllı duraklara iletebilecek, duraktaki tahmini bekleme süresi yolculara bildirilebilecektir.
- Sistem, istenildiğinde yönetim konsol yazılımı üzerinden bilgilendirme ekranı olarak kullanılabilir. Bu sayede, bilgilendirme ekranından bulunduğu bölgede duyurulması istenilen mesajlar yayımlanabilecektir (Nöbetçi eczane, Başkandan mesajlar, v.b.).
- Güneş enerjisi ile çalışan akıllı durak sistemleri enerjisini, şebeke enerjisinden bağımsız olarak solar paneller ve tam bakımsız akülerden sağlayacaktır.
- Düşük enerjiyle çalışan LED teknolojili akıllı durak bilgilendirme ekranları kullanılacaktır.
- Sesli okuma özelliği sayesinde ekranda yayınlanan mesajları engelli vatandaşlar sesli olarak dinleyebileceklerdir.
- Yağmur, kar, güneş gibi etkilere ve olası trafik kazalarına karşı koruma sağlayacaktır.

### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, yolcuların hem otobüs duraklarında karşılaşılabileceği kazalara karşı korunması, hem de durakların kent kimliğinin bir parçası olması amacıyla, günümüzden binlerce yıl önce bu topraklarda yaşamış olan Hattilere ait çeşitli Güneş Kursu örneklerinden esinlenilerek Ankara ili için özgün bir otobüs durağı tasarımı önerisi geliştirilmiştir.

Binlerce yıl öncesinden günümüze gelebilmiş ve estetik değerinden hiçbir şey kaybetmemiş olan Güneş Kursları; üniversitelerin ve çeşitli kurumların logolarında, halı ve kilim desenlerinde, takılarda, anıtsal heykelerde ve pek çok başka tasarımlarda esin kaynağı olmuştur. Bu çalışmada da, Güneş kurslarının güzelliğini geleceğe taşımak için formun aynen alınıp kullanılması yerine, özünü bozmadan günümüzün beğenisine ve durağın özelliklerine göre çağdaş bir formda yeniden yorumlanılmasına çalışılmıştır.

Dünyada yapılan resmi açıklamalara göre, her yıl bir milyonun üzerinde insanın yaşamını yitirmesine neden olan trafik kazalarının, insanın temel yaşama hakkına müdahale ettiğini göstermektedir. Bu ağır tabloyu oluşturan kazalara karşı gerekli önlemler alınmadığı takdirde, ekonomik kayıplar bir yana, daha milyonlarca insanın hayatı ve yaşam kalitesi tehdit altında olmaya devam edecektir.

Yukarıda dile getirilen hususlar ışığında Ankara kenti için tasarlanan otobüs durağı; durakta bekleyen yolcuları yağmur, kar gibi doğal etkilere ve kabağın taşıyıcı iskeletinde kullanılan dayanımı artırılmış çelik lamalar ve karbon fiber takviyeli kompozit yüzey kaplama malzemesi sayesinde trafik kazalarına karşı koruyabileceği, aynı zamanda kentin tarihsel dokusuyla etkili bir bağ kurabileceği düşünülen özgün bir kent donatısı tasarımı önerisidir. Durağın üstüne yerleştirilen güneş panelleri sayesinde gece aydınlatması ve bilgilendirme ekranları için ihtiyaç duyulan enerji sağlanabilecek ve durakta bekleyen yolcuların telefon, tablet gibi ekipmanları da şarj edilebilecektir.

Bu alanda yapılan çalışmaların sınırlı düzeyde kalması, yapılan bu tasarım önerisinin literatüre ve bilime katkısının olabileceğini göstermektedir. Bu otobüs durağının isteğe göre üretim ve kullanım yerinde montajlanabilen çelik koruyucu kafesini oluşturan parçalar ve birleştirme çubukları ile zemine sabitleme elemanlarının ayrı ayrı paketlenerek şekilde tasarlanması, onun taşıma kolaylığını ve uygulanabilme özelliğini güçlendirmektedir. Açıklanan bu özellikleri itibarıyla, bu tasarım önerisinin prototipinin uygun bir otobüs durağı yerleşim alanında uygulanarak denenmesinde büyük yarar görülmektedir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Otobüs durağında kullanılacak malzemelerin belirlenmesi aşamasında zaman ayırarak verdiği değerli bilgiler için Prof.Dr. Mehmet ERDOĞAN'a çok teşekkür ederiz. Ankara otobüs durağının tasarımı Kemal Yıldırım, render ve görselleştirmeler Buğra Ergün tarafından yapılmıştır.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaypak, Ş. Antakya'nın Kent Kimliği Açısından İrdelenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(14): 373-393, (2010).
- [2] Özgeriş, M. Kentsel Donatı Elemanlarının Kent Dokusu Yönünden Değerlendirilmesi: Erzurum İli Örneği, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 18(561-574), (2018).
- [3] Prohansky, H.B., Abbe, K.F., Kaminof, R. Place Identity, Physical World Socialization of the Self, *Journal of Environmental Psychology*, 3(1):57-83, (1983).
- [4] Oğurlu, İ. Çevre- Kent İmajı - Kent Kimliği- Kent Kültürü Etkileşimlerine Bir Bakış. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(26), 275-293, (2014).
- [5] Lynch, K. (1960). *The Image of the City*, The M.I.T Press, Cambridge. Pages, 194 pp.
- [6] Öztürk, M.S. Türkoğlu, M.T. Anadolu Selçuklu Sanatı Geometrisinin Günümüz Kent Estetiği Bağlamında Uygulamalara Yansımaları (Konya İli Örneği), *İdil Dergisi*, 6(28), 61-67, (2016).

- [7] Özer, S., Aklıbaşında, M., Zengin, M. Erzurum Kenti Örneğinde Kullanılan Kuşatma Elemanlarının Kent İmajı Üzerindeki Etkileri. *Tekirdağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7(2), 123-130, (2010).
- [8] Bayrakçı, O. (1991). Kent Mobilyaları Tasarımında Kimlik Sorunu ve Kent Kimliği İçindeki Yeri. *Kamu Mekanları Tasarımı ve Kent Mobilyaları Sempozyumu*. Mimar Sinan Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, İstanbul, s.75-77.
- [9] Kuşkun P., Yılmaz H. Erzurum Kenti Bütününde Donatı Elemanlarının Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(4), 345-351, (2003).
- [10] Bulut, Y., Ö. Atabeyoğlu ve P. Yeşil. Erzurum Kent Merkezi Donatı Elemanlarının Ergonomik Özelliklerinin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 14(2), 131-138, (2008).
- [11] Kuşkun, P. (2002). *Erzurum Kent Bütününde Donatı Elemanlarının Kullanımı Üzerine Bir Araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 142.
- [12] Türk Standartları Enstitüsü, (1995). Standart No: TS 11783: Şehir içi yollar - otobüs durakları yer seçimi kuralları.
- [13] Türk Standartları Enstitüsü, (1997). Standart No: TS 12174: Şehir içi yolları - yaya yolu ve yaya bölgeleri tasarım kuralları.
- [14] Yılmaz, Ö., (2007). *İzmit Kent Merkezi Otobüs Durak Standartlarının İrdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 81.
- [15] Doğan, G. Özuysal, M. Toplu Ulaşımında Bekleme Süresini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Güvenilirlik, Yolcu Bilgilendirme Sistemi ve Fiziksel Koşullar, *İMO Teknik Dergi*, 7927-7954, Yazı 481, (2017).
- [16] Çakmak, S. Görme engeli olan bireyler için hazırlanan otobüse binme becerisi öğretim materyalinin etkililiği, *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 41, 94-111, (2011).
- [17] Yıldırım, K. Fotoğraf Albümü, Batıkent / Ankara, (2020).
- [18] Juhel, M.H., Dalkman, H., Adiazola-Steil, C. (2014). *Otobüs Öncelikli Sistemlerde Trafik Güvenliği*, EMBARQ, World Research Institute, İETT'nin katkılarıyla Türkçeye çevrilmiştir.
- [19] Hürriyet Gazetesi (2019). <http://www.hurriyet.com.tr/haberleri/otobus-duraginda-kaza> Erişim: 07.10.2019
- [20] Selahiye, A., Aydınoglu, M.N., Erdik, M., (1995). Süleymaniye Camii'nin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi, 3. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, Sayfa: 284-293, 27-31 Mart 1995.
- [21] Bilgin, H., (2005). Sinan Kubbeli Yapılarında Mekân Örtü Sistemlerinin Yapısal Davranışı, *Kocaeli Üniversitesi Deprem Sempozyumu*, Sayfa: 771-777, 23-25 Mart 2005.
- [22] Yeşilyurt, A., (2005). *Yapı Geometrisi İle Deprem Salınımı*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 104.
- [23] Gonnet-Bağana, Hatice (1967). *Arkeolojik Belgelere Göre Eti Güneş Kursları*. Ankara Üniversitesi, Dil Tarih-Coğrafya Fakültesi / Ankara Üniversitesi Basımevi, 161-166 (<http://dergiler.ankara.edu.tr/dergiler/14/701/8867.pdf>)
- [24] Güldür, G. (2016). Güneş Kursu'nun Işığında Yapılan Takılar, *Uluslararası Geçmişten Geleceğe Sanat Sempozyumu*, Hitit Üniversitesi, 26-28 Eylül 2016.

- [25] Ankara Üniversitesi (2019). <https://www.ankara.edu.tr/kurumsal/tanitim/gunes-kursu/> Erişim: 13.11.2019
- [26] İslamoğlu, H. (2018). Hititler, Hattiler ve Güneş Kursları, *Antik Tarih Dijital Dergi*, 10 Aralık 2018. <http://www.antiktarih.com/2018/12/10/hititler-hattiler-ve-gunes-kurslari/> Erişim: 13.11.2019
- [27] Akurgal, E. (2005). *Anadolu Kültür Tarihi*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 67.

## Concrete Production with Using Magnetized Water

Murat GÖKÇE<sup>1</sup>  Kenan TOKLU<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Amasya University, Architecture Faculty, Department of Architecture, AMASYA

<sup>2</sup> Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Çorlu/TEKİRDAĞ

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 16/03/2020

Revision 06/05/2020

Accepted: 08/05/2020

#### Highlights

- Magnetic pipe.
- Magnetizing mixing water
- Consistency, strength

#### Keywords

Magnetized Water  
Concrete  
Ready-Mixed Concrete  
Economic Efficiency

In this study, a specially designed magnetic pipe consisting of neodymium magnets, which creates a strong magnetic field, is used for the mixing water used in concrete production. The magnets used in the magnetic pipe are designed to create the most effective magnetic field and placed inside the pipe. The mixing water was exposed to the magnetic field for 15 minutes by passing through these magnetic pipes with the recirculation motor.



Figure A. Magnetic pipe used for magnetizing water

**Purpose:** In this study, the changes in the consistency and compressive strength of the concrete samples produced as a result of magnetizing the mixing water used in concrete, compared to conventional concrete, were investigated.

**Theory and Methods:** Density, slump and compressive strengths of concrete produced with magnetized water and produced with normal water at an equal consistency and equal w/c ratios were investigated.

**Results:** Equal w/c ratio; It has been observed that the use of magnetized water in concrete production increases the consistency of fresh concrete. In addition, no significant difference has been measured between the densities of the concretes. It has also been observed that, an increase for compressive strengths at early age of concretes produced with magnetized water, compared to reference concrete has been observed. In concretes prepared with equal consistency, the water requirement of the concrete prepared with magnetized water has decreased. Also, it has been observed that there is a high increase in compressive strength of concretes produced with magnetized water compared to concretes produced with normal water. For the densities, no significant difference has been measured.

**Conclusion:** As a result of using the magnetized water as mixing water in the production of concrete, improvements have occurred in the properties of the concrete.



## Manyetize Edilmiş Su Kullanılarak Beton Üretimi

Murat GÖKÇE<sup>1</sup> Kenan TOKLU<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Amasya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, AMASYA

<sup>2</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu/TEKİRDAĞ

### Öz

Dünyada ve özellikle gelişmiş ülkelerde beton, ekonomik olması, üretiminin kolaylığı, istenilen şeklin verilebilmesi ve özellikle dayanım ve durabilite gibi mühendislik üstünlükleri nedeniyle en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Sürekli artan beton üretimi neticesinde bu alanda yapılan bilimsel araştırmalarda hızlı bir ivme kazanmıştır. Bu çalışmada, manyetize edilmiş su ile üretilen beton ile normal karışım suyu ile üretilen geleneksel beton kıvam ve basınç dayanımı açısından karşılaştırılmıştır. Manyetize edilmiş su kullanılarak üretilen betonların su ihtiyacı azalmış ve su/çimento oranı azalması neticesinde basınç dayanımı artış göstermiştir. Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun manyetize edilerek kullanılması ile prefabrik ve hazır beton üreticilerine yeni bir bakış açısı kazandırılarak daha ekonomik ve kaliteli beton üretim olanağı sunulmuştur.

### Concrete Production with Using Magnetized Water

#### Abstract

In the world and especially in developed countries, concrete is the most preferred building material due to its economical efficiency, ease of production, giving the desired shape and especially its engineering advantages such as strength and durability. As a result of the constantly increasing concrete production, this field of scientific researches has gained a rapid acceleration. In this study, concrete sample produced with magnetized water is compared to conventional concrete produced with normal mixing in terms of consistency and compressive strength. The water requirement of concretes produced using magnetized water has decreased and the compressive strength has increased as a result of the decrease in water / cement ratio. With the use of the mixture water used in concrete production by magnetizing, prefabricated and ready-mixed concrete producers have been given a new perspective and provided more economical and quality concrete production opportunities.

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 16/03/2020*  
*Düzeltilme: 06/05/2020*  
*Kabul: 08/05/2020*

#### Anahtar Kelimeler

*Manyetize Su*  
*Beton*  
*Hazır Beton*  
*Ekonomik Verimlilik*

#### Keywords

*Magnetized Water*  
*Concrete*  
*Ready-Mixed Concrete*  
*Economic Efficiency*

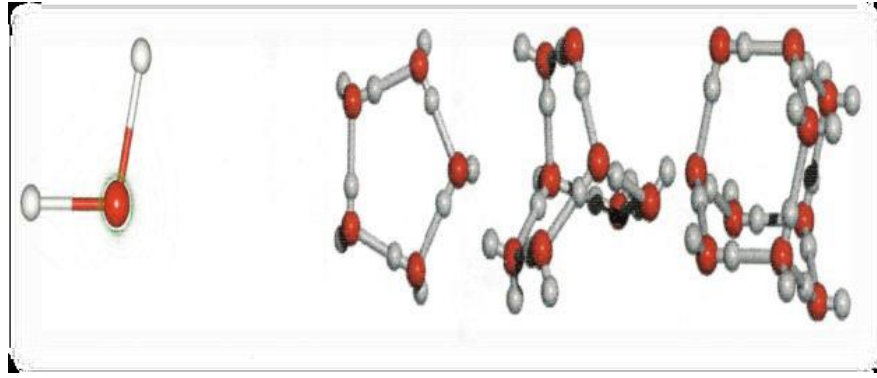
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde uygulanan bütün çimento esaslı karışımların hazırlanmasında geleneksel yöntemler ile bilindik karışım teknikleri kullanılmaktadır. Karıştırma işlemi sırasında çimento, agrega, su, mineral ve kimyasal katkılardan oluşan malzemeler karıştırıcının içerisinde yaklaşık 60-90 saniye karıştırılarak üretilmektedir. Çimentonun bağlayıcı özelliğini kazanması için gerekli su miktarı yaklaşık olarak kullanılan çimento ağırlığının %25-30' u kadardır. İlave edilen fazla su ise karışımların işlenebilmesi ve uygulanabilmesi içindir. Geleneksel karıştırma yöntemleriyle çimento tanelerinin tamamını su ile reaksiyona girememekte ve bir kısım çimento atıl olarak reaksiyona girmeden ortamda kalmaktadır. Bu durumun temel sebebi karışımdaki bütün girdilerin aynı zamanda karıştırıcının içerisinde karışmasıdır. Ayrıca kullanılan kimyasal katkıların bir kısmı da ince agregalar tarafından emildiğinden, karışımın kıvamı için gerekli su ihtiyacı artmaktadır.

Çimentodaki kimyasal reaksiyonları başlatmak için sınırlı miktarda suya ihtiyaç duyulurken, beton bileşiminde kullanılan su her zaman bundan çok daha fazladır [1, 2]. Dolayısıyla karışımdaki s/b oranı yükselmekte dayanım ve dayanıklılık azalmaktadır. Beton bileşenleri farklı oranlarda seçilerek farklı dayanımlara sahip çok çeşitli betonlar elde edilebilir. Bu anlamda suyun etkisi çok önemlidir. Bu nedenle,

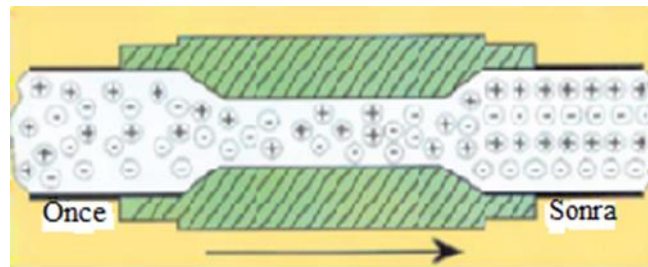
beton karışım tasarımı için en çok önerilen yöntemlerde beton karışımlarında kullanılan suyun, hidrasyonun doğası için büyük öneme ve hassasiyete sahip olduğunu belirtilmiştir [1].

Geleneksel yöntemle üretilmiş beton içerisinde bulunan su içeriği, betonun dayanımı gibi mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bununla birlikte, beton karıştırmada kullanılan su ile ilgili bilimsel çalışmalar az olmuştur [3]. Son zamanlarda manyetize su, sağlık, çevre, tarım, inşaat endüstrisi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [4]. Sert suyun etkisini azaltmak ve daha yumuşak su elde etmek için önerilen bir metot olarak manyetik su arıtımı karşımıza çıkmaktadır. Bu yumuşatma yoğunluğu, uygulanan manyetik alan kuvvetine dayanmaktadır [1]. Beton imalatında manyetik bir alanın uygulanması ile ilgili ilk akademik çalışma ve deneyler, 1962 yılında Rusya'da inşa edilen havaalanları ve iskeleler gibi askeri yapılar için kullanılmıştır [5]. Su, belirli bir mukavemete sahip manyetik bir alandan geçtikten sonra, manyetik alanla arıtılmış su veya manyetik su olarak adlandırılır. Eğer beton karışım suyu olarak manyetik su kullanılırsa, beton mukavemetinde % 10 iyileşme ve diğer özelliklerin iyileştirilmesine ek olarak çimento dozajından % 5 tasarruf sağlar. [4, 6]. Ayrıca Avustralya Akışkan Enerjisi [6], manyetik su molekül gruplarının, daha düşük konsolidasyon derecesine sahip sıradan su molekül gruplarından farklı olduğunu ve molekül hacminin daha homojen olduğunu belirtmektedir [7]. Beton üretiminde kullanılan içilebilir suyun yapısı Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Suyun yapısı [4]

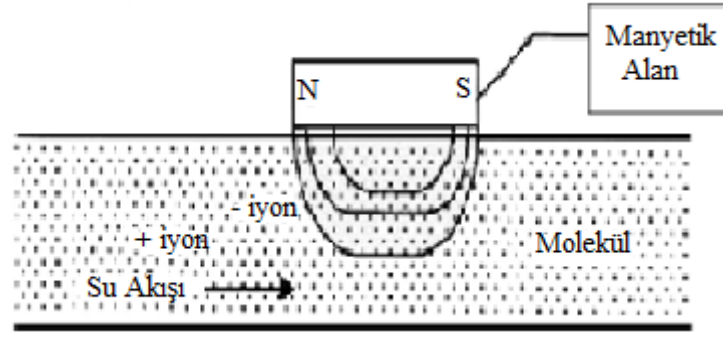
Suyun mıknatıslanması işlemi içilebilir suyun mekanik özelliklerini değiştirir. Şekil 2' de görüldüğü gibi, sadece yüklü parçacık hareketinin yörüngesini değiştirir, enerjisini değiştirmez [4,8].



Şekil 2. Mıknatıslama işlemine tabi tutulan suyun yük parçacıklarının öncesi ve sonrası hareketi [4]

Manyetik cihazlar, oluşturulan manyetik alandan geçen iyonlar ile su molekülü kümelerinde bazı değişiklikler ve etkiler oluşturan bir veya daha fazla sabit mıknatıslardan oluşmaktadır. Manyetik alan, su molekülü kümelerine önemli derecede etki etme yeteneğine sahiptir ve böyle bir kütle için 13 molekülden 5 veya 6 moleküle kadar azalmasına sebep olur (Şekil 3) [5]. Moleküllerin bu şekilde azalması, su moleküllerinin çimento hidrasyon reaksiyonuna daha fazla katılmasına neden olur [5,9-11]. İlâveten, su ve çimento birbiri ile karıştırıldığında, su molekülü kümeleri çimento taneciklerini çevreler [5].





**Şekil 3.** Sabit mıknatıslı bir manyetik cihazın manyetik alanından geçen iyonlar üzerindeki etkisi [5].

## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ (LITERATURE REVIEW)

Jain ve arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada, manyetize edilen suyun betonun özelliklerine etkisi incelemiştir. Bu çalışmada kullanılan suya 3 farklı manyetik kuvvet (0,8 Tesla, 0,9 Tesla ve 1 Tesla manyetik kuvvetler) uygulamışlardır. Farklı manyetik kuvvet etkisine maruz bırakılan su ile üretilen betonların su emme ve boşluk oranlarını test etmişlerdir. 0,8 Tesla ve 0,9 Tesla manyetik kuvvete maruz bırakılan sularla yapılan betonlarda su emme ve boşluk oranlarının normal su ile üretilen betonlara kıyasla arttığı fakat 1 Tesla manyetik kuvvet uygulanan su ile üretilen betonların boşluk oranları ve su emme değerlerinin normal suyla yapılmış betonlara göre daha azaldığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada özellikle farklı manyetik kuvvet uygulanarak suyu manyetize etme yaklaşımı, bu alanda yapılacak çalışmalar için yol göstermesi açısından olumlu olmuştur.

Reddy ve arkadaşları [13] yine manyetik su kullanılarak üretilen betonların özellikleri üzerinde yaptıkları çalışmada, betonda karışım suyu olarak manyetize su kullanılması ile taze betonun kıvamında ve işlenebilirliğinde artma olduğu, manyetize su ile üretilen betonlarda basınç dayanımında %55, eğilme mukavemetinde %25 artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Gholizadeh ve Arabshahi [1] yaptıkları araştırmada, manyetik suyun betonun basınç dayanım parametreleri üzerindeki etkileri incelemiştir. Bu çalışmada, manyetik su kullanılarak üretilen betonların, normal su ile üretilen betonlara kıyasla kıvamlarında 7 cm' lik çökme artışı, ve manyetik su ile üretilen betonların basınç dayanımlarında %23 artış tespit etmişlerdir. Özellikle betonun taze haldeki kıvam artışı ve işlenebilirliğinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Betonun kıvamındaki ve basınç dayanımındaki artışların diğer çalışmalarla benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bharath ve arkadaşları [14] manyetize su kullanılarak üretilen betonlara %10, 15, 20 ve 30 oranlarında çimento yerine bakır cürufu ikamesi yaparak üretilen betonun basınç dayanımlarını, eğilme dayanımlarını ve SEM analizlerini incelemiştir. Manyetize su kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımlarında %4-18 artış, eğilme dayanımlarında %5-10 artış, sertleşmiş betonların SEM cihazı ile yapılan analizlerde ise yüksek miktarda C-S-H tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada betonda kullanılan karışım suyunun manyetize edilerek kullanılması neticesinde manyetize edilmiş su ile üretilen beton numunelerin geleneksel betona göre kıvam ve basınç dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Genel olarak, beton karışımındaki malzemeler değiştirilmeden sadece su türünün (manyetize edilmiş su) değiştirilmesi sonucu üretilen betonlarda manyetize edilmiş su sayesinde s/b oranının azaltılıp, kaliteli ve düşük maliyetli betonların üretilme olanağı araştırılmıştır.

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

### 3.1. Materyal (Material)

#### 3.1.1.Çimento (Cement)

Çalışmada beton numunelerin üretilmesinde kullanılan bağlayıcı malzeme olarak yoğunluğu 3.1 g/cm<sup>3</sup> olan CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait özellikler Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çimentonun özellikleri

| Özellikler                  |      | Kimyasal<br>Kompozisyon        | Oran<br>(%) |
|-----------------------------|------|--------------------------------|-------------|
| Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 3680 | SiO <sub>2</sub>               | 19.82       |
| 2 gün dayanım (MPa)         | 23.7 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.69        |
| 7 gün dayanım (MPa)         | 38.5 | CaO                            | 64.29       |
| 28 gün dayanım (MPa)        | 53.9 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.95        |
| Priz Başlangıcı (dk)        | 185  | MgO                            | 1.57        |
| Priz Bitiş (dk)             | 275  | SO <sub>3</sub>                | 2.67        |
| Hacim Genleşmesi (mm)       | 1    | Cl <sup>-</sup>                | 0.01        |
| Çözünmeyen Kalıntı (%)      | 0.27 | Kızdırma<br>Kaybı              | 2.67        |

### 3.1.2. Agregaya (Aggregate)

Bu çalışmada beton üretiminde kullanılan agregaların maksimum tane çapı 22 mm olarak belirlenmiştir. Beton üretimi için 0-4 mm, 4-12 mm ve 12-22 mm tane boyutlarında kalker esaslı kırma taş agregası kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agregalara ait özellikler Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Agregaya ait fiziksel özellikler

| Agreganın fiziksel özellikleri |               |              |       |
|--------------------------------|---------------|--------------|-------|
| Agrega türü                    | İnce Agregaya | İri Agregaya |       |
| Elek Açıklığı (mm)             | 0-4           | 4-12         | 12-22 |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.60          | 2.63         | 2.65  |
| Su Emme Değeri (%)             | 1.5           | 0.75         | 0.25  |

### 3.1.3. Karışım suyu (Mixing water)

Şehir şebeke suyu karışım suyu olarak kullanılmıştır.

### 3.1.4. Kimyasal katkı (Chemical additive)

Beton üretiminde su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı TS EN 934-2 [15]’ ye uygun olarak kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan lignin esaslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkının fiziksel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Lignin esaslı kimyasal katkı özellikleri

| Özellikler                    | Lignin |
|-------------------------------|--------|
| pH                            | 7.5    |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.17   |
| Katı Madde (%)                | 32     |

## 3.2. Metot (Method)

Beton numuneler hazırlanırken bulamaç (çimento, su ve kimyasal katkı) 60 saniye karıştırılmıştır. Daha sonra agregalar ilave edilerek 60 saniye daha karıştırılarak beton numuneler üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan karışım oranları Tablo 4 (eşit s/ç oranı ile üretilen beton için) ve Tablo 5’ de (eşit kıvamda manyetize su ve normal su ile hazırlanan betonlar) verilmiştir. Yapılan testler ve yapılaş yöntemleri aşağıdaki maddelerde açıklanmıştır.

**Tablo 4.** Eşit s/ç oranı ile üretilen betonun karışım oranları

| Malzemeler     | Referans Beton (kg/m <sup>3</sup> ) | Manyetize su ile üretilen beton (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|-------------------------------------|--|
| Çimento        | 260                                 | 260  |
| Su             | 178                                 | 178  |
| 0-4 mm agrega  | 980                                 | 980  |
| 0-12 mm agrega | 385                                 | 385  |
| 0-22 mm agrega | 550                                 | 550  |
| Kimyasal Katkı | 2.6                                 | 2.6  |

**Tablo 5.** Eşit kıvamda manyetize su ve normal su ile hazırlanan betonun karışım oranları

| Malzemeler     | Referans Beton (kg/m <sup>3</sup> ) | Manyetize su ile üretilen beton (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|-------------------------------------|--|
| Çimento        | 260                                 | 260  |
| Su             | 178                                 | 164  |
| 0-4 mm agrega  | 980                                 | 980  |
| 0-12 mm agrega | 385                                 | 385  |
| 0-22 mm agrega | 550                                 | 550  |
| Kimyasal Katkı | 2.6                                 | 2.6  |

### 3.2.1. Suyun Manyetize edilmesi ( Magnetizing Water)

Beton üretiminde kullanılan karışım suyu için kuvvetli manyetik alan oluşturan neodyum mıknatıslardan oluşan ve özel olarak tasarlanan manyetik boru kullanılmıştır (Resim 1). Manyetik boruda kullanılan mıknatıslar en etkin manyetik alan oluşturacak şekilde tasarlanarak boru içine yerleştirilmiştir. Karışım suyu devir daim motoru ile iki farklı yere yerleştirilen bu manyetik boruların içerinden geçirilerek 15 dakika boyunca manyetik alana maruz bırakılmıştır. Bu sayede su moleküllerinin küme boyutlarındaki azalma su yüzeyinde meydana gelecek olan gerilimi azaltır ve böylece mineraller suda kalmaya devam ederek değişen fiziksel durum minerallerin sertlik göstermesini engeller ve sonuç olarak su yumuşar [16]. Manyetize edilen su daha sonra beton üretiminde kullanılmıştır.

**Şekil 4.** Suyun manyetize edilmesi için kullanılan manyetik boru

### 3.2.2. Testler (Experiments)

#### Taze beton yoğunluk testi

Taze haldeki betonun yoğunluk testi TS EN 12350-6 [17] standardına uygun olarak yapılmıştır.

$$D = m_2 - m_1 / V \quad (1)$$

Burada ;

D: Taze betonun yoğunluğu, kg/m<sup>3</sup>,

m<sub>1</sub>: Kabın kütlesi, kg,

m<sub>2</sub>: Kabın, içerisindeki beton numune ile birlikte toplam kütlesi, kg,

V: Kabın hacmi, m<sup>3</sup> dür.

#### Kıvam (Çökme) Testi

Bu çalışmada eşit s/ç oranıyla üretilen ve ayrıca eşit kıvama sahip olan iki farklı grup için çökme testi yapılmıştır. Bu testin amacı, manyetize edilmiş suyun normal suya göre taze betonun işlenebilirliği ve taze haldeki kıvamına etkisini belirlemektir. Çökme testi TS EN 12350-2 [18]' e uygun olarak yapılmıştır.

#### Basınç Dayanım Testi

Basınç dayanım testi için 150x150x150 mm küp numunelerden eşit s/ç oranı için 3 adet ve eşit kıvam değerine sahip beton numuneler için 3 adet olmak üzere her test günü için toplam 6 adet numune üretilmiştir. Basınç testine tabi tutulacak numuneler su küründe test gününe kadar (3,7 ve 28 gün boyunca) kür edilmişlerdir. Su kürü için ortam sıcaklığı 20°C sıcaklık olup numunelerin bütün yüzeyleri su içerisinde kalacak şekilde test gününe kadar kürde bekletilmişlerdir. Numunelerin basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 [19]' a uygun olarak yapılmıştır. Beton basınç testinde kullanılan makine 200 ton yükleme kapasiteli ve testte kullanılan yükleme hızı 2.4 KN/s' dir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

### 4.1. Eşit s/ç oranında manyetize ve normal su kullanılarak üretilen betonlar

Tablo 1 ' den görüldüğü üzere eşit s/ç oranında manyetize su kullanımının taze haldeki betonun kıvamını artırdığı görülmüştür. Betonların su miktarları aynı olmasına rağmen, karışımda kullanılan suyun manyetize edilmesi ile betonun kıvamının artırdığı saptanmıştır. Kıvam artışı ile betonun işlenebilirliği artmıştır. Bu artış yaklaşık olarak % 64 civarında meydana gelmiştir. Yapılan bir çalışmada [8] manyetize edilmiş su ile üretilen taze betonun işlenebilirliğinin normal su ile üretilen betona göre önemli ölçüde yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu anlamda bu çalışmanın kıvam açısından sonucu literatür ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca, betonların yoğunlukları arasında belirgin bir farklılık ölçülmemiştir (Tablo 1).

Manyetize edilmiş su ile üretilen betonlarda, referans betona göre erken yaşlarda basınç dayanımlarında artış meydana getirdiği Tablo 2'den görülmektedir. Referans betona göre manyetize edilmiş su ile üretilen betonların basınç dayanımlarındaki artış yüzde olarak sırasıyla 3. günde yaklaşık %6.45 ve 7. günde yaklaşık % 4.48 olarak bulunmuştur. Ayrıca, 28. gün sonunda, referans betona göre 3.5 MPa (yaklaşık %11 artış) basınç dayanımında artış gerçekleştiği de Tablo 2' de görülmektedir. Bu durum manyetize edilmiş suyun ıslatma derecesinin yüksek olması ve çimento tanecikleri ile hidrasyon derecesinin artması ile açıklanabilir. Yapılan başka bir çalışmada [5] ise bazı durumlarda manyetize su ile üretilmiş betonların normal su ile üretilmiş betonlara göre daha fazla basınç dayanımı verdiği belirtilmektedir. Bu çalışmada sonucunda da görüldüğü üzere basınç dayanımındaki artış genel anlamda literatüre benzerlik göstermektedir.

**Tablo 1.** Eşit s/ç oranında üretilen betonun kıvam (çökme) ve yoğunluk testi sonuçları

| Numune | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |                                 | Çökme Testi         |                                      |
|--------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
|        | Referans Beton                | Manyetize su ile üretilen beton | Referans beton (cm) | Manyetize su ile üretilen beton (cm) |
|        | 2372                          | 2385                            | 14                  | 23                                   |

**Tablo 2.** Eşit s/ç oranında üretilen betonun basınç dayanım testi sonuçları

| Basınç Dayanım Testi Sonuçları |                |                                 |
|--------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Numune                         | Referans Beton | Manyetize su ile üretilen beton |
| 3 gün (MPa)                    | 18.6           | 19.8                            |
| 7 gün (MPa)                    | 24.5           | 26.9                            |
| 28 gün (MPa)                   | 31.2           | 34.7                            |

#### 4.2. Eşit kıvamda manyetize ve normal su kullanılarak hazırlanan betonlar

Manyetize su ile hazırlanan betonun karışımdaki su ihtiyacı azalmıştır. Ayrıca betonların yoğunlukları arasında belirgin bir farklılık ölçülmemiştir (Tablo 3). Eşit kıvamda üretilen iki farklı su tipi kullanılarak üretilen betonların erken yaş dayanımları karşılaştırıldığında manyetize su ile üretilen betonların normal su ile üretilen betonlara göre basınç dayanımlarında yüksek bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu basınç artışları yüzde olarak sırasıyla 3. günde yaklaşık %44. 7. günde yaklaşık %31.43 olarak gerçekleşmiştir. Aynı kıvama sahip referans ve manyetize su ile hazırlanan betonların 28 günlük basınç dayanımları testleri sonucunda manyetize su ile hazırlanan betonun referans betona göre 9.6 MPa'lık (yaklaşık %30 artış) bir artış meydana getirdiği belirlenmiştir (Tablo 4). Bunun sebebi olarak manyetize edilmiş suyun beton karışımlarında s/ç oranını azaltması sonucunda basınç dayanımında önemli bir artış meydana getirdiği söylenebilir. Yapılan bir çalışmada [20] manyetize edilmiş su kullanılarak üretilen betonun normal su ile üretilmiş betona kıyasla su molekül yüzey alanını ve viskoziteyi arttırdığı belirtilmiştir. Bunun sonucunda da basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu artış literatüre benzerlik göstermektedir.

**Tablo 3.** Eşit kıvamda manyetize su ve normal su ile hazırlanan betonların yoğunluk ve kıvam (çökme) test sonuçları

| Numune | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |                                 | Çökme Testi         |                                      |
|--------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
|        | Referans Beton                | Manyetize su ile üretilen beton | Referans beton (cm) | Manyetize su ile üretilen beton (cm) |
|        | 2372                          | 2377                            | 14                  | 14                                   |

**Tablo 4.** Eşit kıvamda manyetize su ve normal su ile hazırlanan betonların basınç dayanımı

| Basınç Dayanım Testi Sonuçları |                |                                 |
|--------------------------------|----------------|---------------------------------|
| Numune                         | Referans Beton | Manyetize su ile üretilen beton |
| 3 gün (MPa)                    | 18.6           | 26.8                            |
| 7 gün (MPa)                    | 24.5           | 32.2                            |
| 28 gün (MPa)                   | 31.2           | 40.8                            |

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Beton üretiminde kullanılan manyetize edilmiş su, normal karışım suyu ile oluşturulan betonun karışım su miktarını %7.9 azaltmıştır.
- Eşit kıvam ile üretilen beton numunelerinde, manyetize edilmiş su ile üretilen betonun normal su ile üretilen betona göre 28 günlük basınç dayanımında 9.6 MPa (yaklaşık %30)'lık bir artış olmuştur.
- Eşit s/ç oranında, manyetize edilmiş su ile üretilen beton, normal su ile üretilen betondan 3.5 MPa'lık (%11) bir basınç dayanım artışı sağlamıştır. Bu durum manyetize suyun çimento ile daha çok hidratasyon sağladığı sonucu ile açıklanabilir. Bu sonuç literatür sonuçları ile benzerlik göstermektedir.
- Eşit s/ç oranı ile üretilen beton numunelerine işlenebilirlik açısından bakıldığında, manyetize edilmiş suyu ile üretilen betonun normal su ile üretilen betonla aynı miktarda su kullanılarak üretilmesine rağmen daha fazla çökme değeri vermiştir. Manyetize edilmiş su betonun akışkanlığını artırmıştır.
- Manyetize edilmiş su ile beton üretimi s/ç oranının azaltacağından, basınç dayanımını artacaktır. Bunun neticesinde beton üretiminde hedeflenen basınç dayanımı daha az çimento kullanılarak sağlanacak ve çimentonun çevresel etkileri de azalmış olacaktır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Gholizadeh M., Arabshahi H. The effect of magnetic water on strength parameters of concrete. *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(3), 77-81, (2011).
- [2] Furu T, Schercliff HR, Ashby MF. The interaction between the microstructural variables subgrain size and metals. *Materials Science Forum*, 43: 217-222, (2006).
- [3] Su N, Wu, YH., Mar CY. Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 599-605 (2000).
- [4] Karam H. and Al-Shamali O. Effect of Using Magnetized Water on Concrete Properties. *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, (2013). available at: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>
- [5] Afshin H, Gholizadeh M., Khorshidi N. Improving mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 17, 74–79, 2010.
- [6] Su N. and Wu CF. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash. *Cement and concrete composites*, 25(7), 681-688, (2003).
- [7] Stafford L. “The Mechanism of the Vortex Water Energy System”, Helping Agriculture & the Environment through the 21st Century, *Fluid Energy Australia*, (1996).
- [8] M Ahmed S. Effect of magnetic water on engineering properties of concrete. *AL-Rafdain Engineering Journal*, 17(1), 71-82, (2009).
- [9] Gabrielli C, Jaouhari R., Maurin G., and Keddam M. Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research*, 35(13), 3249-3259 (2001).
- [10] Kronenberg K. Experimental evidence for effects of magnetic fields on moving water. *IEEE Transactions on magnetics*, 21(5), 2059-2061, (1985).
- [11] Al-Qahtani H. Effect of magnetic treatment on Gulf seawater. *Desalination*, 107(1), 75-81, (1996).
- [12] Jain A, Laad A., Singh K., Murari K., and Student UG. Effect of magnetic water on properties of concrete. *International Journal of Engineering Science*, 11864, (2017).
- [13] Reddy BSK, Ghorpade VG., Rao HS. Effect of magnetic field exposure time on workability and compressive strength of magnetic water concrete. *International Journal of Advanced Engineering and Technology*, 120, 122, (2013).
- [14] Bharath S, Subraja S., ArunKumar P. Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(4), 2791-2795, (2016).
- [15] TS EN 934-2+A1. Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, (2013).
- [16] Manjupriya T, & Malathy R. Experimental investigation on strength and shrinkage properties of concrete mixed with magnetically treated water. *Magnesium*, 290, 195, (2016).
- [17] TS EN 12350-6. Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, (2019).
- [18] TS EN 12350-2. Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, (2019).

- [19] TS EN 12390-3. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, (2019).
- [20] Abdel-Magid, T. I. M., Hamdan, R. M., Abdelgader, A. A. B., & Omer, M. E. A. Effect of magnetized water on workability and compressive strength of concrete. *Procedia engineering*, 193, 494-500, (2017).



## Investigation of Thermal and Microstructural Properties of Al-4.5Cu/SiC Composite Produced by Mechanical Alloying Method

 Mustafa OKUMUŞ<sup>1,\*</sup>  Berna BÜLBÜL<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Batman University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, BATMAN

<sup>2</sup>Batman University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, BATMAN

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 15/03/2020

Revision 30/04/2020

Accepted: 08/05/2020

#### Highlights

- Powder Metallurgy.
- Metal matrix composites.
- Microstructure.

#### Keywords

Metal matrix composites

Mechanical alloying

Thermal properties

Microstructure

Microhardness

In this study, Al4.5Cu/SiC alloy matrixed composites are produced by mechanical alloying. The effect of the amount of reinforcement and milling time on the thermal and microstructural properties of the composites produced was investigated by differential thermal analysis (DTA), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Also, the microhardness of the pressed and sintered composites was investigated. As a result, the mechanical alloying process led to increased hardness in the microstructure by welding the matrix with homogeneously dispersed reinforcement.

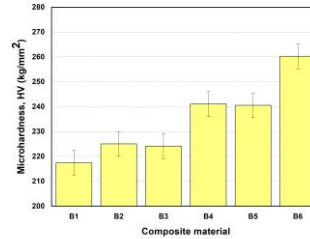


Figure A. Microhardness of Al4.5Cu/SiC composites

**Purpose:** In this study, it was aimed to design and produce high-quality Al-4.5Cu/SiC alloy-based composite to be used in many sectors, especially in the maritime, automotive, electrical, and aerospace industries, and to examine its properties.

**Theory and Methods:** Al4.5Cu/SiC alloy matrix composites, in which as reinforcement SiC is mixed into the Al4.5Cu alloy-matrix at a weight ratio of 10-20%, are produced by grinding for 5 and 10 hours with mechanical alloying method. In mechanical alloying processes, the ball-to-powder weight ratio is 10:1, and the rotation speed is set to 350 rpm. The composite samples pressed under 250 MPa were sintered in an argon-controlled atmosphere furnace at 700°C for 1 hour. Hardness measurements were carried out with a Shimadzu microhardness tester using a load of 100 g for 10 seconds. The microstructure properties of the produced powder composites were analyzed using XRD and SEM, and their thermal behavior was analyzed using DTA.

**Results:** It was observed that while the SiC ratio in the composite was low, solid solutions were formed, and as the SiC ratio increased, agglomerations occurred. Endothermic peaks indicating that Al<sub>2</sub>Cu, α-Al and SiC doped Al4.5Cu solid solution phases melted during continuous heating with DTA. As the SiC ratio and grinding time increased, it was observed that the composite had more homogeneous, irregularly shaped or spherical particles, and shrinkage in particle sizes. In addition, as the milling time and SiC ratio increased, it was found that the sample hardness increased due to the decrease in crystallite size and deformation hardening, and the maximum hardness value was approximately 260 HV.

**Conclusion:** The Al4.5Cu/SiC composites is successfully fabricated by mechanical alloying and sintering. During the production process, no undesirable intermetallic phase occurs in the composites. As the milling time increases, the increase in microhardness indicates an improvement in the mechanical properties of the composites.



## Mekanik Alaşım Metodu ile Üretilen Al-4.5Cu/SiC Kompozitin Termal ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Mustafa OKUMUŞ<sup>1,\*</sup> Berna BÜLBÜL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, BATMAN

<sup>2</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, BATMAN

### Öz

Bu çalışmada, farklı oranlarda SiC takviyeli Al4.5Cu alaşım matrisli kompozitler farklı öğütme sürelerinde mekanik alaşım yöntemiyle üretilmiştir. Katkı miktarının ve öğütme süresinin kompozitin termal ve yapısal özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapı özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile, termal davranışları ise diferansiyel termal analiz (DTA) ile araştırılmıştır. Üretilen toz kompozitler preslendikten sonra sinterleme işlemine de maruz bırakılmıştır. Sinterlenen numunelerin yüzey analizleri optik mikroskop ile incelenmiştir ve ayrıca yüzey sertlikleri de ölçülmüştür. XRD ve SEM sonuçları öğütme süresi arttıkça tane boyutunda küçülme ve daha homojen bir yapı oluştuğunu göstermiştir. DTA sonuçlarına göre sürekli ısıtma esnasında 550-650 °C sıcaklık aralığında faz dönüşümünü işaret eden bir dizi endotermik pik gözlenmiştir. Optik mikroskop sonuçlarının SEM analizleri ile uyum içinde olduğu ve ayrıca yüzey sertliğinin katkı miktarı ve öğütme süresi arttıkça arttığı görülmüştür.

### Investigation of Thermal and Microstructural Properties of Al-4.5Cu/SiC Composite Produced by Mechanical Alloying Method

#### Abstract

In this study, different ratios of SiC reinforced Al4.5Cu alloy matrix composites were produced by mechanical alloying method at different grinding times. The effect of reinforcement amount and grinding time on thermal and structural properties of the composite was investigated. The microstructure properties of the composites were investigated by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), and their thermal behavior was investigated by differential thermal analysis (DTA). The produced powder composites were subjected to sintering process after pressing. Surface analyzes of the sintered samples were examined by optical microscope, and surface hardness was also measured. XRD and SEM results showed that as the grinding time increased, the grain size decreased and a more homogeneous structure was formed. According to DTA results, a series of endothermic peaks indicating phase transformation were observed in the temperature range 550-650°C during continuous heating. The results of the optical microscope were found to be in agreement with the SEM analysis, and also the surface hardness increased as the amount of reinforcement and grinding time increased.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 15/03/2020  
Düzeltilme: 30/04/2020  
Kabul: 08/05/2020

#### Anahtar Kelimeler

Metal matrisli kompozitler  
Mekanik alaşım  
Termal özellikler  
Mikroyapı  
Mikrosertlik

#### Keywords

Metal Matrix Composites  
Mechanical Alloying  
Thermal Properties  
Microstructure  
Microhardness

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üstün mekanik ve tribolojik özellikler [1] gösteren metal matrisli kompozitler (MMK'ler), özellikle yüksek sıcaklıklarda iyi dayanım, iyi yapısal sertlik, boyutsal stabilite ve hafiflik gerektiren uygulamalar için uygun olduklarından tasarımcıların ilgisini çekmeye devam etmektedirler. Yüksek performanslı metal matrisli kompozitler ve alaşımlar elde etmek için bilyalı değirmende öğütme [2, 3], direkt eriyik oksidasyonu [4], sıcak daldırma [5, 6], karıştırma döküm [7] ve infiltrasyon döküm [8] gibi yöntemleri kullanmak mümkündür. MMK çeşitleri arasında yer alan alüminyum esaslı MMK malzemeler, düşük ağırlık ve yüksek performans gibi üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Ticari olarak alüminyum esaslı kompozitler, otomotiv, havacılık, uzay ve yapısal uygulamalar gibi birçok sektörde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Özellikle sert takviye malzemeleri içeren Al-alaşım matrisli kompozitler, baz alaşımlar üzerindeki fiziksel,

mekanik ve tribolojik özelliklerin mükemmel birleşimi nedeniyle büyük endüstriyel önem kazanmaktadır. Bu tür kompozitler, yüksek aşınma ve korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek spesifik dayanım ve sertlik, kontrollü termal genleşme katsayısı ve yüksek sönümlenme kapasitesi gösterirler [9]. Bu özelliklerden dolayı Al-alaşım matrisli kompozitler, ağırlık tasarrufunun yanı sıra aşınma, yıpranma ve kırılmaların ana sorun olduğu otomobil ve mühendislik bileşenlerinde kullanılmaktadırlar [10]. MMK malzemelerde kullanılan takviye malzemesinin yapısı oldukça önemlidir. Takviye malzemeler arasında partikül tipi takviyelerin diğer takviye tiplerine göre bazı önemli avantajları vardır. Yapılan çalışmalar [11-14] incelendiğinde, partikül takviyeli malzemelerin üretim prosedürlerinin daha basit ve nispeten daha ucuz olduğu, takviyenin maliyetinin nispeten düşük ve kompozit malzeme için özelliklerinin izotropik olduğu görülmektedir. Ayrıca, bir metal matris içine katılan seramik parçacıkları, kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmesinin yanında korozyon önleyici davranışını da büyük ölçüde artırabilir [15, 16]. En yaygın partikül takviyesi türleri oksitler ( $Al_2O_3$ ), karbürler (SiC, TiC, WC) ve borürlerdir ( $TiB_2$ ) [16-20]. Literatür taraması [17-26] yapıldığında, çoğu makalenin hafif metal matrisli kompozitler üzerine olduğu görülmektedir. Bu çalışmalara göre; alüminyum ve alaşımlarının düşük yoğunlukları, çökme ile sertleştirme yeteneği, iyi korozyon direnci, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ve yüksek sönümlenme kapasitesi nedeniyle parçacık takviyeli MMK'ler için en popüler matris malzemesi olduğu söylenebilir. Genel olarak, araştırmacılar seramik takviyelerin kimyasal yapısının ve matrisin kimyasal bileşiminin mikroyapı üzerindeki etkisini ve bu kompozitlerin özelliklerini araştırmışlardır. Özellikle SiC parçacıkları ile güçlendirilmiş Al-bazlı metal matrisli kompozitler üzerine yapılan bazı çalışmalar [11-14, 16-19, 21, 22, 24-29] dikkat çekmektedir. SiC takviye malzemesinin yüksek sertlik ve iyi aşınma direnci, yüksek dayanım, iyi termal özellikler, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci ve çok cazip bir maliyete sahip olduğu bilinmektedir [15, 24].

Literatür araştırmalarına göre, Al-bazlı MMK'ler üzerine oldukça fazla çalışmalar bulunmakta fakat Al-alaşım bazlı MMK'ler üzerine çalışmalar oldukça sınırlıdır. Sanayinin birçok alanında Al-bazlı alaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, gelişen teknolojiye paralel olarak endüstriyel alanda özel uygulamalar için yeni malzeme türlerinin üretilmesine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmakta ve yapısal olarak çoğu basit malzeme artan bu gereksinimleri karşılayamamaktadır [30, 31]. Bundan dolayı bu çalışmada denizcilik, otomotiv teknoloji, elektrik ve uzay-uçak endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmak üzere üstün özellikli Al-alaşım bazlı kompozit malzemeler tasarlayıp üretmek ve özelliklerini incelemek amaçlanmıştır. Rakiplerine göre üstün özellikler sergileyeceği öngörülen malzeme, ağırlıkça %4,5 Cu içerikli Al alaşımına SiC partikülleri katılarak mekanik alaşımlama (MA) [32] tekniği ile toz halinde üretilmiştir. Üretilen Al4.5Cu/SiC kompozitlerin mikroyapı ve termal özellikleri XRD, SEM ve DTA cihazları ile incelenmiştir. Ayrıca, preslenen numunelerin yüzey özellikleri ve mikrosertlik değerleri de araştırılmıştır.

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

Bu çalışmada, Al4.5Cu alaşım matrisine takviye elemanı olarak SiC ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranlarında karıştırılarak Al4.5Cu/SiC alaşım matrisli kompozitleri mekanik alaşımlama tekniği ile 5 ve 10 saat öğütme sonucunda üretilmiştir. Alüminyum (Al), Bakır (Cu) ve SiC tozları ticari olarak temin edilmiştir. Satın alınan tozların bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Toz malzemeler istenilen oranlarda hassas terazide ve argon gazı atmosferinde tartılarak 250 ml'lik paslanmaz çelik havan içerisine bilyelerle birlikte konulmuştur. Toz numuneler XQM-2 marka yüksek enerjili bilyeli değirmen ile mekaniksel öğütme işlemine maruz bırakılmıştır. Öğütme işlemlerinde bilye-toz oranı 10:1 ve dönüş hızı 350 rpm (devir/dakika) olarak ayarlanmıştır. Numunelerin aşırı ısıya maruz kalmaması için cihaz 20 dakika çalıştırılıp 20 dakika bekletilmiştir. Üretim parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. 5 ve 10 saat öğütme ile üretilen kompozit tozlarının bir kısmı tek taraflı hidrolik preste 250 MPa basınçta preslenmiştir. Preslenen numuneler 700 oC de 1 saat süreyle sinterlenmiştir. Numuneler mikroyapı görüntüleri için zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş, %20 HF-%30 HNO3-%50 saf su çözeltisi ile dağlanarak yüzeylerin optik mikroskopta fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca bu numunelerin sertlik ölçümleri Shimadzu Model mikrosertlik cihazında 10 saniye süresince ve 100 g yük kullanılarak yapılmıştır. Her bir numune için mikrosertlik değeri numune yüzeyinde farklı bölgelerden alınan ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak bulunmuştur.

**Tablo 1.** Deney çalışmasında kullanılan tozların özellikleri

| Malzeme         | Ağırlıkça Safılık Derecesi (%) | Toz Boyutu (mesh) | Ergime Sıcaklığı (°C) | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | Atom Kütlesi (g/mol) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|
| Alüminyum       | 99,8                           | -325              | 660.4                 | 2.7                                | 26,98                |
| Bakır           | 99,9                           | -325              | 1085                  | 8.93                               | 63.546               |
| Silisyum karbür | 99,5                           | -325              | 2730                  | 2.21                               | 40.11                |

**Tablo 2.** Üretilen kompozit malzeme ve üretim parametreleri

| Numune Kod No | Öğütme Süresi (saat) | Katkı Miktarı (% ağı.) |
|---------------|----------------------|------------------------|
| B1            | 5                    | 10                     |
| B2            | 10                   | 10                     |
| B3            | 5                    | 15                     |
| B4            | 10                   | 15                     |
| B5            | 5                    | 20                     |
| B6            | 10                   | 20                     |

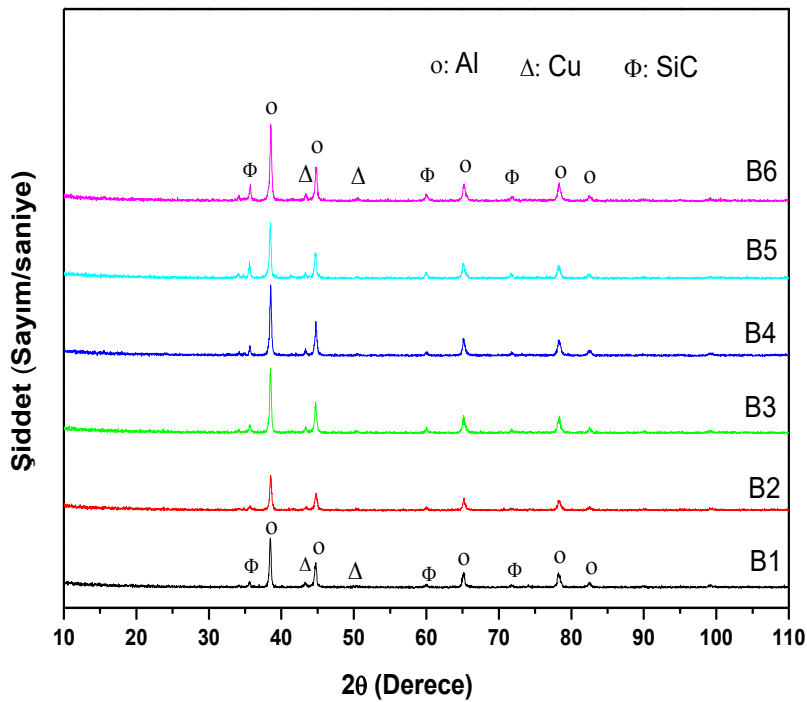
Mekanik alaşımlama metodu ile üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit tozlarının faz analizi için XRD çalışmaları, Cu-K<sub>α</sub> radyasyonu ( $\lambda=0,154056$  nm) kullanan Philips X'Pert PRO model XRD cihazı ile 30mA akımda 40kV gerilimi altında  $2\theta = 10-110^\circ$  açı aralığında,  $0,02^\circ$  adımda ve  $0,05$  ( $2\theta/s$ ) hızında ölçümler alınarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit numunelerinin ısıl özellikleri, yaklaşık 25-45 mg ağırlığında alınarak platin kap içerisinde  $20$  °C/min ısıtma oranında,  $50-950$  °C sıcaklık aralığında sürekli devam eden azot atmosferi altında SII 6300 EXSTAR Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı ile araştırılmıştır. Üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit toz numunelerin mikroyapı çalışmaları ise ZEISS/EVO LS10 markalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ile yapılmıştır. Deneysel sonuçların tüm numunelerde her bir koşul için (örneğin B1 koşulu) 3 tekrardan sonra aynı sonuçları içerdiği görülmüştür.

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

#### 3.1. XRD çalışmaları (XRD studies)

Mekanik alaşımlama tekniği ile üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC alaşım matrisli kompozit tozlarının mikroyapılarını araştırmak yani kristallografik özelliklerini ve içerdikleri fazları belirlemek için XRD çalışmaları yapıldı. XRD tarama sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi mekanik alaşımlanmış Al-alaşım matrisli SiC partikül takviyeli kompozitlerin XRD sonuçlarında; Al, Cu ve SiC fazlarını işaret eden pikler mevcut olup, bunların dışında herhangi bir mikroyapı bileşenine ait intermetalik faz piki tespit edilmemiştir. Bunun nedeni, bu mikroyapı bileşenlerinin yapı içerisindeki hacim oranının düşük olması olabilir. Yapıdaki oranı %5'in altında olan bileşenlerin XRD analiziyle belirlenemediği bilinmektedir [33]. Aynı zamanda üretim aşamasında reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi gibi parametrelerinin dikkatli kontrolü ve tozların mekanik alaşımlama yöntemi ile düzenli olarak karıştırılmasıyla da intermetalik fazlar oluşmamıştır. Burada öğütme süresi arttırılırsa alaşımlama sonucu yeni intermetalik fazların oluşacağı önceki çalışmalardan [34] bilinmektedir. Yeni intermetalik fazların oluşmaması için yüksek öğütme sürelerinde çalışılmamıştır. Mandal ve ark. [35] tarafından yapılan benzer bir çalışmada Al-4Cu alaşımı içerisinde belirli

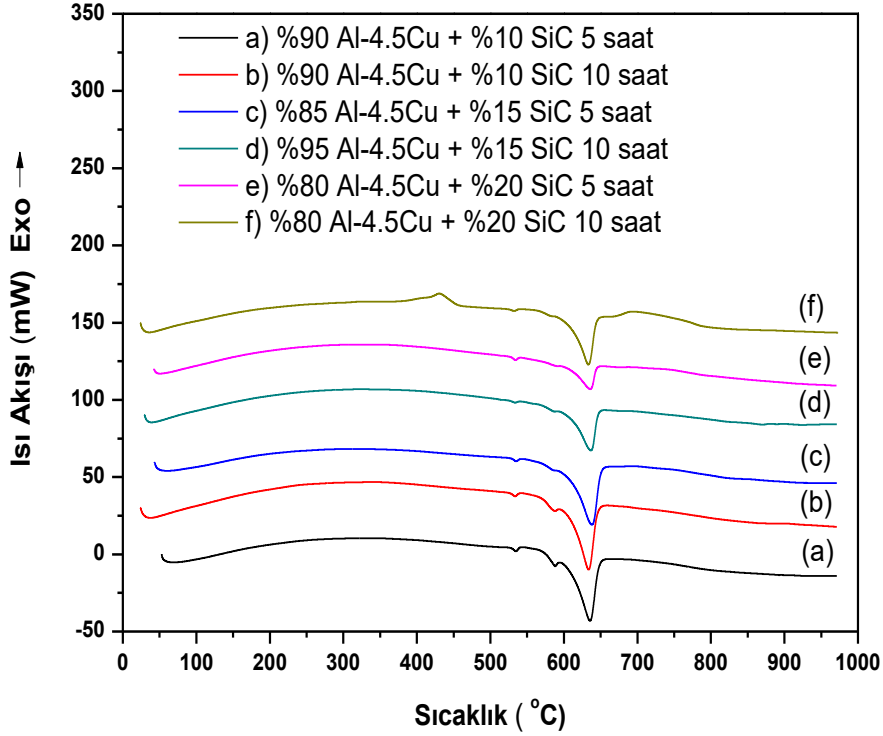
oranlarda  $TiB_2$  partikülleri karıştırılmış ve karışımın XRD sonuçlarında  $Al_3Ti$  gibi intermetalik fazlar tespit edilememiştir. Bu çalışmada üretilen numune yapılarında farklı bir intermetalik faz olmaması istenilen kompozit malzemenin doğru olarak üretildiğini göstermektedir. XRD sonuçlarında pik şiddetlerine bakılınca takviye oranı arttıkça SiC pik yükseklikleri de benzer çalışmalarda [35] olduğu gibi artmıştır. Bu sonuç malzeme içerisinde SiC oranının düşük olduğunda  $Al_{14.5}Cu$  alaşımı içerisinde katı çözeltili oluşturduğunu ve kompozit içerisinde SiC oranı azaldıkça kümelenmelerin oluştuğunu, dolayısıyla tane sınırı boylarının ve kristalit boyutunun arttığını işaret etmektedir. Burada takviye oranı sabit tutulup öğütme süresi arttırılrsa idi kırılma, yassılaşıma ve soğuk kaynaklanma mekanizmalarından dolayı kristalit boyutu benzer çalışmalarda [34, 36] olduğu gibi küçülebilirdi. Kristalit boyutunun öğütme süresi ile değişimi ve bu değişimin kompozitin mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması farklı bir çalışmanın konusu olabilir.



Şekil 1.  $Al_{4.5}Cu/SiC$  kompozit malzemelerin XRD analiz sonuçları

### 3.2. DTA çalışmaları (DTA studies)

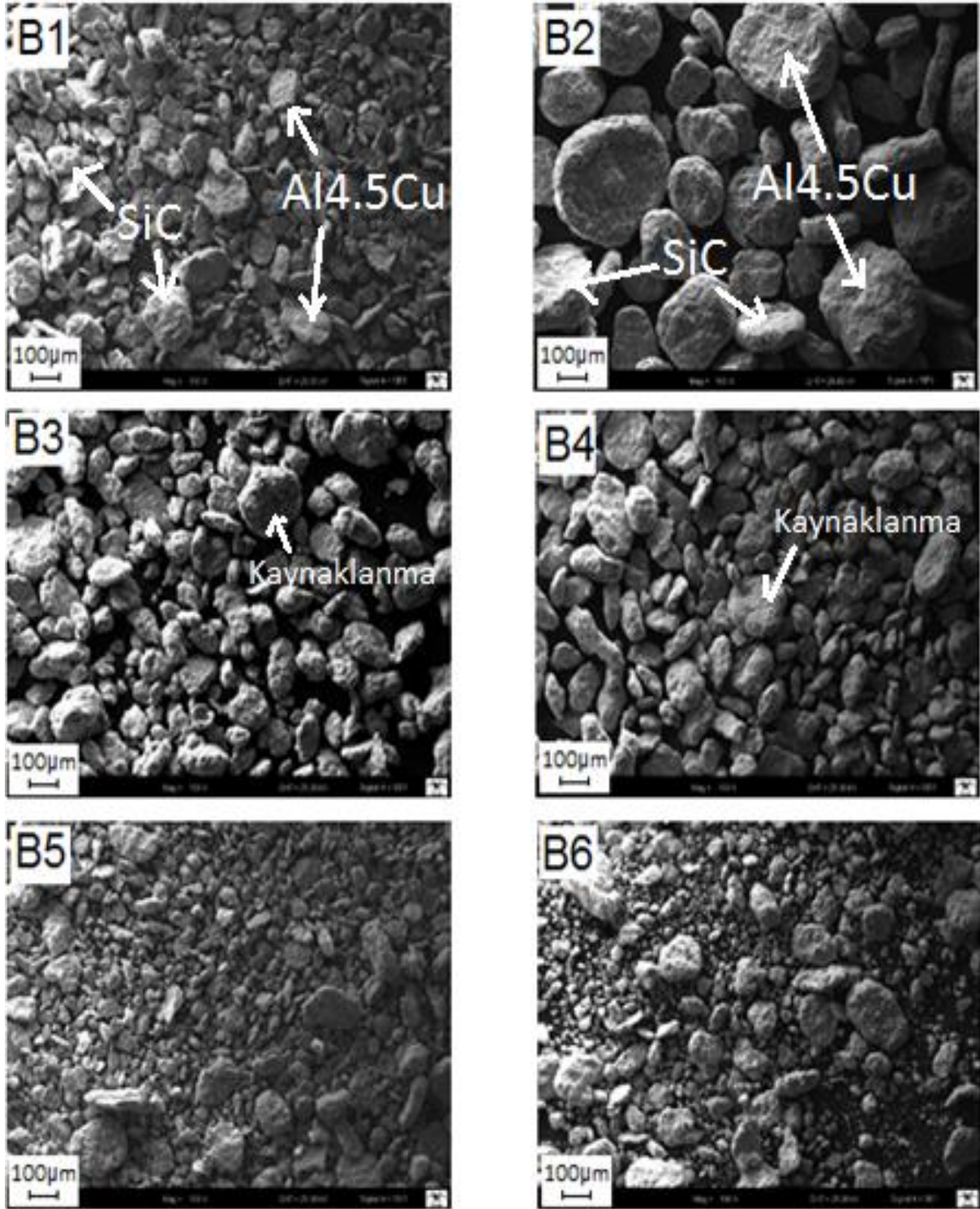
Üretilen kompozit malzemelerin ısısal özelliklerini tespit etmek amacıyla DTA çalışmaları yapılmıştır ve sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde 500-650 °C sıcaklık aralığında bir dizi endotermik piklerin mevcut olduğu görülmektedir. 547 °C civarında görülen küçük şiddetli pikler  $Al_{14.5}Cu$  alaşımı içerisinde çok az miktarda bulunan  $Al_2Cu$  [37] intermetalik fazının eridiğini göstermektedir. Burada  $Al_2Cu$  fazı malzeme içerisinde çok az miktarda olduğundan XRD analizlerinde tespit edilemediği düşünülmektedir. 550-600 °C sıcaklık aralığında görülen düşük şiddetli pikler tane sınırlarında ve porozite bölgesinde sıkışan fazla  $\alpha-Al$  fazının erimeye başladığını göstermektedir. 640 °C sıcaklık civarında görülen endotermik pikler ise malzeme içerisinde SiC fazları bulunan  $Al_{14.5}Cu$  katı çözeltili fazlarının eridiğini ve sonrasında uniform bir yapı oluştuğunu göstermektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi sadece %20 SiC katkılı kompozitlerde 400-450 °C sıcaklık aralığında bir ekzotermik pik gözlenmiştir. Bu pikin malzeme içerisinde oluşan oksitlenme reaksiyonundan kaynaklanan yarıkararlı nanokristal fazın kristallenmesini işaret ettiği düşünülmektedir. Bu çalışmaya benzer bir çalışma Luangvaranunt ve ark. [38] tarafından  $Al-4Cu$  alaşımına hacimce %15 Silika katkılandırma ile üretilen kompozit üzerine yapılmış ve sonuçlarının bu çalışma ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit malzemelerin DTA analiz sonuçları

### 3.3. SEM çalışmaları (SEM studies)

Mekanik alaşımlama ile üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit tozlarının mikroyapılarındaki morfolojik değişimleri incelemek için SEM çalışmaları yapılmıştır. Kompozit tozlarının SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, kompozit içerisindeki fazların düzensiz şekilli olduğu, mekanik alaşımlamanın etkisiyle faz tanelerin farklı şekil ve boyutlara sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bazı bölgelerde ise birbirine kaynaklanmış tozlardan oluşan iri partiküller bulunmaktadır. Bu tozlar mekanik alaşımlama sırasında çarpışan bilyelerin arasında defalarca kaldığından yüksek enerji kazanmış ve soğuk kaynaklanmalar sonucu yaklaşık küresel bir yapı oluşturmuşlardır. Bir malzeme içerisinde metalik veya intermetalik fazların oluşumu, partikül boyutu ve faz miktarı MA süresine, takviye miktarına (% ağırlık), sinter sıcaklığı ve sinter süresine bağlıdır. B1-B3-B5 ile B2-B4-B6 görüntülerinde MA süresi, sinter sıcaklığı ve sinter süresi sabit tutulup takviye oranı değiştirilmiştir. Takviye oranı artışının tane boyutunu düşürdüğü görülmüştür. B1-B2 görüntülerine göre mekanik alaşımlama süresinin artması ile partikül boyutunun arttığı görülmektedir. Burada SiC oranının düşük olmasından dolayı SiC katkılı Al<sub>4.5</sub>Cu katı çözelti fazı oluşmuştur. B3-B4 ve B5-B6 görüntülerinde ise mekanik alaşımlama süresi arttıkça partikül boyutlarında bir azalma söz konusudur. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile partiküller yavaş yavaş homojen ve daha yumuşak kenarlı küresel yapıya ulaşmaya başlamıştır. Bunun yanında yapıda aglomerasyonlar sonucu oluşmuş büyük boyutlu partiküller de görülmektedir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça partiküllerin morfolojisi değişmiş ve pekiştirici faz ile ana fazın birbirine karışması ve homojen yapının elde edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca matris fazı ile pekiştirici faz arasında homojen ve boşluksuz olarak kaynaklanmış fazların oluştuğu da görülmektedir.

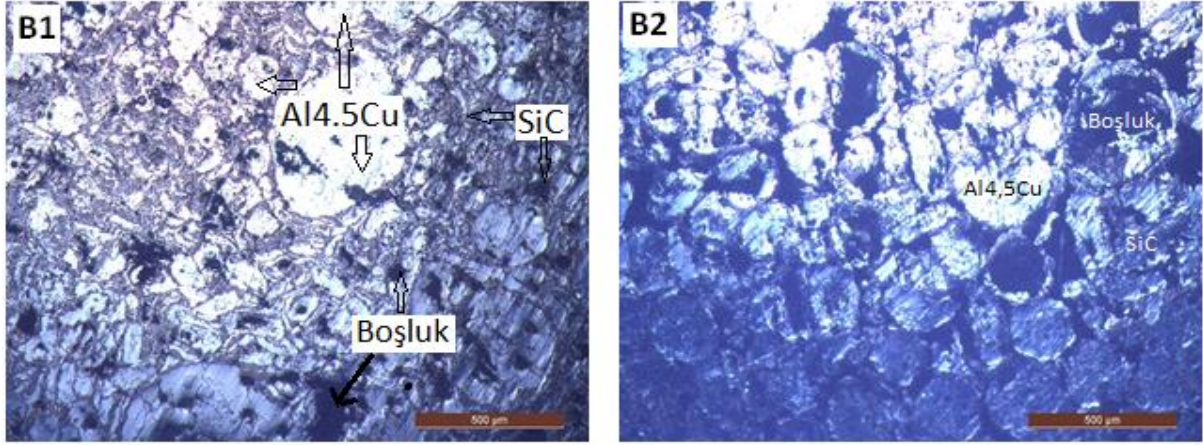


Şekil 3. Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit toz malzemelerin SEM fotoğraflar

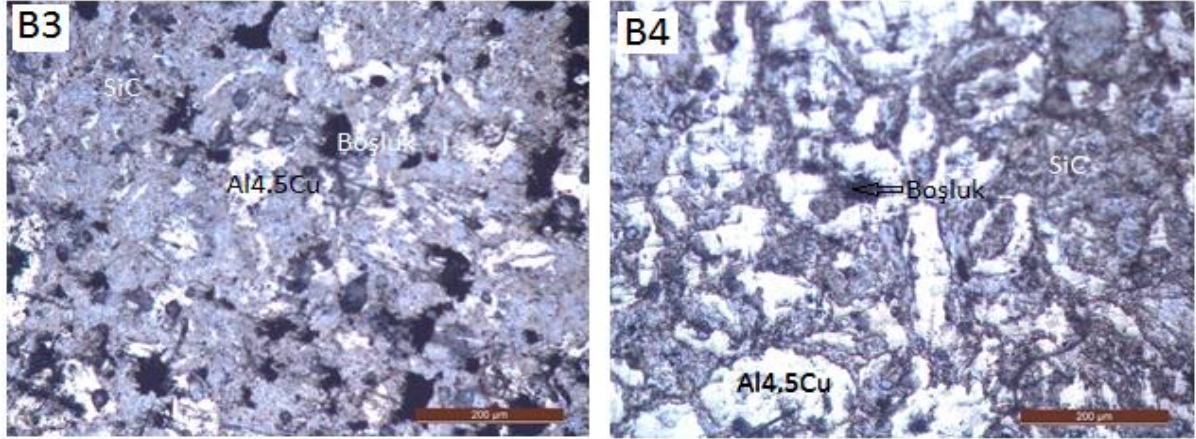
### 3.4. Optik mikroskop çalışmaları (Optical microscopy studies)

Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen Al<sub>4.5</sub>Cu/SiC kompozit tozlarının preslenmesi ve sinterlenmesi sonucu oluşturulan katı numunelerin yüzey özellikleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Numunelerin yüzeyleri parlatma ve dağlama işlemine tabi tutulduktan sonra yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 4-6'da üretilen kompozit numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde kompozit içerisinde takviye malzemesi olan SiC gri, matris malzemesi Al<sub>4.5</sub>Cu beyaz ve boşluklar (porozite) siyah renkte görülmektedir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, öğütme süresi 5 saat olan numunelerde

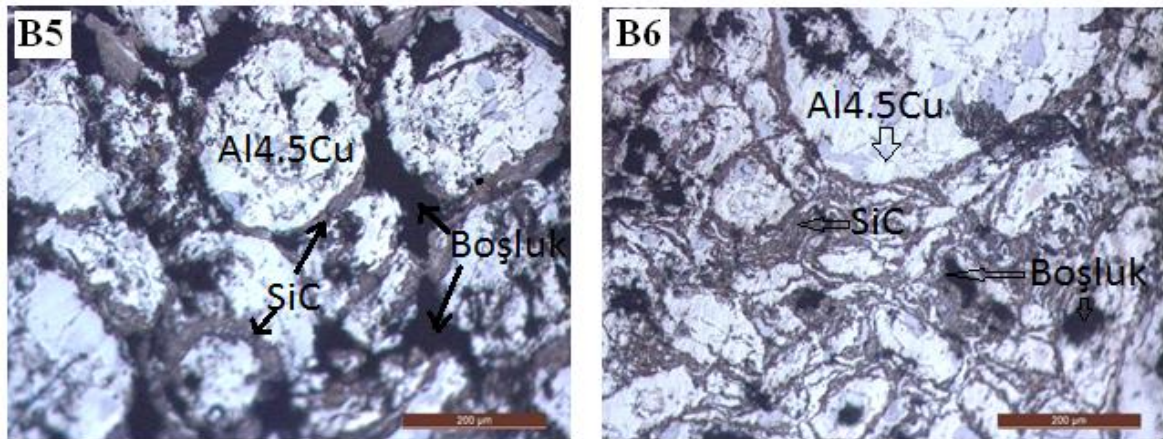
tamamen homojen bir yapı oluşmamıştır. Matris malzemesi içerisinde SiC partiküllerinin homojen bir şekilde dağılmasından dolayı poroziteler ve tane sınırlarındaki boşluk kusurları oluşmuştur. Bu sonuçlar bu numuneler için kusursuz bir yapı oluşması için presleme basıncı ve öğütme süresinin artırılması gerektiğini göstermektedir. Öğütme süresi 10 saate çıkarılan kompozisyonlarda SiC partiküllerinin daha homojen bir dağılım gösterdiği, porozite sayısında düşüş gerçekleştiği ve alaşım içerisine iyice gömülen SiC katkı Al<sub>4.5</sub>Cu partiküllerinin tane boyutlarında büyümelerin olduğu açıkça görülmektedir. Artan takviye oranı ile tane sınırlarının boşluk hacminde ve porozite sayısında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.** Al<sub>4.5</sub>Cu - %10 SiC numunelerinin optik mikroskop görüntüleri: (B1) - 5 saat, (B2) – 10 saat



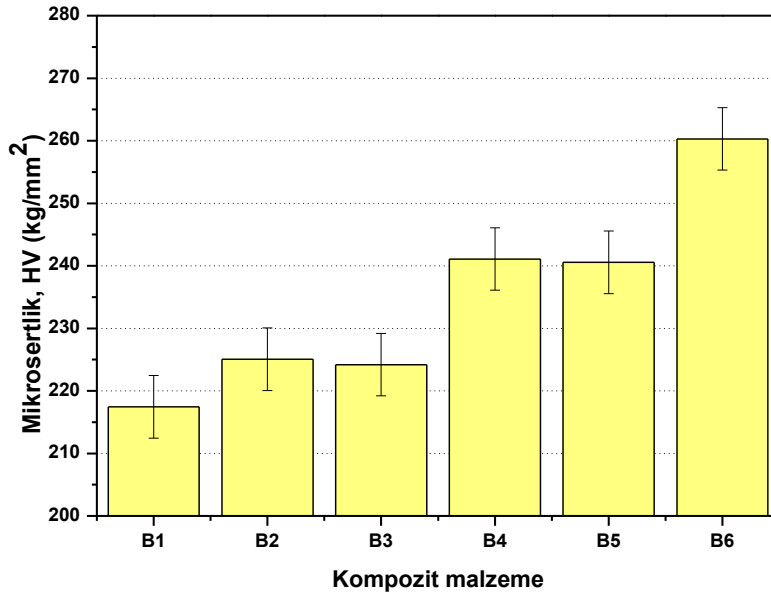
**Şekil 5.** Al<sub>4.5</sub>Cu - %15 SiC numunelerinin optik mikroskop görüntüleri: (B3) - 5 saat, (B4) – 10 saat



**Şekil 6.** Al<sub>4.5</sub>Cu - %20 SiC numunelerinin optik mikroskop görüntüleri: (B5) - 5 saat, (B6) – 10 saat



### 3.5. Sertlik çalışmaları (Hardness studies)



*Şekil 7. Al4.5Cu/SiC kompozitlerinin sertlikleri*

Sinterlenen numunelerin yüzeylerinin farklı bölgelerinden ölçülen mikrosertliklerin ortalama değerleri Şekil 7’de verilmiştir. Numunelerdeki takviye miktarı değişimi dikkate alındığında, takviye miktarı %10’dan %20’ye çıktıkça kompozit numunelerinin mikrosertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Öğütme sürelerinin mikrosertlik değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırıldığında ise öğütme süresi 5 saatten 10 saate çıkınca mikro sertlik değerleri de artmıştır. Bu durumun sebebinin SiC katkı malzemesi sertliğinin yüksek değerlerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda SiC parçacıkları baz matristen daha sert olduğu için, dislokasyonların önünde bariyer görevi görmektedir. Türker ve ark. [39] 1300 devir/dakika’da açık atmosferli ve su soğutmalı olarak 0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 saat için yapmış oldukları mekanik alaşımlama işleminde alaşımlama süresinin artmasıyla toz boyutlarının küçüldüğünü ve sertlik değerlerinin arttığını saptayarak benzer bir sonuç bulmuşlardır. Sinter sıcaklığı değişimine göre numunelerin mikrosertlik değerleri incelendiğinde, tane sınırlarında ve porozite yakınlarında tanelerin sıcaklık etkisiyle birbirlerine yaklaşmaları veya kaynaşmaları sonucunda sertlik değerleri de artmıştır. Yine yapılan benzer bir çalışmada [40] Al-4.5Cu alaşımının sertliği yaklaşık 90 HB (Brinell Hardness), yaklaşık 95 HV, olarak ölçülürken, %6 SiC katkılı Al-4.5Cu alaşımının sertliği yaklaşık 120 HB olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ise %10, %15 ve %20 SiC katkılı 10 saat öğütülmüş Al-4.5Cu alaşımların sertlikleri Şekil 7’de de görüldüğü gibi sırasıyla 225±5, 241±5 ve 260±5 HV olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışma literatür [40-48] çalışmalarıyla uyum içindedir ve ayrıca yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında mekanik alaşımlama tekniği ile üretilen Al-4.5Cu/SiC kompozitin partikül boyutlarında küçülme ve sertlik artışı nedeniyle mekaniksel özelliklerinde iyileşme olduğu açıkça görülmüştür. Böylece sanayinin ihtiyacı olan üstün özellikli malzemeler mekaniksel alaşımlama tekniği kullanarak alaşım bazlı partikül takviyeli MMK’ler üretilme ile temin edilebilir.

### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Al-4.5Cu alaşımına ağırlıkça %10, %15 ve %20 SiC katkılanması yapılarak mekanik alaşımlama yöntemi ile 5-10 saat için öğütme süresi sonucunda toz olarak üretilmiştir. Üretilen kompozit tozlarının termal, mikroyapısal ve mekaniksel özellikleri katkılanma oranı ve öğütme süresi parametreleri dikkate alınarak XRD, DTA, SEM, optik mikroskobu ve yüzey sertliği çalışmaları ile karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- ✓ Mekanik alaşımlama sırasında kompozit içerisinde istenmeyen bir intermetalik faz oluşmamıştır.

- ✓ Kompozit içerisinde SiC oranının düşük olması durumunda Al4.5Cu alaşımı içerisinde katı çözeltili olduğu ve SiC oranı arttıkça aglomerasyonlar sonucu kümelenmelerin olduğu görülmüştür.
- ✓ DTA ile sürekli ısıtma esnasında 500-650 °C sıcaklık aralığında Al<sub>2</sub>Cu, α-Al ve SiC katkılı Al4.5Cu katı çözeltili fazlarının eridiğini gösteren bir dizi endotermik pik gözlenmiştir.
- ✓ SEM görüntülerine göre SiC katkı oranı ve öğütme süresi arttıkça daha homojen, düzensiz şekilli veya küresel partiküller, ve partikül boyutlarında küçülmelerin olduğu görülmüştür.
- ✓ Preslenen numunelerde öğütme süresi arttıkça porozite sayısının azaldığı fakat artan takviye oranı ile tane sınırlarının boşluk hacminde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Öğütme süresi ve SiC katkı oranı arttıkça kristalit boyutundaki azalma ve deformasyon sertleşmesi nedenleriyle numune sertliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Maksimum sertlik yaklaşık 260 HV ile %20 SiC katkılı Al4.5Cu/SiC kompozit malzemenin 10 saat öğütülmesi sonucunda ölçülmüştür.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyonuna BTÜBAP-2019-YL-11 nolu proje ile çalışmamıza sağladığı finansal destek için teşekkür ederiz.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)



- [1] Ahmad Z., Khan S. A review paper on tribological and mechanical properties of Aluminium metal matrix composites manufactured by different route. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, 1:4(1-8), (2014).
- [2] Arakawa S., Hatayama T., Matsugi K., and Yanagisawa O. Effect of heterogeneous precipitation on age-hardening of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle dispersion Al-4mass%Cu composite produced by mechanical alloying. *Scripta Materialia*, 42(755-760), (2000).
- [3] Durai T. G., Karabi Das and Siddhartha D. Al (Zn)-4Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in-situ metal matrix composite synthesized by displacement reactions. *Journal of Alloys and Compounds*, 457(435-439), (2008).
- [4] Murthy V. S. R., and Rao B. S. Microstructural development in the directed melt-oxidized (DIMOX) Al-Mg-Si alloys. *Journal of Materials Science*, 30(3091-3097), (1995).
- [5] Breslin M. C., Ringnalda J., Xu L., Fuller M., Seeger J., Daehn G. S., Otani T. and Fraser H. L. Processing, microstructure, and properties of co-continuous alumina-aluminum composites. *Materials Science and Engineering A*, 195(113-119), (1995).
- [6] Liu W. and Köster U. Decomposition of the icosahedral phase in AlCuFe alloys. *Materials Science and Engineering A*, 133(C)(388-392), (1991).
- [7] Abd El-Azim A. N., Kassem M. A., El-Baradie Z. M. and Waly M. Structure and properties of short alumina fibre reinforced AlSi18CuNi produced by stir casting. *Materials Letters*, 56(963-969), (2002).
- [8] Badini C., Fino P., Musso M. and Dinardo P. Thermal fatigue behaviour of a 2014/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (Saffil® fibers) composite processed by squeeze casting. *Materials Chemistry and Physics*, 64(247-255), (2000).
- [9] Wei-chen Zhai, Zhao-hui Zhang, Fu-chi Wang, Xiang-bo Shen, Shukui Lee, and Lu Wang. Effect of Si content on microstructure and properties of Si/Al composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(982-988), (2014).
- [10] Ribes H., Suery M., Esperance G. L., and Legoux J.G. Microscopic examination of the interface region in 6061-Al/SiC composites reinforced with asreceived and oxidized SiC particles. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 21(2489-2496), (1999).

- [11] Kumar G., Rao C., Selvaraj N., Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites – a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10(1) (59–91), (2011).
- [12] Baisane V. P., Sable Y.S., Dhobe M. M., Sonawane P.M. Recent development and challenges in processing of ceramics reinforced Al matrix composite through stir casting process: A Review. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(10) (11-16), (2015).
- [13] Sur G., Şahin Y., Gökkaya H., Production of aluminum based particulate reinforced composites using molten metal mixing and squeeze casting methods. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* 20 (2) (233-238), (2005).
- [14] Kim S. W., Lee U. J., Han S. W., Kim D. K., K. Ogi, Heat treatment and wear characteristics of Al/SiCp composites fabricated by duplex process. *Composites: Part B* 34 (2003) 737–745.
- [15] Carvalho O., Madeira S., Buciumeanu M., Soares D., Silva F.S., Miranda G. Pressure and sintering temperature influence on the interface reaction of SiCp /410L stainless steel composites. *Journal of Composite Materials*, 50(15) (2005-2015), (2016).
- [16] Saravanan C., Subramanian K., Ananda V., Sankara R. Effect of Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composite – A Review. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 19(1) (23-30), (2015).
- [17] Venkatesh B., Harish B. Mechanical properties of metal matrix composites (Al/SiCp) particles produced by powder metallurgy. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1) (1277-1284), (2015).
- [18] Leszczyńska-Madej B. The effect of sintering temperature on microstructure and properties of Al – SiC composites. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(1) (43–48), (2013).
- [19] Suryanarayanan K., Praveen R., Raghuraman S. Silicon Carbide Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites for Aerospace Applications: A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(11) (6336–6344), (2013).
- [20] Yodkaew T., Morakotjinda M., Tosangthum N., Coovattanachai O., Krataitong R., Siriphol P., Vetayanugul B., Chakthin S., Poolthong N., Tongsrri R. Sintered Fe-Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> and Fe-SiC Composites. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 18(1) (57–61), (2008).
- [21] Abhik R., Xaviora M. Evaluation of Properties for Al-SiC Reinforced Metal Matrix Composite for Brake Pads. *Procedia Engineering*, 97(941–950), (2014).
- [22] Zakaria H.M. Microstructural and corrosion behavior of Al/SiC metal matrix composites. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(3) (831–838), (2014).
- [23] Akhtar F. Ceramic reinforced high modulus steel composites: processing, microstructure and properties., *Canadian Metallurgical Quarterly*, 53(3) (253–263), (2014).
- [24] Singla M., Dwivedi D., Singh L., Chawla V. Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8(6) (455–467), (2009).
- [25] Nuruzzaman D., Kamaruzaman F. Processing and mechanical properties of aluminiumsilicon carbide metal matrix composites. *Materials Science and Engineering*, 114(11-17), (2016).
- [26] Aksöz S., Bostan B. AA2014/B<sub>4</sub>C MMK yapının döküm ve döküm sonrası sinterleme işlemleri ile üretiminin aşınma davranışlarına etkileri. *Journal of Boron*, 3(2) (132-137), (2018).

- [27] Çelik Y.H., Kilickap E. Hardness and Wear Behaviours of Al Matrix Composites and Hybrid Composites Reinforced with B<sub>4</sub>C and SiC. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57 (9-10) (613-622), (2019).
- [28] Ozben T., Kilickap E., Cakir O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(220-225), (2008).
- [29] Kilickap E., Cakir O., Aksoy M., Inan A. Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165(862-867), (2005).
- [30] Song G.M., Zhou Y. and Wang Y. J. Effect of carbide articles on the ablation properties of tungsten composites. *Materials Characterization*, 50(293-303), (2003).
- [31] Tang H. G., Ma X. F., Zhao W., Yan J. M. and Zhu C. J. Crystallization of mechanically alloyed amorphous W-Mg alloy under high pressure. *Solid State Communications*, 129(147-150), (2004).
- [32] Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1-184), (2001).
- [33] Nakazato R.Z, Codaro E.N., Horovistiz A.L and Hein L.R.O. A metallurgical study of aluminum alloys used as aircraft components. *Praktische Metallographie-Practical Metallography*, 38(2) (74-87), (2001).
- [34] Okumuş M., Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen nanoyapılı Al<sub>66</sub>Co<sub>20</sub>Cu<sub>14</sub> tozlarının termal ve mikroyapısal özellikleri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1) (366-375), (2020).
- [35] Mandal A., Maiti R., Chakraborty M., Murty B.S. Effect of TiB<sub>2</sub> particles on aging response of Al-4Cu alloy. *Materials Science and Engineering A*, 386(296-300), (2004).
- [36] Avar B., Şimşek T., Gögebakan M. Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Nanokristal Fe<sub>60</sub>Al<sub>30</sub>Cu<sub>10</sub> (at.%) Tozların Yapısal ve Mekanik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (1) (184-191), (2019).
- [37] Reiso O., Øverlie H.G., Ryum N. Dissolution and melting of secondary Al<sub>2</sub>Cu phase particles in an AlCu alloy. *Metallurgical Transactions A*, 21(6) (1689-1695), (1990).
- [38] Luangvaranunt T., Dhadsanadhep C., Umeda J., Nisaratanaporn E., Kondoh K. Aluminum-4 mass% Copper/Alumina Composites Produced from Aluminum Copper and Rice Husk Ash Silica Powders by Powder Forging. *Materials Transactions*, 51(4) (756-761), (2010).
- [39] Türker M., Özdemir A. T., Ögel B. ve Yavuz A. Alüminyum-SiC Tozlarının Mekanik Alaşımlama Değirmeninde Öğütme Zamanının Kompozit Toz Yapısına Etkisinin Araştırılması. *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, Ankara, (425-431), (1999).
- [40] Chandrasekhar G. L., Vijayakumar Y., Nagaral M. Investigations on Mechanical Properties of Al-4.5% Cu-SiC and Al-4.5%Cu-Graphite Composites. *European Journal of Engineering Research and Science*, 1(1) (30-33), (2016).
- [41] Debnath S., Swami V., Rai R. N. Microstructures and Mechanical Properties Studies of the Directional Solidified Developed Ex-Situ Al-4.5% Cu-SiC<sub>p</sub> Metal-Matrix Composites. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(3) (3273-3277), (2018).
- [42] Waşık A., Madej B. L., Madej M. The influence of SiC particle size on mechanical properties of aluminium matrix composites. *Metallurgy and Foundry Engineering* 43(1) (41-49), (2017).
- [43] Qiu F., Gao X., Tang J., Gao Y.-Y., Shu S.-L., Han X., Li Q., Jiang Q.-C. Microstructures and Tensile Properties of Al-Cu Matrix Composites Reinforced with Nano-Sized SiC<sub>p</sub> Fabricated by Semisolid Stirring Process., *Metals*, 7(2): 49, (2017).

- [44] Penchal Reddy M., Shakoor R.A., Gururaj Parande, Vyasraj Manakari, Ubaid F., Mohamed A.M.A., Manoj Gupta. Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(5) (606-614), (2017).
- [45] Izadi H., Nolting A., Munro C., Bishop D.P., Plucknett K.P., Gerlich A.P. Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(11) (1900-1907), (2013).
- [46] Anggara B.S., Handoko E., Soegijono B. Mechanical Properties of Al-Cu Alloy-SiC Composites. *AIP Conference Proceedings*, 1617(109-111) (2014).
- [47] Arık H. Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Davranışının Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (4) (776-787), (2019).
- [48] Aksöz S., Ada H., İnce E., Özsoy S., Kaplan Y. T/M Yöntemi ile Üretilen Al Alaşımlarında Zn, Cu ve Mg Elementlerinin, Yaşlanma, Mikroyapı ve Sertliğe Etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(1) (150-159), (2020).

## Investigation of Structural and Magnetic Properties of Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) Thin Films

Kutluhan Utku Tümen<sup>1</sup>, Onur İloğlu<sup>1</sup>, Nazan Demiryürek<sup>2</sup>, Mustafa Akyol<sup>1,\*</sup> , Faruk Karadağ<sup>2</sup>, Ahmet Ekicibil<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Materials Engineering, Adana, TURKEY

<sup>2</sup> Çukurova University, Department of Physics, Adana, TURKEY

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 06/03/2020

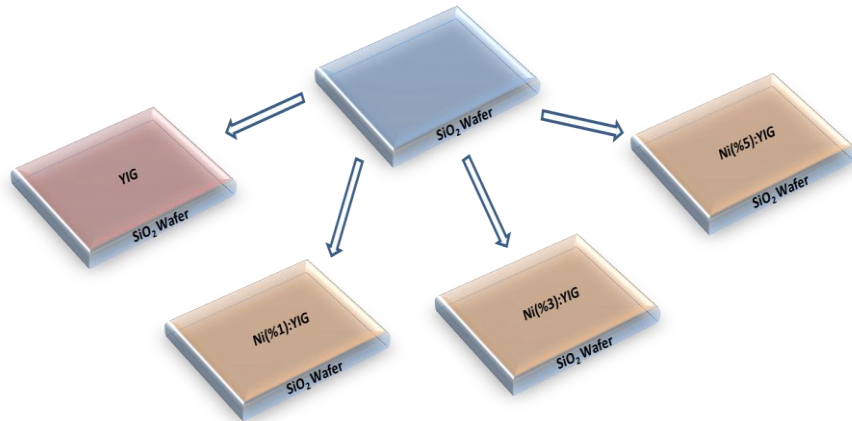
Revision 17/04/2020

Accepted: 08/05/2020

In this study,  $Y_3Fe_5O_{12}$  shortly named YIG thin film and various concentration of Ni doped YIG thin films have been grown on quartz substrate using vacuum free spin-coating methods. Structural and magnetic properties of YIG and Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) thin films grown on quartz substrates were investigated by performing X-ray diffraction and vibrating sample magnetometer experiments, respectively.

#### Highlights

- YIG film has been successfully grown on quartz substrate by vacuum free technique.
- Magnetic and structural properties of nickel on YIG were investigated.



**Figure A.** Schematic representation of YIG and Ni(1, 3 and 5 %):YIG thin films on quartz substrate

#### Keywords

YIG  
Thin Film  
Spin Coating  
Magnetic Anisotropy

**Purpose:** In this study, the following items are intended: Using quartz substrates instead of highly cost GGG (Gallium-Gadolinium-Garnet) substrates and minimizing production costs, low-cost YIG thin film production by using vacuum-free spin coating system and low Ni contribution to improve magnetic properties of YIG thin films.



**Theory and Methods:** YIG and Ni:YIG were grown on quartz substrates by vacuum-free spin coating in various recipes. The structural and magnetic properties of these thin films were characterized by X-Ray Diffraction and Vibrating Sample Magnetometer.

**Results:** In this study, YIG and Ni doped YIG coated quartz substrates are discussed in various aspects. Crystallographic results show that YIG crystallizes in a single phase cubic garnet structure and also Ni patterns are observed in various Ni samples. In addition, nickel addition of ferrimagnetic YIG deteriorated magnetic anisotropy.

**Conclusion:** YIG and Ni:YIG samples were produced successfully by using vacuum-free spin coating method. In addition, the targets (sub-cost, production cost) were successfully realized. Structural features are successful for YIG. However, with the addition of nickel, the structure was thoroughly disrupted. In addition, due to the ferrimagnetic nature of Ni, disrupting YIG's magnetic anisotropy while it is expected to increase the magnetic properties of YIG.



## Ni(x):YIG (x=% 1, 3 ve 5 ) İnce Filmlerin Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Kutluhan Utku Tümen<sup>1</sup>, Onur İloğlu<sup>1</sup>, Nazan Demiryürek<sup>2</sup>, Mustafa Akyol<sup>1,\*</sup> , Faruk Karadağ<sup>2</sup>, Ahmet Ekicibil<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Malzeme Mühendisliği Bölümü, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana 01250, Türkiye

<sup>2</sup> Fizik Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana 01330, Türkiye

### Öz

İtriyum Demir Garnet ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) kısa ismiyle YIG, ince filmlerin mikrodalga haberleşme sistemleri ve manyeto-optik cihazlarda umut veren uygulamalarından dolayı son yıllarda yoğun olarak çalışılan malzemelerden biridir. Günümüzde YIG ince filmler GGG ile isimlendirilen Galyum-Gadolinium-Garnet alttaş üzerine büyütülmektedir. Ancak GGG alttaşın maliyetinin yüksek olması YIG filmlerin üretilmesini ekonomik açıdan kısıtlamaktadır. Yaptığımız ön çalışmalar, kuvars üzerine YIG ince film büyütmenin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada GGG alttaş yerine daha düşük maliyetli ve beklenen performansı karşılayan kuvars alttaş kullanıldı. YIG ince filmler kuvars alttaş üzerine spin-kaplama yöntemiyle büyütüldü. Uygun üretim koşulları altında üretilen YIG ince film kaplı numunelerin yüzey homojenliği sağlandı. Kuvars altlık üzerinde büyütülen YIG filmlerinin tek fazlı kübik bir garnet yapısında kristalize olduğu bulundu. Ayrıca Ni katkılı YIG filmleri benzer yöntemle büyütüldü. -5000 Oe ile +5000 Oe arasında uygulanan manyetik alan ile manyetizasyon değerleri ölçüldü ve histerezis eğrileri elde edildi.

### Investigation of Structural and Magnetic Properties of Ni(x):YIG (x=1, 3 and 5%) Thin Films

#### Abstract

YIG with its short name of Yttrium Iron Garnet ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ) is one of the materials that have been working intensively in recent years due to its promising applications in microwave communication systems and magneto-optical devices. Today, YIG thin films are grown on the Gallium- Gadolinium-Garnet substrates with the short name of GGG. However, because the cost of GGG substrate is very high which restricts the production of YIG films economically. Our preliminary studies have shown that it is possible to grow YIG thin film on the quartz substrate. In this study, quartz substrate was used instead of GGG substrate which meets lower cost and expected performance. YIG thin films were grown on quartz substrate by spin-coating method. The surface homogeneity of YIG thin film coated samples produced under suitable production conditions was provided. YIG films grown on quartz substrate were found to be crystallized in a single-phase cubic garnet structure. In addition, Ni doped YIG films were grown similar technique. The magnetic field applied between -5000 Oe and +5000 Oe, magnetization values were measured and hysteresis curves were obtained.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 06/03/2020  
Düzeltilme: 17/04/2020  
Kabul: 08/05/2020

#### Anahtar Kelimeler

YIG  
İnce Film  
Döndürerek Kaplama  
Manyetik Anizotropi

#### Keywords

YIG  
Thin Film  
Spin Coating  
Magnetic Anisotropy

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

YIG'in dar ferromanyetik rezonans genişliğe, düşük manyetik kayıp ve yeterince güçlü doyum mıknatıslanma değerlerine sahip olmasından ötürü manyetik sensörlerde ve veri depolama aygıtlarında kullanılma potansiyeli yüksek bir malzemedir. Dolayısıyla, nano ölçekli YIG filmlerin üretimi ve karakterizasyonu gelecek nesil nanoteknolojik aygıtların geliştirilmesi açısından önemli hale gelmiştir. Garnetler sahip oldukları yüksek faraday etkileri ve görünür bölgedeki saydamlık özellikleri ile birçok manyeto-optik uygulama alanında, 1-10 GHz bandında kullanıma en uygun mikrodalga elemanı olmasından dolayı mikrodalga alanında rezonatör ve filtre olarak [6, 8], optik sistemlerinde faraday

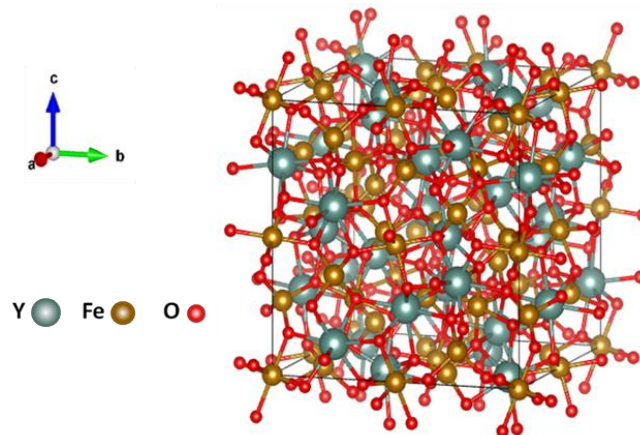
döndürücü olarak, dijital radyolar için sentezayzır (synthesizer) olarak, manyetik alan ile elde edilen akım sensörlerinin geliştirilmesinde [2], bilgi iletişim hatlarına entegre edilmiş optik modülatörde, optik izolatörlerde, yayıcılar ve dielektrik dalga kılavuzlarında olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadırlar. Garnetlerin termal olmayan optik yöntemlerle manyetik özelliklerin değiştirilebileceği bulunmuş [2] ve bu bulgular ile garnetlerin ultra hızlı anahtarlama ve manyetik kayıt ortamları için kullanışlı olabileceği saptanmıştır [7]. Aşağıdaki tabloda YIG'in bant aralığı (1-10 GHz) kapsamında çalışan aygıtların uygulama alanları verilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı bant (GHz) aralıkları ve kullanım alanları.

| Bant Adı | Frekans Aralığı (GHz) | Dalga Boyu Aralığı (cm) | Kullanım Alanı  |
|----------|-----------------------|-------------------------|---|
| L-Bant   | 1-2                   | 15-30                   | Askeri telemetri istihbaratı sistemleri, GPS, GSM.                                      |
| S-Bant   | 2-4                   | 7.5-15                  | Gemi radarları, haberleşme uyduları, mikrodalga cihazlar ve kablosuz iletişim araçları. |
| C-Bant   | 4-8                   | 3.75-7.5                | Uzun mesafe telekomünikasyon uygulamaları.  |
| X-Bant   | 8-12                  | 2.5-3.75                | Haberleşme uydu radarları, uzay iletişim araçları.                                      |

YIG ince filmler ferromanyetik bir malzemedir. YIG, 3 alt kafese (sublatice) sahiptir. Bunlardan 2 tanesi demir iyonları 1 tanesi ise itriyum iyonları tarafından işgal edilmiştir. YIG'in manyetik özelliği, kafes yapısında oktohedral ve tetrahedral konumlarındaki manyetik demir iyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu manyetik momentler ters yönde olup net manyetik momentleri sıfırdan farklıdır. Bir alt kafes %60 demir iyonu içerirken diğer kafes %40 içerdiğinden dolayı net manyetizasyon oluşur. YIG yapısındaki itriyum iyonları diyamanyetik özellik gösterir ve manyetik özelliklere etkileri azdır [5]. YIG'in manyetik geçiş sıcaklığı (Curie sıcaklığı) 282°C olması oda sıcaklığındaki manyeto-optik aygıtlardaki uygulamaları daha aktif hale getirmektedir.

YIG yapısında geniş ölçüde izin verilen izomorfik yer değiştirmeler sayesinde, iyi bir mikro-yapı kontrolüne koşullandırılmış yeni elementlerin dahil edilmesiyle farklı özellikler elde edilebilir. İtريum demir garnet içindeki demir (Fe) yerine nikel (Ni) eklenmesiyle yeni özellikler ve uygulamalar elde edilebilir. Nikel iyonlarının YIG yapısına katılması, yük dengesi olmayan bir materyal örneğidir. Dahil edilen  $Ni^{2+}$  iyonlarının,  $Fe^{4+}$  veya  $Fe^{2+}$  oluşumu ile dengelenebileceği varsayılabilir. Bununla birlikte, Ni diğer oksidasyon durumlarında da tanımlanır. Yük dengeleme için ek mekanizma, kafesler içindeki oksijen boşluğundaki bir artışın Fe'nin Ni tarafından değiştirilmesine eşlik eden oksijen boşluğu oluşumu olabilir. Oksijen boşluğu bir veya iki yakalanmış elektrona sahip olabilir veya boş kalabilir ve YIG'daki bazı önemli özellikleri değiştirebilir [9].



**Şekil 1.** İtريum Demir Garnet (YIG) ferritinin kristalografik yapısı: uzay grubu Ia3d.



YIG ince filmlerin potansiyel uygulamalarda kullanılmasını kısıtlayan önemli problemlerden bazıları; *i*) oldukça pahalı olan GGG alttaşlar üzerine büyütülüyor olmaları, *ii*) vakum gerektiren üretim sistemlerinin kullanılıyor olmasıdır.

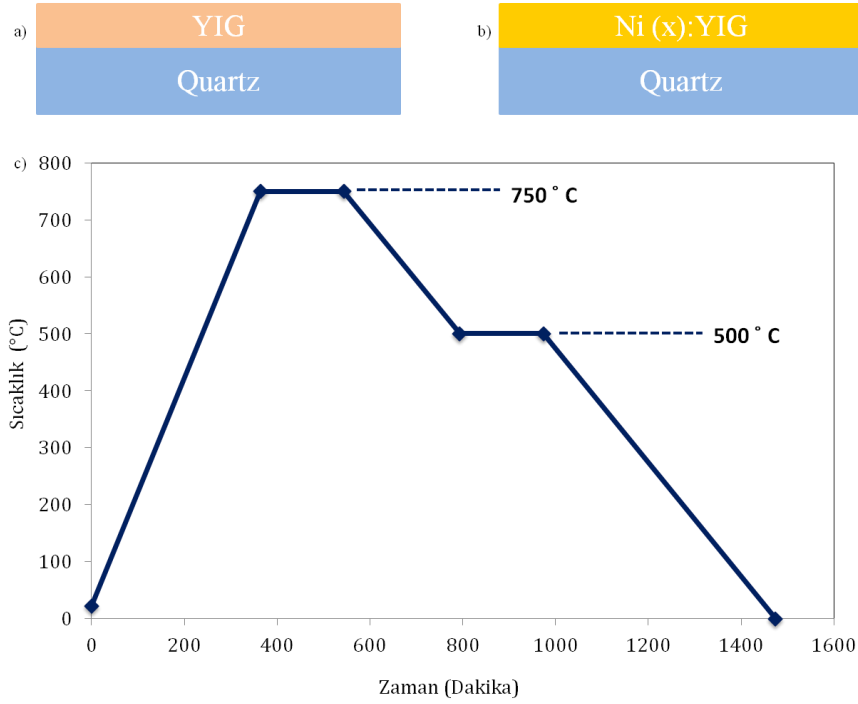
Bu çalışmada, YIG filmlerinin oluşturulmasında ve potansiyel uygulamalarda kullanılmasına engel teşkil edecek üretim maliyeti ve manyetik özelliklerinin yetersiz olması gibi problemlere aşağıda verilen çözüm önerileri çalışmanın ana amaçlarını oluşturmaktadır.

- i*) *Alttaş*: Alttaş olarak kullanılan ve oldukça yüksek maliyetli GGG alttaşlar yerine kuvars alttaşlar kullanılarak üretim maliyeti en aza indirgenmiş ve kuvars alttaş üzerinde üretilen YIG filminin kalitesi iyileştirilmiştir. Bunlara ek olarak, kuvars alttaşların ışığı geçirmesi, optik çalışmalar için uygun olması ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi gibi avantajları da bulunmaktadır.
- ii*) *Üretim*: Vakum gerektirmeyen spin-kaplama sistemi kullanılarak düşük maliyetli YIG ince film üretimi gerçekleştirilmiştir.
- iii*) *Yapısal ve Manyetik Özellikler*: YIG filmlerin yapısal ve manyetik özellikleri araştırılmıştır. Düşük oranda Ni katkılması gerçekleştirilerek manyetik ve morfolojinin nasıl etkileneceği incelenmiştir.

YIG filmini büyütme için çeşitli biriktirme yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan bazıları; mikrodalga sinterleme, sıvı faz epitaksi (LPE), radyo frekansı magnetron püskürtme, atımlı lazer biriktirme (PLD), plazma püskürtme ve sol-jel yöntemidir [3-4, 10-13]. Bunlar arasında, sol-jel yöntemi, düşük maliyetli olmasından dolayı avantajlıdır[1]. Maliyetin yanı sıra, daha düşük sentez sıcaklığında yüksek saflıkta ve homojenlikte filmler üretmek bu yöntemle mümkün olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, çalışmada sol-jel yöntemi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

İtriyum Demir Garnet (YIG) ve Ni(x):YIG filmleri, spin-kaplama yöntemi kullanılarak kuvars üzerine kaplandı. YIG'in kimyasal çözeltisi %99.99 saflıkta İtriyum (III) Nitrat Tetrahidrat ( $N_2O_6Y \cdot 4H_2O$ ) ile % 98,0 saflıkta Demir (III) Nitrat Nanohidrat ( $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ) uygun stokiometrik oranlarda 2-metoksietanol içinde ayrı ayrı çözünerek hazırlandı. Daha sonra, her iki çözelti karıştırıldı ve 2 gün boyunca karışması sağlandı. Şekil 2a-b'de önceden temizlenmiş kuvars alttaşlar üzerine büyütülmüş YIG ve Ni(x):YIG yapıları gösterilmektedir. YIG ve Ni (% 1, 3, 5):YIG filmler, 500 ve 3000 rpm'de döndürülerek toplamda 45 sn'lik iki aşamalı spin-kaplama yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Daha sonra üretilen filmler, organik çözücüleri yakmak için ortam atmosferinde 100° C'de 10 dakika boyunca kurutuldu. Daha sonra filmlerin kristal yapılarının oluşumu için ısı işlem uygulandı. Şekil 2c, uygulanan ısı işleminin temsili bir grafiğini göstermektedir. Filmler, 2°C/dak, ısıtma oranında 750°C'ye ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 3 saat tutuldu. Daha sonra 1°C/dak soğutma hızında 500°C'ye soğutuldu ve bu sıcaklıkta 3 saat tutuldu. Son olarak, 1°C/dak soğutma hızıyla oda sıcaklığına soğutuldu.



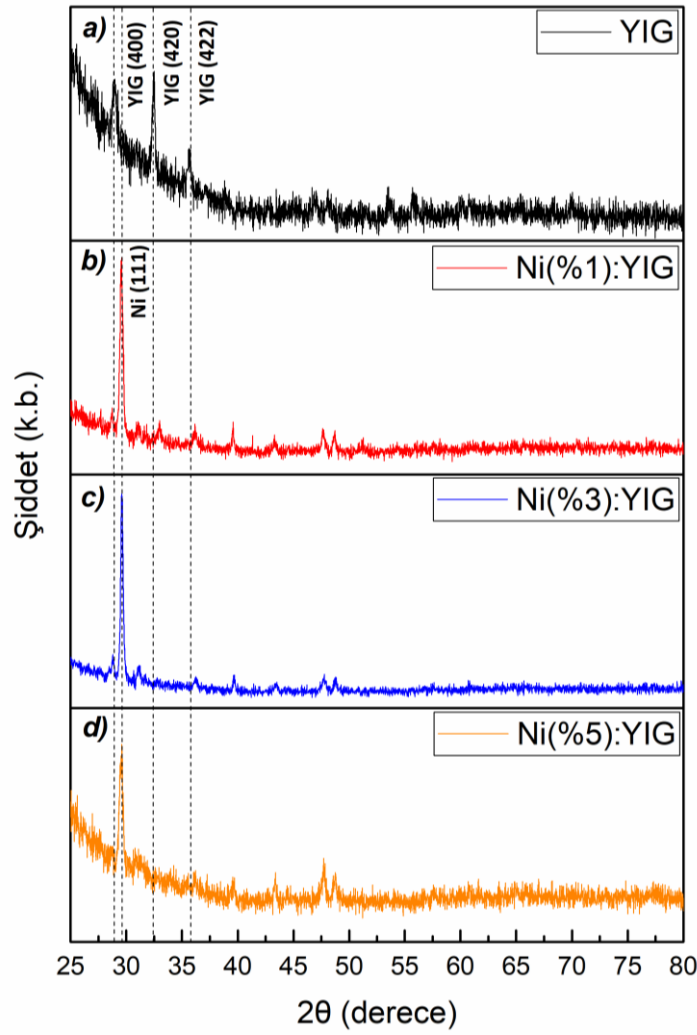
**Şekil 2.** a) Kuvars alttaş üzerine büyütülen YIG ince filmi b) farklı konsantrasyonlardaki Ni(x):YIG ince filmler (x:% 1, 3, 5) c) filmlere uygulanan ısı işlem aşamaları.

Filmlerin faz oluşumunu ve yapısal özelliklerini belirlemek için Cu-K $\alpha$  radyasyonu ile X-Işını Kırınımı (XRD) kullanılmıştır. Örneklerin oda sıcaklığında manyetik özelliklerini karakterize etmek için Titreşimli Numune Manyetometresi (VSM) kullanılmıştır. Manyetik ölçümler, YIG ve Ni katkılı YIG numuneleri için oda sıcaklığında manyetik alanın film düzlemine dik (OOP) uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik alana karşı mıknatıslanma ölçümleri oda sıcaklığında  $\pm 5$ kOe manyetik alan aralığında gerçekleştirilmiştir.

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

#### Mikroyapısal Analiz

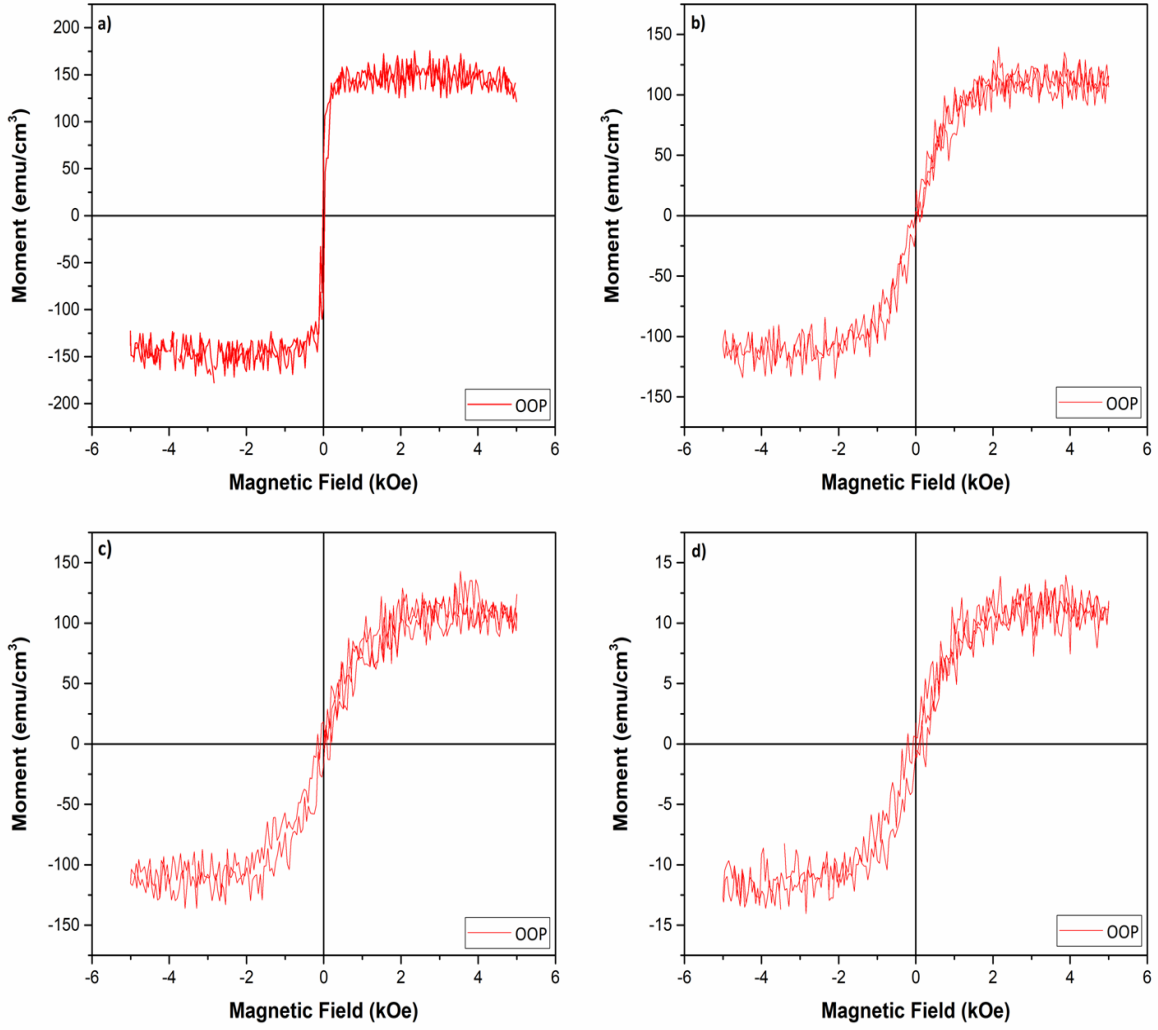
Şekil 3a-d, YIG ince film yapısındaki farklı Ni kombinasyonlarındaki filmlerin XRD profillerini göstermektedir. Şekil 3a'da gösterilen YIG filminin XRD desenleri, sırasıyla  $2\theta = 28.96^\circ$ ,  $32.50^\circ$  ve  $35.61^\circ$  'de bulunan (400), (420) ve (422) garnet yapısına sahip olan karakteristik YIG kırınım piklerini göstermektedir. Kuvars altlık üzerine büyütülen YIG filmlerinin, X-Pert High-Score Plus yazılımı kullanılarak doğrulanan tek fazlı kübik bir garnet yapısında kristalize olduğunu göstermektedir. Karakteristik YIG piklerine ek olarak, Ni-içeren YIG numuneleri (Şekil 3 b, c ve d), en güçlü (111) metalik Ni pikine sahiptir. Ayrıca Ni oranının artması ile YIG'in kristal yapısının bozulduğu ve %5 Ni katkılı örnekte YIG'in kristal yapısının tamamen ortadan kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum Ni(111) pikinin şiddetindeki değişim ile uyumludur.



Şekil 3. a) YIG, b) Ni(%1):YIG c) Ni(%3):YIG ve d) Ni(%5):YIG ince filmlerin XRD desenleri

### Manyetik Analiz

YIG ve farklı konsantrasyonlarda Ni katkılı Ni:YIG filmlerinin manyetik özellikleri, titreşimli örnek manyetometresi (VSM) kullanılarak incelenmiştir. Manyetik ölçümler, YIG ve Ni katkılı YIG numuneleri için oda sıcaklığında manyetik alanın film düzlemine dik (OOP) uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik alana karşı mıknatıslanma ölçümleri oda sıcaklığında  $\pm 5\text{kOe}$  manyetik alan aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4a-d, sırasıyla YIG, Ni(%1):YIG, Ni(%3):YIG ve Ni(%5):YIG örneklerinin manyetik OOP histerezis eğrilerini göstermektedir. Kuvars altlıkların diyamanyetik katkısının ham histerezis eğrilerinden çıkarılmıştır. Ni katkılanması ile manyetik anizotropide bozulma gerçekleştiği görülmüştür. Katkisız YIG örneğindeki OOP manyetik yönelim, Ni katkılanması ile film düzlemine paralel yöneldiği Şekil 4'den görülmektedir. Ni katkılı YIG örneklerinin yüzeye dik manyetik histerezis ölçümleri mıknatıslanmanın daha çok yüzeye dik bileşene sahip olduğunu göstermektedir. Tüm histerezis eğrileri birbirine benzer olsa da, doyum mıknatıslanması ( $M_s$ ) ve anizotropi alanı ( $H_a$ ) gibi manyetik parametreler farklıdır. Fakat YIG'in manyetik yapısının Nikel (ferrimanyetik) eklenmesi ile daha da güçlenmesi beklenirken bunun aksine bir davranış göstermiştir. %5 katkılı numunenin doyum mıknatıslanmasındaki ani düşüş YIG'in kristal yapısının bozulduğunun bir diğer deneysel göstergesidir. Bunlara ek olarak, Şekil 4'teki histerezis eğrilerinden çıkarılan  $M_s$  değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. YIG numunesi örnekler arasında en yüksek  $M_s$  değerine ( $147\text{ emu/cm}^3$ ) sahiptir.



**Şekil 4.** a) YIG, b) Ni (% 1):YIG, c) Ni(%3):YIG ve d) Ni (% 5):YIG yapılarının düzleme dik manyetik histerezis eğrileri verilmiştir. Tüm manyetik histerezis ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

**Tablo 2.** Farklı Ni kombinasyonlarındaki ince filmlerin doyum mıknatıslanması ( $M_s$ ), zorlayıcı alan ( $H_a$ ) ve anizotropi enerji değerleri ( $K$ ).

| Örnekler   | $H_a$ (Oe) | $M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> ) | $K$ (erg/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|------------|------------------------------|----------------------------|
| YIG        | 1280       | 147                          | $9.40 \times 10^4$         |
| Ni(%1):YIG | 1920       | 112                          | $10.6 \times 10^4$         |
| Ni(%3):YIG | 1840       | 109                          | $10.3 \times 10^4$         |
| Ni(%5):YIG | 1870       | 11                           | $1.3 \times 10^4$          |

Manyetik anizotropi enerji değerleri ( $K$ ),  $K = M_s H_a / 2$  ilişkisi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Hesaplanan  $K$  değerlerine göre, Ni oranının artmasıyla birlikte Ni(%1):YIG ve Ni(%3):YIG numunelerinin anizotropi enerjileri YIG numunesine göre artış gösterdiği görülmektedir. Ancak burada manyetik yönelimin değiştiği unutulmamalıdır. Manyetik anizotropi değerinin artması aslında manyetik anizotropi yöneliminin OOP (out of plane)'den IP (in plane)'e geçmesinden dolayıdır. %1 katkılı örnekte IP manyetik anizotropi enerji değeri artmıştır, ki bu beklendik bir durumdur. Daha sonra manyetik anizotropinin azalışa geçmesinin nedeni ise YIG'in yapısının bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat Ni(%5):YIG örneğinde manyetik anizotropi değeri diğer numunelere kıyasla en düşük olarak görülmüştür. Ayrıca, Şekil 4 b, c ve d'de görüldüğü üzere manyetik anizotropi alanı Ni katkı miktarı ile bozulmuştur.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Spin kaplama yöntemi ile kuvars altlık üzerine YIG, Ni(%1):YIG, Ni(%3):YIG ve Ni(%5):YIG ince film yığınları başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Hedeflenen maliyet adımları, GGG alttaş yerine kuvars kullanılarak ve vakum gerektirmeyen spin kaplayıcı sistem ile azaltılmıştır. YIG tabakasının yığınlarda kristalize edilmesi ve filmlerin yüzeyinde çatlakların önlenmesi için iki aşamalı tavlama işlemi kullanılmıştır. Elde edilen XRD desenleri, filmlerin referans YIG desenlerinden oluşan kübik kristal yapı içinde kristalize olduğunu gösterir. YIG desenlerine ek olarak metalik Ni kristal pikleri de gözlenmiştir. YIG tabakasının doyum miktatsızlanması, Ni eklenmesi ile 147 emu/cm<sup>3</sup>'ten 11 emu/cm<sup>3</sup>'e düşmüştür.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, FAY-2018-10491 numaralı proje kapsamında Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Konseyi tarafından desteklenmektedir. 2209-A Lisans Araştırma Projeleri Destek programı kapsamında Yazarlar (O. İloğlu ve K. U. Tümen) tarafından Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 'a teşekkürler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Aldbea, F.W.,N.I. Ahmad,N.B. Ibrahim.M. Yahya. (2014). Effect of increasing pH value on the structural, optical and magnetic properties of yttrium iron garnet films prepared by a sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 71(1), 31-37.
- [2] Atoneche, F.,A.M. Kalashnikova,A.V. Kimel,A. Stupakiewicz,A. Maziewski,A. Kirilyuk.T. Rasing. (2010). Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Physical Review B*, 81(21), 214440.
- [3] Boudiar, T.,B. Payet-Gervy,M.F. Blanc-Mignon,J.J. Rousseau,M. Le Berre.H. Joisten. (2004). Magneto-optical properties of yttrium iron garnet (YIG) thin films elaborated by radio frequency sputtering. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 284, 77-85.
- [4] Euler, C.,P. Hořuj,T. Langner,A. Kehlberger,V.I. Vasyuchka,M. Kläui.G. Jakob. (2015). Thermal conductance of thin film YIG determined using Bayesian statistics. *Physical Review B*, 92(9), 094406.
- [5] Geller, S. and M.A. Gilleo. (1957). Structure and ferrimagnetism of yttrium and rare-earth-iron garnets. *Acta Crystallographica*, 10(3), 239.
- [6] Harris, V.G.,A. Geiler,Y. Chen,S.D. Yoon,M. Wu,A. Yang,Z. Chen,P. He,P.V. Parimi,X. Zuo,C.E. Patton,M. Abe,O. Acher.C. Vittoria. (2009). Recent advances in processing and applications of microwave ferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(14), 2035-2047.
- [7] Kirilyuk, A.,A.V. Kimel.T. Rasing. (2010). Ultrafast optical manipulation of magnetic order. *Reviews of Modern Physics*, 82(3), 2731-2784.
- [8] Pardavi-Horvath, M. (2000). Microwave applications of soft ferrites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 171-183.
- [9] Peña-Garcia, R.,Y. Guerra,F.E.P. Santos,L.C. Almeida.E. Padrón-Hernández. (2019). Structural and magnetic properties of Ni-doped yttrium iron garnet nanopowders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 492, 165650.

- [10] Ravi, B.G.,A.S. Gandhi,X.Z. Guo,J. Margolies.S. Sampath. (2008). Liquid Precursor Plasma Spraying of Functional Materials: A Case Study for Yttrium Aluminum Garnet (YAG). *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(1), 82-90.
- [11] Shaiboub, R.,N.B.y. Ibrahim,M. Abdullah.F. Abdalhade. (2012). The physical properties of erbium-doped yttrium iron garnet films prepared by sol-gel method. *J. Nanomaterials*, 2012, 1-5.
- [12] Uchida, K.-i.,T. Kikkawa,A. Miura,J. Shiomi.E. Saitoh. (2014). Quantitative Temperature Dependence of Longitudinal Spin Seebeck Effect at High Temperatures. *Physical Review X*, 4(4), 041023.
- [13] Yang, Q.,H. Zhang,Y. Liu,Q. Wen.L. Jia. (2008). The magnetic and dielectric properties of microwave sintered yttrium iron garnet (YIG). *Materials Letters*, 62(17), 2647-2650.

## Effect of Metallographic Sample Preparation Processes on Retained Austenite Volume Fraction in Quenched AISI 52100 Steel

Burak NALÇACI \*<sup>ID</sup> Volkan KILIÇLI <sup>ID</sup> Mehmet ERDOĞAN <sup>ID</sup>

Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Material Engineering, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, metallographic examination samples prepared under different loads. In order to investigate the retained austenite transformation X-Ray diffraction used and phase volume fraction calculated according to the direct comparison method.

### Article Info:

Research article

Received: 09/01/2020

Revision 04/05/2020

Accepted: 08/05/2020

### Highlights

- XRD
- Phase Transformation
- Sample Preparation
- Retained Austenite

### Keywords

AISI 52100 Steel,  
Volume Fraction of  
Retained Austenite,  
XRD,  
Metallographic Sample  
Preparation.

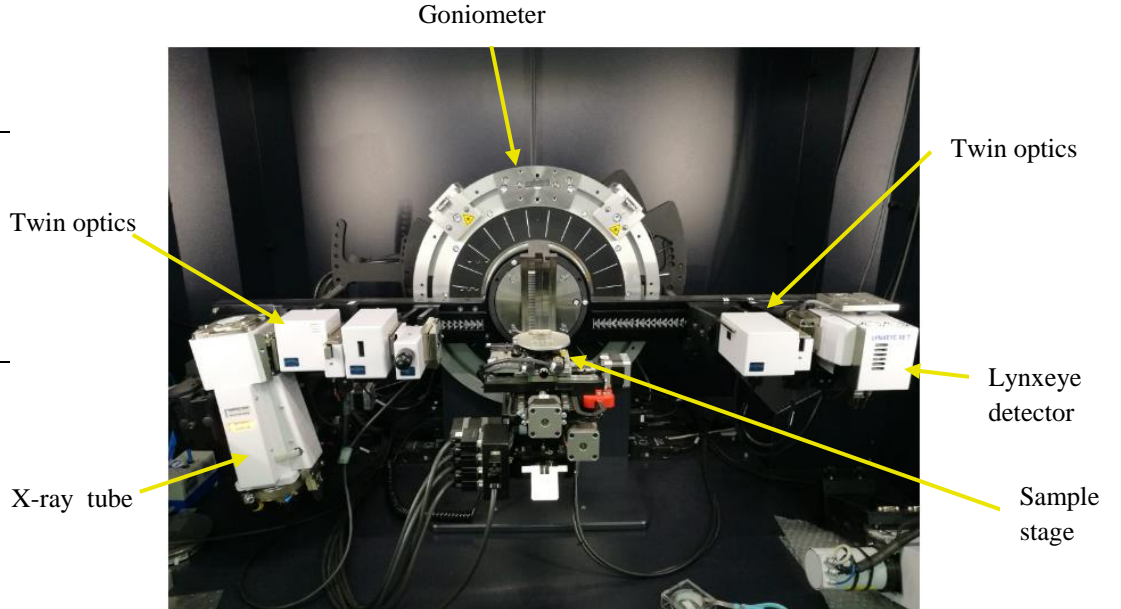


Figure A. Parts of XRD device

**Purpose:** Metallographic sample preparation is the first step of the microstructural characterization methods. During this process, possible phase transformation might mislead the researchers on performed work. That is why, the aim of this study provides more qualified characterization by determining the effect of load on metallographic sample preparation.

**Theory and Methods:** In the present study, fully automatic metallographic grinding and polishing machine was used with different loads (20N-40N-80N-100N). Surface roughness was measured because of the effect of surface roughness on the XRD pattern. The retained austenite volume fraction of these samples was calculated via XRD.

**Results:** The results have shown that XRD pattern of these four samples is quite similar to each other.

**Conclusion:** It is thought that the high martensite volume fraction prevented the transformation of retained austenite; hence the retained austenite could maintain its stability during the metallographic sample preparation.



## Su Verilmiş AISI 52100 Çeliğinde Metalografik Numune Hazırlama İşlemlerinin Kalıntı Östenit Hacim Oranına Etkisi

Burak NALÇACI \*<sup>ID</sup> Volkan KILIÇLI <sup>ID</sup> Mehmet ERDOĞAN <sup>ID</sup>

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Metalografik incelemelerde numune hazırlama işlemleri malzeme karakterizasyonunda temel basamaklardan biri olup, numune hazırlama işlemlerinin mikroyapıyı oluşturan fazların kararlılığında değişkenliğe sebebiyet vermesi yapılan deneysel çalışmanın yorumlanmasında hatalara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, su verilmiş AISI 52100 çeliğinde metalografik numune hazırlama işlemlerinde (zımpara-polisaj) uygulanan yükün kalıntı östenit hacim oranına etkisi araştırılmıştır. Farklı yükler (20N, 40N, 80N, 100N) altında hazırlanan numuneler optik mikroskop, SEM ile incelenmiş ve XRD analizleri yapılmıştır. Kalıntı östenit miktarı XRD analizinin doğrudan karşılaştırılması yöntemiyle hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün XRD desenlerine etkilerini belirlemek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Uygulanan yükün kalıntı östeniti martenzite dönüştürme ve bu dönüşüm sonrasında makro sertlikte artış ihtimalini değerlendirmek amacıyla sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda farklı yükler altında hazırlanan metalografi inceleme numunelerinin optik mikroskop, SEM ile mikroyapı incelemeleri ve XRD analizleri kalıntı östenit hacim oranında dikkate değer bir farklılığın oluşmadığını göstermiştir. Kalıntı östenit faz hacim oranında değişimin gözlemlenmemesinin sebebi olarak kalıntı östenit hacim oranının az olması (<10%) sebebiyle fazla miktardaki martenzit hacim oranının östenit üzerine uyguladığı yüksek basma gerilmesi olduğu düşünülmektedir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 09/01/2020  
Düzelme: 04/05/2020  
Kabul: 08/05/2020

### Anahtar Kelimeler

AISI 52100 Çeliği,  
Kalıntı Östenit Hacim Oranı,  
XRD,  
Metalografik Numune Hazırlığı.

### Keywords

AISI 52100 Steel,  
Volume Fraction of Retained Austenite,  
XRD,  
Metallographic Sample Preparation.

## Effect of Metallographic Sample Preparation Processes on Retained Austenite Volume Fraction in Quenched AISI 52100 Steel

### Abstract

Sample preparation is one of the main steps in metallographic examinations and the sample preparation processes give rise to changes in the determination of volume fraction of any phases can cause failure at the interpretation of a study. In this study, the effect of applied load during the metallographic sample preparation process on the volume fraction of retained austenite of the quenched AISI 52100 was investigated. Metallographic examination samples were prepared under different loads (20N, 40N, 80N, 100N) were examined by optical and SEM microscopes. The retained austenite volume fraction was calculated by the direct comparison method from the XRD analysis. Surface roughness was determined via a profilometer in order to reveal the effect of surface roughness on XRD patterns. Hardness measurements were performed to determine the probability of applied load that may transform retained austenite into martensite and rise in macro hardness after this transformation. No significant phase transformation was observed in the retained austenite phase volume fraction of metallographic examination samples prepared under different loads on retained austenite volume fraction measurements by the XRD method and. It is thought that a large amount of martensite volume fraction applies compressive stress on the retained austenite owing to low retained austenite volume fraction (<10%) is the reason for not being observed phase transformation

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik ve dökme demir malzemelerde mikro yapıyı oluşturan fazların hacim oranları malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede büyük önem taşımaktadır [1-3]. Özellikle bu durum, yapısında



kalıntı östenit içeren düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelikler [4], çift fazlı çelikler [5], TRIP çelikleri [6] gibi malzemelerde ön plana çıkmaktadır.

Çeliklerde martenzit HMT kafeste oktahedral iç boşluklara sıkışmış karbon atomlarının birim kafeste meydana getirdiği distorsiyonlar ve gerilimler sebebiyle oldukça yüksek sertliğe sahiptir [7]. Östenit fazından martenzit fazına dönüşüm hacimce büyüme gerektirmektedir. Bu dönüşüm sırasında kendisini kuşatan sert martenzit plakaları arasında kalan ve hacimce büyüme gerçekleştiremeyen ve oda sıcaklığı veya daha düşük sıcaklıklarda varlığını koruyan östenit kalıntı östenit olarak adlandırılmaktadır [8]. Sertleştirilmiş çeliklerde karbon miktarı arttıkça kalıntı östenitin hacim oranı da artmaktadır. Kalıntı östenit yarı kararlı haldedir [9]. Kalıntı östenitin kararlılığı sıcaklığa, karbon içeriğine, tane boyutuna, morfolojisine, kristalografik oryantasyona, çevreleyen fazlara ve kimyasal kompozisyonlar gibi birçok parametreye bağlıdır [10-14]. Yukarıdaki etkenlere bağlı olarak östenitten martenzite dönüşüm için aktivasyon enerjisi değişmekle birlikte oda sıcaklığında yarı kararlı olan kalıntı östenit, gerilim veya ısı enerjisiyle martenzite veya başka yapılara dönüşebilmektedir [7]. Bu dönüşüm sonrası hacimce büyüme nedeniyle boyutsal kararlılıkta bozulma yeni temperlenmemiş martenzitin ortaya çıkmasıyla birlikte gevrekleşmenin ve sertliğin artması sonucu toklukta azalma gibi mekanik özelliklerde önemli değişiklikler yaşanmaktadır [15-17]. Bu nedenlerle kalıntı östenit hacim oranının doğru tespiti mekanik özelliklerin kontrol edilebilmesi açısından önem kazanmaktadır [18-20].

Mikroyapı karakterizasyonunun (Optik, SEM incelemeleri ve XRD analizleri) yapılabilmesi için gerekli metalografik numune, zımparalama+polisaj işlemlerinden geçirilmektedir. Bu işlemler uygulanan yükün oluşturduğu belirli bir gerilim altında gerçekleştirilmektedir. Metalografik numune hazırlığı sırasında oluşan bu gerilmelerin kalıntı östenitin kararlılığını değiştirmesi muhtemeldir. Daha önce yapılan çalışmalarda metalografik numune hazırlama işlemlerinin mikro yapıda değişikliğe sebebiyet verebildiği görülmüştür [1,7,21,22]. Mevcut çalışma bu konunun aydınlığa kavuşturulması ve deneysel verilere dayalı bilgilerin üretilmesi hedefiyle kurgulanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada, su verilmiş AISI 52100 çeliğinden hazırlanan metalografi inceleme numunelerinin zımparalama+polisaj işlemleri sırasında farklı oranlarda yüklemeler yapılarak kalıntı östenit hacim oranında oluşabilecek değişim belirlenmeye çalışılmıştır.

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

### 2.1. Malzeme (Material)

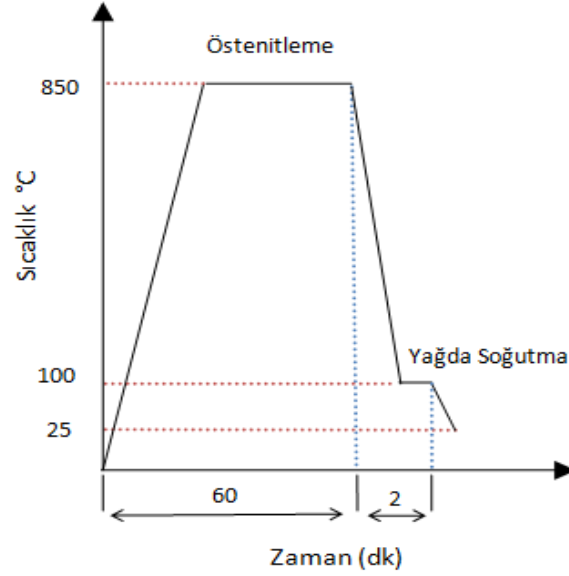
Deneysel çalışmalarda silindirik parçadan kesilen çapı 15 mm yüksekliği 10 mm boyutlarında olan AISI 52100 çeliği kullanılmıştır. Çeliğin kimyasal kompozisyonu Bruker Q4 Tasman model optik emisyon spektrometresiyle (OES) analiz edilmiş olup sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 52100 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

| C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr    | Fe    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,979 | 0,238 | 0,356 | 0.026 | 0.031 | 1.487 | Kalan |

### 2.2. Isıl İşlem (Heat Treatment)

Numuneler Heraeus marka elektrik direnci ile çalışan atmosfer kontrolü olmayan bir fırında 850°C’de 60 dakika süreyle östenitlemiş hızlı soğutma işlemi 100°C sıcaklıkta tutulan yağ banyosunda yapılmış ve yağ banyosunda 2 dakika bekletmenin ardından oda sıcaklığına havada soğutulmuştur. Uygulanan ısıl işlemlerin özeti Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Uygulanan ısı işlemlerin özeti

Isıl işlem esnasında yüzeyde oluşabilecek dekarbürize tabaka yüzeyden 1 mm abrasiv kesici ile kaldırılmıştır. Metalografi numunesinin zımparalama+polisaj işlemleri ATM Sapphire 520 model otomatik zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu işlemler sırasında uygulanan yük miktarının kalıntı östenit hacim oranı üzerine etkisini tespit etmek amacıyla 20, 40, 80 ve 100 N olmak üzere dört farklı yükleme yapılmıştır. Dağlayıcı olarak %2 Nital çözeltisi kullanılmıştır [23]. Uygulanan numune hazırlama işlemlerinin özeti, numune adları ve numune hazırlama işlemi sırasında uygulanan yük Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Numune adları, uygulanan numune hazırlık işlemleri ve uygulan yük değerleri

| <i>Numune Adı</i> | <i>Uygulanan Numune Hazırlığı İşlemi</i>  | <i>Uygulanan Yük (N)</i> |
|-------------------|---|--------------------------|
| 20 N              | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polisaj (6 µm→3 µm→1 µm) → %2 nital çözeltisiyle 10 sn dağlama | 20                       |
| 40 N              | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polisaj (6 µm→3 µm→1 µm) → %2 nital çözeltisiyle 10 sn dağlama | 40                       |
| 80 N              | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polisaj (6 µm→3 µm→1 µm) → %2 nital çözeltisiyle 10 sn dağlama | 80                       |
| 100 N             | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polisaj (6 µm→3 µm→1 µm) → %2 nital çözeltisiyle 10 sn dağlama | 100                      |

Dört farklı yük altında hazırlanan numunelerin yüzeyleri Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000M marka optik mikroskobunda ve JEOL JSM-6060LV marka elektron mikroskobunda incelenmiştir. Kalıntı östenit hacim oranını Bruker D8 Advance XRD cihazı kullanılarak elde edilen XRD deseni üzerinden ile hesaplanmıştır. X-ışını kaynağı olarak monokromatik CuK $\alpha$  ışını ( $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$ ) kullanılarak 40 kV ve 40mA’da XRD desenleri elde edilmiştir. Numuneler 2 $\theta$  40-100° aralığında 0,02 tarama hızında taranmıştır. Kalıntı östenit hacim oranının belirlenmesinde (200), (220) östenit ve (200), (211) ferrit piklerinin tümleşik alanları kullanılmıştır. Kalıntı östenit hacim oranının hesaplanmasında ASTM E975’te belirtilen Eş.1 kullanılmıştır [24].

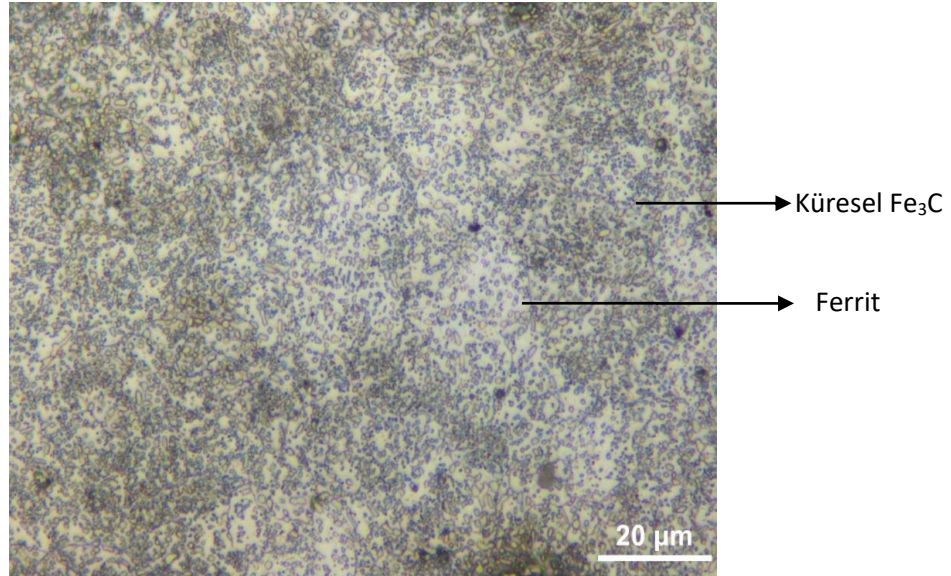
$$V_{\gamma} = \frac{0.5 \left[ \frac{I_{\gamma(200)}}{R_{\gamma(200)}} + \frac{I_{\gamma(220)}}{R_{\gamma(220)}} \right]}{0.5 \left[ \frac{I_{\alpha(200)}}{R_{\alpha(200)}} + \frac{I_{\alpha(211)}}{R_{\alpha(211)}} \right] + 0.5 \left[ \frac{I_{\gamma(200)}}{R_{\gamma(200)}} + \frac{I_{\gamma(220)}}{R_{\gamma(220)}} \right]} \quad (1)$$

Burada I; ilgili pikin altında kalan alanı ve R ise her pik için ayrı hesaplanan değerdir.

Metalografik numune hazırlama işlemi sırasında uygulanan yükün kalıntı östenitin martenzite dönüşebilme etkisini görmek amacıyla numunelerin sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değerleri Emcotest Duravision 200 model universal sertlik cihazı kullanılarak Rockwell C sertlik ölçme yöntemiyle (120 elmas koni uç, 150kgf yükte) belirlenmiştir. Numunelerin sertlik değerleri, aynı numune üzerinde en az 5 farklı bölgeden alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülüğünün kalıntı östenit ölçümlerinde oluşturabileceği etkiyi [25-28] görebilmek amacıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri için Mitutoyo-Surftest-301 taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her numune üzerinden beş farklı bölgeden ölçüm yapılmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

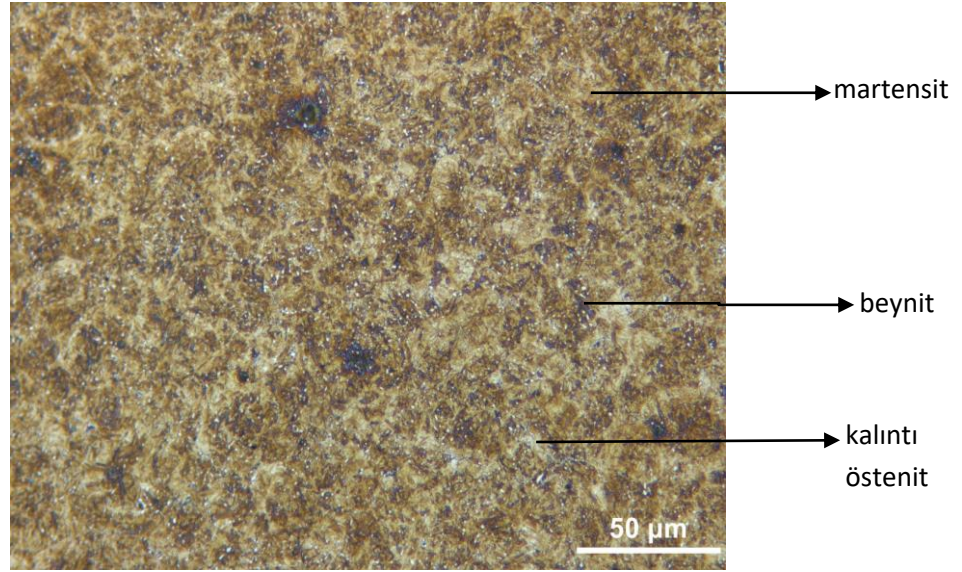
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Isıl işlem öncesi AISI 52100 çeliğinin mikroyapısının ferrit+küresel sementitten oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 2). 850°C’de 60 dakika östenitlenmiş ardından 100 °C’deki yağda su verilmiş ve oda sıcaklığına havada soğutulmuş AISI 52100 çeliğinin mikroyapısı martenzit, beynit, kalıntı östenit’ten oluşmaktadır (Şekil 3). Farklı yükler altında hazırlanan numunelerin optik mikroskop ve tarama elektron mikroskoplarıyla (SEM) elde edilmiş mikroyapıları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te verilmiştir.

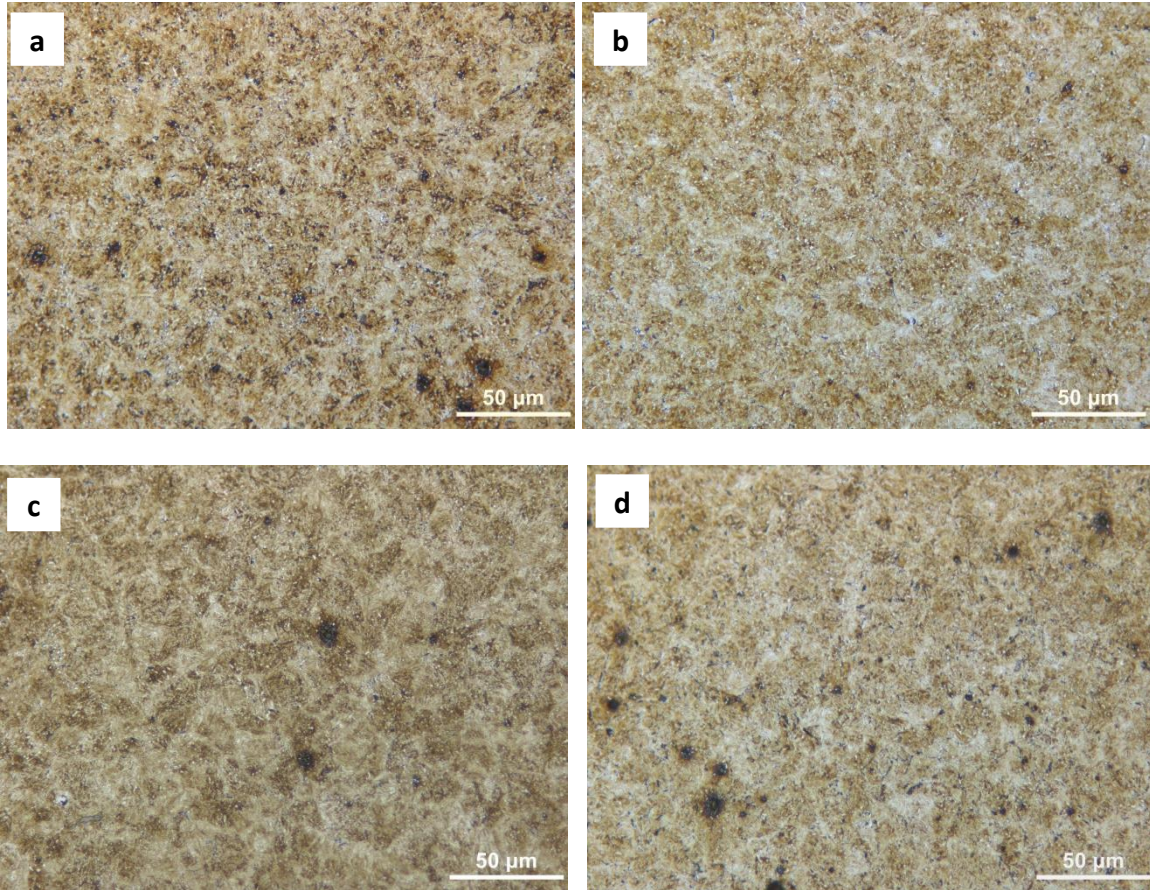


Şekil 2. Isıl işlem öncesi AISI52100 çeliğinin mikroyapısı

850°C’de 60 dakika östenitleme ısıl işleminden hemen sonra 100°C’de yağda hızlı soğutma sonucunda mikroyapı martenzit, beynit, kalıntı östenit’ten oluşmaktadır (Şekil 3).



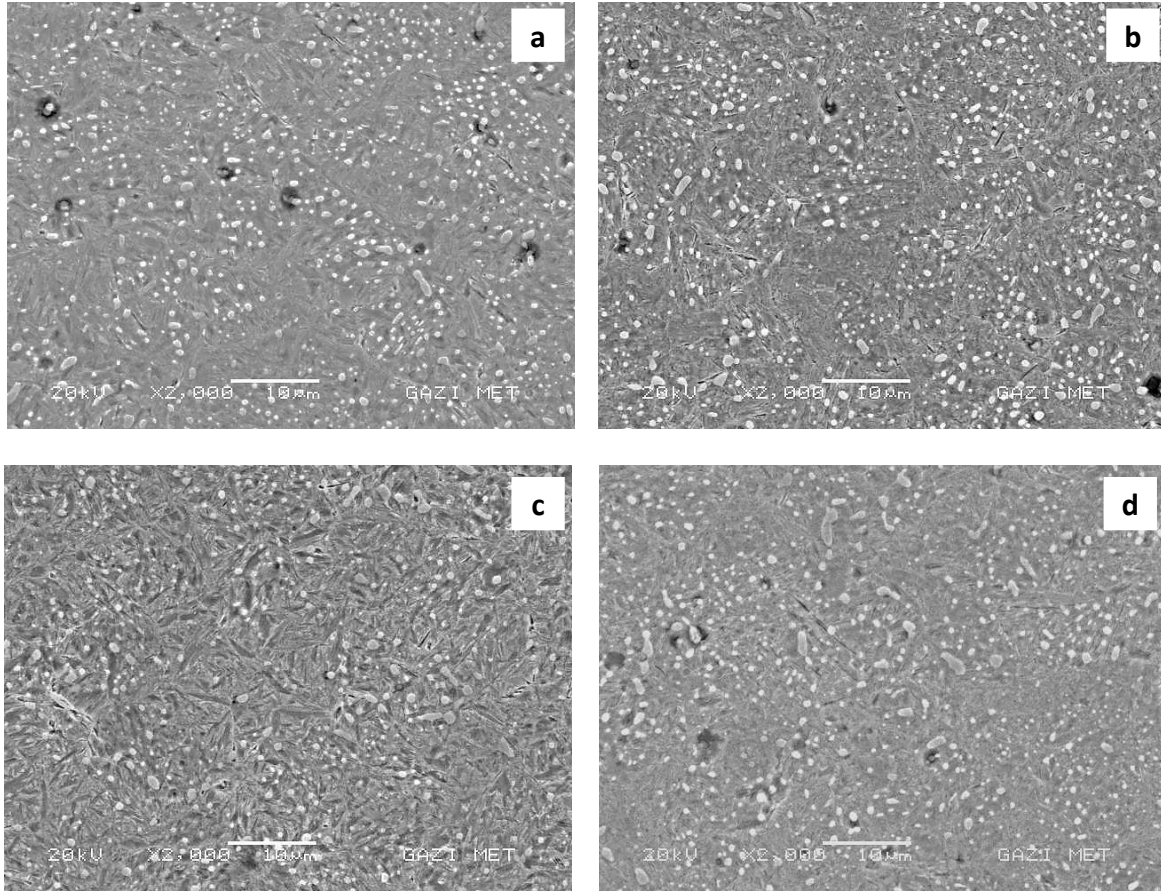
**Şekil 3.** 850°C'de 60 dakika östenitlenmiş ardından 100 °C'deki yağda su verilmiş ve oda sıcaklığına havada soğutulmuş AISI 52100 çeliğinin mikroyapısı



**Şekil 4.** AISI 52100 çeliğinin farklı yük altında hazırlanan metalografi numunelerinin optik mikroskopta elde edilmiş mikroyapı görüntüleri; a) 20 N, b) 40 N, c) 80 N ve d) 100 N.

Optik mikroyapılar incelendiğinde 4 farklı yüklemde hazırlanan metalografi numunelerinde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. 20N - 40N - 80N - 100N yükler altında hazırlanan numunelerin mikro

yapısında martenzit, beynit ve kalıntı östenit görülmektedir. Bu numuneler arasında kalıntı östenit hacim oranında herhangi bir farklılık olup olmadığını tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır.

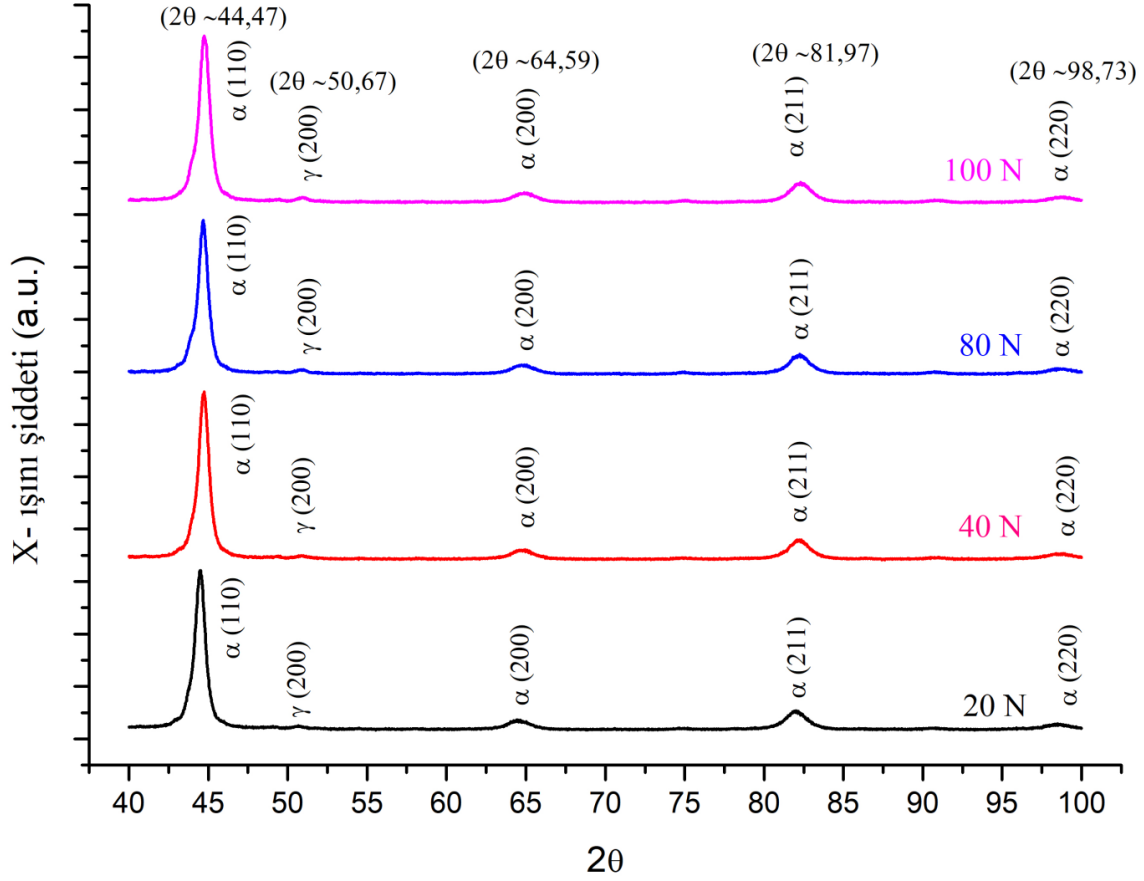


**Şekil 5.** AISI 52100 çeliğinin farklı yükler altında hazırlanmış metalografi numunelerinden SEM’de elde edilmiş mikrografileri; a) 20 N, b) 40 N, c) 80 N, ve d) 100 N

Dört farklı yüklemde hazırlanan numunelerin XRD desenleri Şekil 6’da ve uygulanan yük- kalıntı östenit hacim oranları arasındaki ilişki Şekil 7’de verilmiştir. Metalografik numune hazırlama işlemi sırasında 20 N ile 100 N arasındaki yüklemelerin XRD desenlerini önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir (Şekil 7). XRD desenlerinde nispi farka yüzey pürüzlülüğünün etkisi olabileceği değerlendirilmektedir. Numunelere uygulanan yüzey hazırlık işlemlerinin özeti, numune adları ve yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Numune adları, uygulanan yüzey hazırlık işlemleri ve yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

| Numune Adı | Uygulanan Yüzey Hazırlığı İşlemi                              | Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, μm) |
|------------|---|----------------------------|
| 20N        | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polısaj (6 μm→3 μm→1 μm) | 0,114±0,024                |
| 40N        | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polısaj (6 μm→3 μm→1 μm) | 0,099±0,009                |
| 80N        | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polısaj (6 μm→3 μm→1 μm) | 0,105±0,005                |
| 100N       | Zımpara (120#→320#→600#→800#→1200#)→ Polısaj (6 μm→3 μm→1 μm) | 0,080±0,008                |



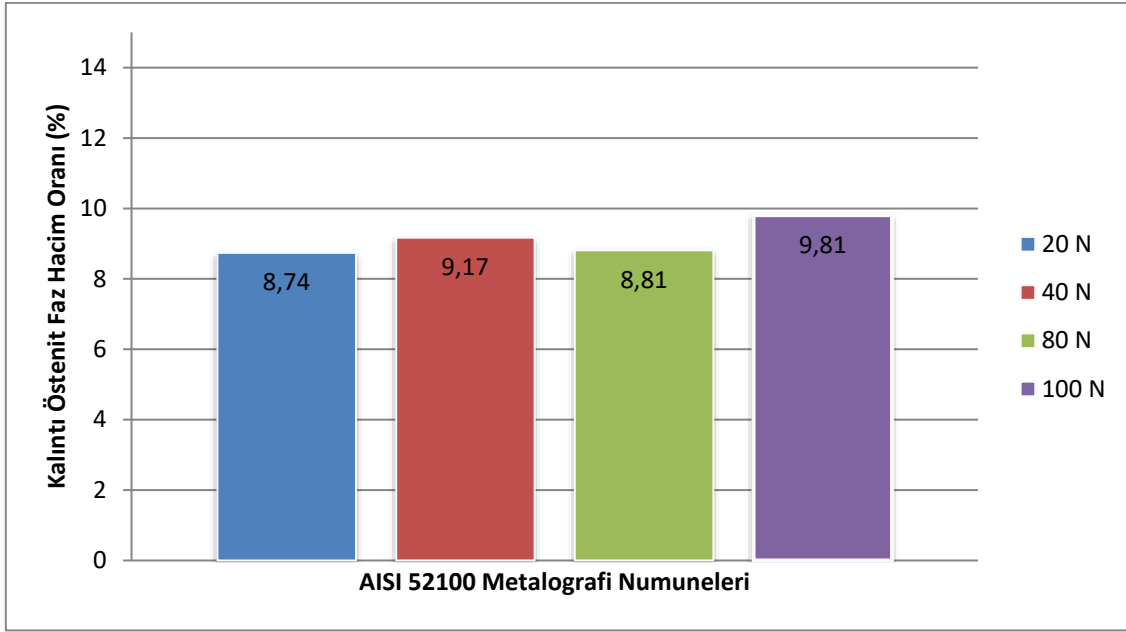
**Şekil 6.** Dört farklı yük altında hazırlanmış metalografi numunelerinin XRD desenleri

Çelik metalografi numunelerini hazırlama işlemleri sırasında zımpara kâğıdı kaynaklı deformasyonun ve aşırı parlatma işleminin kalıntı östenitin martenzite dönüşmesine neden olabileceği ve kalıntı östenit hacim oranının XRD ile belirlenmesinde sonuçlara yansiyabileceği ASTM E975-13 standardında belirtilmektedir [22].

Witte ve Lesch [1] metalografi numunelerini hazırlama sırasında kalıntı östenit miktarındaki değişimi gözlemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmalarında en az % 2 manganlı sıcak haddelenmiş çelik levha malzeme kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları numune hazırlama işleminde yaklaşık %45 olan kalıntı östenit hacim oranının % 20 bandına düştüğünü göstermiştir [1].

Molkeri ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada % 28.8 ve %54.8 kalıntı östenit hacim oranlarına sahip iki farklı yüksek karbonlu çok fazlı çeliklerde numune hazırlama sırasındaki abrasiv etkinin kalıntı östenitin martenzite dönüşmesine neden olabileceğini, malzemenin 100°C-500°C arasında uzun süre beklemesinin kalıntı östenitin tamamının martenzite dönüştüreceğini ve nano indentasyon testinde kalıntı östenitin 70 nN yük altında martenzite dönüştüğünü gözlemişlerdir [7].

Qiao ve arkadaşlarının kalıntı östenitin mekanik kararlılığının nano indentasyonla tespit edilmesi çalışmasında su verilmiş yüksek karbonlu çelikte % 29 kalıntı östenit aynı çeliğin temperlenmesinden sonra %11 kalıntı östenit elde etmişlerdir. Farklı kalıntı östenit hacim oranlarına sahip bu çeliklerde kalıntı östenit üzerinde nano-indentasyon uygulamışlardır. Nano-indentasyonlu bu çeliklerinin geçirimli elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerinde %29 kalıntı östenit hacim oranına sahip çeliğin indentöre sınır olan kısımda indentörün oluşturduğu gerilim kaynaklı martenzit dönüşümü gözlenirken %11 kalıntı östenit içeren numunede gözlenmemiştir. Qiao ve arkadaşları bu duruma martenzit hacim oranının fazla olmasının daha fazla gerilim yaratması sebebiyle kalıntı östeniti daha kararlı hale getirdiğini ifade etmişlerdir [21].



**Şekil 7.** Dört farklı yük altında hazırlanmış metalografi numunelerinde kalıntı östenit hacim oranı (%)

Gerçekleştirilen mevcut çalışmada elde edilen kalıntı östenit hacim oranı dikkate alındığında (yaklaşık % 9) metalografik numune hazırlama sırasında kalıntı östenit kararlılığının Qiao ve arkadaşlarının [21] yaptığı çalışmadaki % 11 kalıntı östenit içeren numunede gözlenen kararlılığa paralellik gösterdiği görülmektedir. Hali hazırdaki çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak dört farklı yükleme yapılmış ve yükün artmasına rağmen kalıntı östenitin kararlılığında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Bu sonuç kalıntı östenit hacim oranı azalırken martenzit hacim oranının artmasının kalıntı östenit üzerinde daha fazla baskı oluşturarak kararlılığı artırmasına ve bu durumda mekanik zorlamalarda da bu kararlılığı sürdürebilmesine atfedilebilir.

Tablo 3 ve şekil 7'deki sonuçlar incelendiğinde literatüre [25-28] benzer şekilde yüzey pürüzlülüğünün XRD desenlerini etkilediği yüzey pürüzlülüğü arttıkça XRD piklerinin şiddetinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu sebeple XRD piklerindeki minimal değişime yüzey pürüzlülüğünün neden olduğu düşünülmektedir.

Dört farklı yük altında hazırlanmış metalografi numunelerin sertlik ölçüm sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Sertlik Sonuçları

| Numune | Sertlik (HRC) |
|--------|---------------|
| 20N    | 65,03 ± 0,12  |
| 40N    | 65,14 ± 0,26  |
| 80N    | 65,48 ± 0,14  |
| 100N   | 65,37 ± 0,13  |

Tablo 4'teki sertlik sonuçları incelendiğinde numunelerin sertlik değerleri arasında neredeyse hiç fark gözlemlenmemiştir. Bu sonuç AISI 52100 çeliğinde yaklaşık % 9 olan kalıntı östenit hacim oranına 100 N'a kadar uygulanan yüklerin herhangi bir faz dönüşümüne sebebiyet vermediğinin göstergesi olarak düşünülebilir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada su verilmiş yaklaşık % 9 kalıntı östenit hacim oranına sahip AISI 52100 çeliğinden metalografi numune hazırlama işleminde uygulanan dört farklı yüklemenin (20-100 N) kalıntı östenit hacim oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 1- Su verilmiş AISI52100 çeliğinin mikroyapısı martenzit, beynit, ve yaklaşık % 9 kalıntı östenit'ten oluşmuştur.
- 2- 20-100 N arasında yapılan yüklemelerde kalıntı östenit kararlılığını korumuştur.
- 3- XRD analizleri sonucunda kalıntı östenit hacim oranındaki minimal farka (% 8,74 - % 9.81) yüzey pürüzlülüğünün etki ettiği tespit edilmiştir.
- 4- Sertlik sonuçları arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Bu durum kalıntı östenitin martenzite dönüşmediğinin bir işareti olduğu düşünülebilir.
- 5- Düşük kalıntı östenit hacim oranlarında martenzit hacim oranının fazla olmasının kalıntı östenit üzerinde daha fazla baskı oluşturarak kararlılığı artırdığı ve bu durumda mekanik zorlamalarda da östenitin bu kararlılığını sürdürebildiği değerlendirilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Çalışmamızın gerçekleştirilmesinde kullanmış olduğumuz alt yapı ve laboratuvar imkânlarının kurulmasını sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Witte M., Lesch C., On the improvement of measurement accuracy of retained austenite in steel with X-ray diffraction, *Materials. Characterization*, 139 (111–115), (2018).
- [2] Mark A.F., Wang X., Essadiqi E., Embury J.D., Boyd J.D., Development and characterization of model TRIP steel microstructures, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 576, pp. 108–117, 2013.
- [3] E. Oktay, V. Kılıçlı, M. Erdoğan, Östempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde İndüksiyonla Yüzey Sertleştirmenin Yorulma Sınırı Üzerine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(668–679), (2018).
- [4] Lai J., Huang H., and Buising W., Effects of microstructure and surface roughness on the fatigue strength of high-strength steels, *Procedia Struct. Integr.*, 2(1213–1220), (2016).
- [5] Dutta T., Das D., Banerjee S., Saha S.K., Datta S., An automated morphological classification of ferrite-martensite dual-phase microstructures, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 137(595–603), (2019).
- [6] Azizi G., Mirzadeh H., Parsa M.H., The effect of primary thermo-mechanical treatment on TRIP steel microstructure and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A*, 639(402–406), (2015).
- [7] Molkeri A., Pahlevani F., Emmanuelawati I., Sahajwalla V., Thermal and mechanical stability of retained austenite in high carbon steel: An in-situ investigation, *Mater. Lett.*, 163(209–213), (2016).
- [8] Nishiyama Z. (1978), *Martensitic Transformation*, London: Academic Press Inc., 476.
- [9] Smith W.F. (Çev.: M. Erdoğan). (2000), *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri*, Ankara: Nobel Yayınları, 34.
- [10] Tang Z.Y., Huang J.N., Ding H., Cai Z.H., and Misra R.D.K., Austenite stability and mechanical properties of a low-alloyed ECAPed TRIP-aided steel, *Mater. Sci. Eng. A*, 724(95–102), (2018).



- [11] Järvenpää A., Jaskari M., Man J., and Karjalainen L.P., Austenite stability in reversion-treated structures of a 301LN steel under tensile loading, *Mater. Charact.*, 127(12–26), (2017).
- [12] R.D.K. Misra, Zhang Z., Jia Z., Somani M.C., and Karjalainen L.P., Probing deformation processes in near-defect free volume in high strength–high ductility nanograined/ultrafine-grained (NG/UFG) metastable austenitic stainless steels, *Scr. Mater.*, 63(1057–1060), (2010).
- [13] Leal R.H., Guimarães J.R.C., Microstructure evolution during mechanically induced martensitic transformation in Fe-33%Ni-0.1%C, *Mater. Sci. Eng.*, 48(249–254), (1981).
- [14] Li Z.C., Misra R.D.K., Cai Z.H., Li H.X., Ding H., Mechanical properties and deformation behavior in hot-rolled 0.2C-1.5/3Al-8.5Mn-Fe TRIP steel: The discontinuous TRIP effect, *Mater. Sci. Eng. A*, 673(63–72), (2016).
- [15] García-Mateo C., Caballero F.G., The role of retained austenite on tensile properties of steels with bainitic microstructures, *Mater. Trans.*, 46(1839–1846), (2005).
- [16] Sierra R., Nemes J.A., Investigation of the mechanical behaviour of multi-phase TRIP steels using finite element methods, *Int. J. Mech. Sci.*, 50(649–665), (2008).
- [17] Cheng X., Petrov R., Zhao L., Janssen M., Fatigue crack growth in TRIP steel under positive R-ratios, *Eng. Fract. Mech.*, 75(739–749), (2008).
- [18] Shen Y.F., Qiu L.N., Sun X., Zuo L., Liaw P.K., Raabe D., Effects of retained austenite volume fraction, morphology, and carbon content on strength and ductility of nanostructured TRIP-assisted steels, *Mater. Sci. Eng. A*, 636(551–564), (2015).
- [19] Wang M.M., Tasan C.C., Ponge D., Kostka A., Raabe D., Smaller is less stable: Size effects on twinning vs. transformation of reverted austenite in TRIP-maraging steels, *Acta Mater.*, 79(268–281), (2014).
- [20] Choi K.S., Soulami A., Liu W.N., Sun X., Khaleel M.A., Influence of various material design parameters on deformation behaviors of TRIP steels, *Comput. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 2, pp. 720–730, Dec. 2010.
- [21] Qiao X., Han L., Zhang W., Gu J., Nano-indentation investigation on the mechanical stability of individual austenite in high-carbon steel, *Mater. Charact.*, vol. 110, pp. 86–93, Dec. 2015.
- [22] ASTM E-975, (2013), Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation, ASTM, USA.
- [23] Vander Voort, G. F. (1999). *Metallography, Principles and Practice*. USA: ASM International, 655.
- [24] Roberts C.S. Effect of carbon on the volume fractions and lattice parameters of retained austenite and martensite, *Trans. AIME*, 197(203-204), 1953.
- [25] Kaynak Y., Tascioglu E., Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy, *Procedia CIRP*, 71(500–504), (2018).

- [26] Pitschke W., Hermann H., Mattern N., The influence of surface roughness on diffracted X-ray intensities in Bragg–Brentano geometry and its effect on the structure determination by means of Rietveld analysis, *Powder Diffraction*, 8(74-83), (1993).
- [27] Suortti P., Effects of porosity and surface roughness on the X-ray intensity reflected from a powder specimen, *J. Appl. Cryst.*, 5(325-331), (1972).
- [28] Zhang M.X., Kelly P.M., Bekessy L.K., Gates J.D., Determination of retained austenite using an X-ray texture goniometer, *Mater. Charact.*, 45(39–49), 2000.

## Effect of Different Parameters on Hydrogen Production by Electrochemical Reforming of Glycerol

Merve GÖRDESEL\*  Duygu UYSAL ZIRAMAN  Özkan Murat DOĞAN  Bekir Zühtü UYSAL 

Gazi University Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering and Clean Energy Research and Application Center (CERAC), Maltepe/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effect of various parameters (glycerol concentration, electrode material, distance between the electrodes, electrolyte, temperature, mixing effect and additives to electrolyte) and their contributions to hydrogen production from glycerol using electrochemical reforming method were investigated.

### Article Info:

Research article

Received: 09/01/2020

Revision 06/05/2020

Accepted: 15/05/2020

### Highlights

- Convert glycerol, a by-product of biodiesel production, to hydrogen using electrochemical reforming
- Effect of glycerol concentration, electrode material, distance between the electrodes, electrolyte, temperature, mixing effect and additives to electrolyte on current density

### Keywords

Hydrogen  
Biodiesel  
Glycerol  
Electrolysis  
Electrochemical  
Reforming

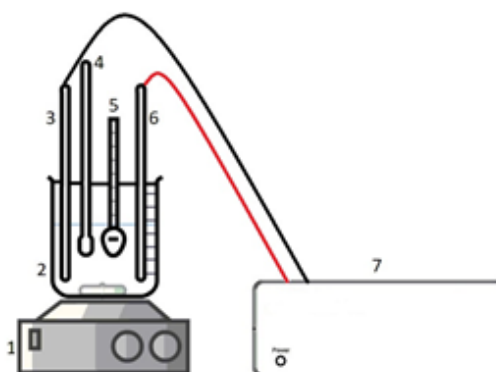


Figure A. Electrolysis system

**Purpose:** Production hydrogen from glycerol in atmospheric condition and using low cost electrode material. In this way, it is aimed to convert glycerol, a by-product of biodiesel production, to hydrogen feasibly. Optimum hydrogen production condition was examined in glycerol electrochemical reforming.

**Theory and Methods:** By utilizing the functionality of 3 -OH groups present in the molecular structure of glycerol, hydrogen can be produced from glycerol. In the experiments carried out in two electrode electrolysis cell. Polarization curves were plotted under different working condition and current density values were compared.

**Results:** The results shown that the optimum solution for this study is 0,04 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,4 M glycerol solution. The highest current density value was achieved by using Zn/Zn electrode pair. High temperature and high mixing speed affect current density value positively.

**Conclusion:** The effect of various parameters (glycerol concentration, electrode material, distance between the electrodes, electrolyte, temperature, mixing effect and additives to electrolyte) on current density for hydrogen production by electrochemical reforming of glycerol are presented in this study. Hydrogen production was achieved with an innovative method at high purity, without the need for further purification operation.



## Gliserinden Elektrokimyasal Yeniden Yapılandırma Yöntemiyle Hidrojen Üretimine Farklı Parametrelerin Etkisi

Merve GÖRDESEL\* Duygu UYSAL ZIRAMAN Özkan Murat DOĞAN Bekir Zühtü UYSAL

<sup>1,2,3,4</sup> Gazi University Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering and Clean Energy Research and Application Center (CERAC), Maltepe/ANKARA

### Öz

Günümüzde yeni ve temiz enerjilere duyulan ihtiyacın artmasıyla, hidrojen üretiminde çevreye daha az zararlı ve yenilenebilir kaynaklara dayalı teknolojilere yönelmek oldukça önemli hale gelmiştir. Çalışma kapsamında gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması ile hidrojen üretimi ve bu sayede biyodizel üretiminde yan ürün olarak oluşan gliserinin değerli kimyasallara, alternatif yakıtlara dönüştürülebilmesi amaçlanmıştır. Gliserinden hidrojen üretimiyle biyodizelin yan ürünü olan gliserinin etkin bir şekilde kullanılmasının ekonomik açıdan ek fayda sağlaması hedeflenmiştir. Gliserinin moleküler yapısında bulunan 3 adet -OH grubunun hidrojen oluşumunda sağladığı işlevsellikten yararlanılarak gliserinden hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yenilenebilir kaynaklardan yüksek saflıkta, herhangi başka bir saflaştırma işlemine gerek duyulmadan yenilikçi bir yöntem ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında sistemde yapılan parametre çalışmalarıyla, farklı çalışma koşulları altında sistemin performansı değerlendirilip, sistem için en uygun koşullar belirlenmiştir. Gliserin çözeltisi konsantrasyonu, elektrot malzemesi, elektrotlar arası mesafe, elektrolit, sıcaklık, çözelti karıştırılmasının etkisi, elektrolite ilave edilen katkı malzemesinin etkisi incelenerek hidrojen üretimine katkısı irdelenmiştir. Elektrolit olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanıldığı durumda elde edilen 0,4 M gliserin çözeltisi optimum çözelti olarak belirlenmiştir. En yüksek akım yoğunluğu değerine Zn/Zn elektrot çifti kullanıldığı durumda ulaşılmıştır. Bu değerler 0,5, 1 ve 1,5 V için sırasıyla 8,5, 17,7 ve 25,1 mA/cm<sup>2</sup> dir.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 09/01/2020  
Düzeltilme: 06/05/2020  
Kabul: 15/05/2020

### Anahtar Kelimeler

Hidrojen  
Biyodizel  
Gliserin  
Elektroliz  
Elektrokimyasal Yeniden  
Yapılandırma

### Keywords

Hydrogen  
Biodiesel  
Glycerol  
Electrolysis  
Electrochemical Reforming

## Effect of Different Parameters on Hydrogen Production by Electrochemical Reforming of Glycerol

### Abstract

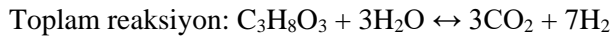
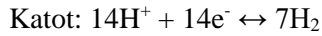
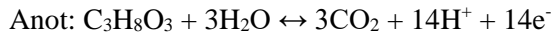
With the increasing need for new and clean energy, it is highly important to lean towards technologies based on renewable resources for hydrogen production as they are less harmful to environment and sustainable systems. Within the scope of this study, the aim was to convert glycerol, a by-product of biodiesel production, to hydrogen using electrochemical reforming and thus paving the way to convert glycerol to value-added chemicals and alternative fuels. Producing hydrogen from glycerol contributes also to the overall economy of biodiesel technology. By utilizing the functionality of 3 -OH groups present in the molecular structure of glycerol, hydrogen can be produced from glycerol. By this way, hydrogen production was achieved with an innovative method at high purity, without the need for further purification operation.

Within the context of the study, a parametric study was carried out. The experimental system was run under different operating conditions in order to determine the optimal conditions. Glycerol concentration, electrode material, distance between the electrodes, electrolyte, temperature, mixing effect and the effect of additives to electrolyte were investigated and their contributions to hydrogen production were investigated. When H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was used as the electrolyte, 0,4 M glycerol solution was determined as optimum solution. The highest current density value was achieved by using Zn/Zn electrode pair. The values were 8.5, 17.7 and 25.1 mA/cm<sup>2</sup> for 0.5, 1 and 1.5 V, respectively.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hidrojen temiz, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji sistemi sağlamak için en umut verici enerji taşıyıcısı olarak kabul edilmektedir. 21. yüzyılın, enerji-ekonomi-ekoloji uyumu açısından hidrojen çağı olması öngörülmekte ve hidrojenin geleceğin enerji senaryolarında önemli bir yere sahip olması beklenmektedir [1]. Hidrojenin üretiminde hammadde olarak fosil yakıtların kullanımının yanı sıra yenilenebilir kaynakların kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır. Biyoyakıtlardan hidrojen üretimi sırasında açığa çıkan karbon dioksit, bitkiler tarafından tutularak biyokütlelenin yeniden oluşmasını sağladığından biyoyakıtlardan hidrojen üretimi yenilenebilir olarak kabul edilmektedir [2]. Yenilenebilir bir biyoyakıt olan biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağların bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Biyodizel üretiminin yan ürünü olarak kütlece %10 mertebesinde gliserin meydana gelmektedir [3,4]. Çevresel ve ekonomik etkiler göz önüne alındığında, artan biyodizel üretim miktarı sonucunda talep fazlası olarak oluşan gliserinin değerli kimyasallara ve alternatif yakıtlara dönüştürülmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [5]. Gliserinin kimyasal yapısı incelendiğinde ve yapısında bulunan 3-OH molekülünün işlevselliği göz önüne alındığında, gliserin hidrojen üretimi için potansiyel bir hammadde durumunda görülmektedir [6]. Gliserinden hidrojen üretimi ele alındığında piroliz ve buharla yeniden yapılandırma [7-12], ototermal yeniden yapılandırma [14], sıvı faz katalitik yeniden yapılandırma [4,14-16] gibi pek çok yöntem olduğu görülmektedir. Belirtilen üretim yöntemlerinin çalışma şartları ve saf hidrojen elde edilebilirliğinin zorluğu gibi dezavantajları ele alındığında ve sistemler seçicilik, verim, maliyet açısından incelendiğinde gliserinden hidrojen dönüşümünün sağlanması için gliserinden elektrokimyasal yeniden yapılandırma ile hidrojen üretim yöntemi avantajlı bulunmuştur. Bu yöntem ile saf hidrojen üretimi ve ayrıştırılması tek bir aşamada düşük sıcaklıkta, atmosferik koşullarda gerçekleşmekte, sadece elektrik enerjisi tüketimi söz konusu olmaktadır [17]. Gliserinden elektrokimyasal yeniden yapılandırma yöntemiyle hidrojen üretiminde yapılan sistem iyileştirmeleri sonucunda gliserinden, reaktör hacmi bazında  $10 \text{ m}^3\text{H}_2/\text{gün-m}^3$  lük hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir [2].

Gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırması sırasında anot ve katotta aşağıda belirtilen reaksiyonlar gerçekleşmektedir [2].



Sistemde, toplam reaksiyondan da görüldüğü üzere 1 mol gliserinden 7 mol  $\text{H}_2$  oluşmaktadır. Oluşan hidrojenin 3 molü sudan gelmektedir. Çalışmanın ekonomik tarafı ele alındığında, “ihtiyaç duyulduğu anda hidrojen” (Hydrogen on Demand) prensibinin kullanımının avantajından yararlanılarak çevreyle dost hammaddeden hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir.

Elektrolitik proseslerde büyük ölçekli hidrojen üretimi için en çok kullanılan hammadde sudur. Ancak suyun elektrolizi ihtiyaç duyduğu yüksek teorik hücre voltajı ve elektroliz sisteminde oluşan aşırı gerilimler nedeniyle oldukça maliyetli bir sistemdir. Ayrıca suyun elektrolizinde bazı termodinamik sınırlamalar mevcuttur. Elektrokimyasal yeniden yapılandırma yönteminde, alkollerin oksidasyonu yapılarak bu termodinamik sınırlamaların üstesinden gelineceği düşünülmektedir [2]. Su ve yaygın alkollerin bazıları için  $80^\circ\text{C}$  ve  $1 \text{ A/cm}^2$  koşullarında gerçekleşen elektrolizde üretilen kilogram başına hidrojen için elektrik enerjisi girdileri Tablo 1’de karşılaştırılmıştır.

**Tablo 1.** Su ve farklı alkoller kullanan sistemin elektrik enerjisi girdileri [18]

|   | Su   | Metanol | Etanol | Etilen glikol | Gliserin | 1,2-Propandiol |
|---|------|---------|--------|---------------|----------|----------------|
| <b>Teorik Hücre Voltajı (V)</b>               | 1,23 | 0,02    | 0,69   | 0,70          | 0,76     | 0,76           |
| <b>Enerji Tüketimi (kWh/kg-H<sub>2</sub>)</b> | 55   | 0,6     | 18,49  | 18,76         | 20,37    | 20,37          |

Tablo 1’de belirtildiği gibi metanol, etanol, etilen glikol gibi hammaddelerin kullanılmasıyla elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminde teorik hücre voltajına bağlı olarak enerji tüketimlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak bu hammaddelerin hepsinin mevcut proseste kullanılabilmesi için öncesinde üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca metanol, etanol ve etilen glikol ilaç, kozmetik, temizlik, boya, çimento, cam, patlayıcı gibi farklı endüstri alanlarında halihazırda kullanılmaktadır. Oysa amaçlanan, hammaddeyi üretip üretilen hammaddeden H<sub>2</sub> üretmek yerine, yan ürün olarak ortaya çıkan hammaddelerin H<sub>2</sub> üretiminde kullanılmasıyla kaynakları değerlendirmek ve çok daha değerli hale getirmektedir. Biyodizel üretiminde yan ürün olarak oluşan gliserinin sistemde hammadde olarak kullanılmasıyla, prostesteki hammadde eldesi ve tedariki konusundaki olası problemler bertaraf edilmiş olunacaktır. Ayrıca gliserin birikiminin önüne geçilmesi çevre açısından da olumlu bir husustur. Bu kapsamda, endüstriye katkısı da ele alındığında gliserinden elektrokimyasal yöntemle hidrojen üretimi oldukça avantajlı konumdadır. Gliserin (1,2,3-propantriol) ve 1,2-propandiol karşılaştırıldığında, gliserinin yapısında 3 -OH grubu bulunurken 1,2-propandiol yapısından 2 -OH grubu bulunmaktadır. Bu durum doğrudan hidrojen üretimini etkileyeceğinden, elektrokimyasal yeniden yapılandırma yöntemiyle hidrojen üretiminde gliserin, 1,2-propandiole göre avantajlı konumdadır. Alkollerde OH gruplarının sayısının ve sterik pozisyonun elektrooksidasyonu etkilediği bilinmektedir. İncelenen farklı bir çalışmada, bazik ortamdaki alkol çözeltileriyle (butan-1,2,3,4 tetrol (4-OH), gliserin (3-OH), etilen glikol (2-OH)) Au çalışma elektroduyla yapılan CV çalışmaları OH- sayısının artmasıyla elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin (mA/cm<sup>2</sup>) arttığını göstermiştir. Bu durum, yapıdaki OH- sayısının artmasıyla polar yüzey alan (PSA) artması ve bu sayede elektrostatik etkiler nedeniyle moleküllerin elektrot üzerindeki elektrosorpsiyonunun olumlu şekilde etkilenmesi şeklinde açıklanmıştır [19]. Daha önce de belirtildiği gibi, gliserinden elektrokimyasal yeniden yapılandırma yöntemi ile hidrojen üretimi, saf hidrojen üretiminde tercih edilen yöntemlerden biri olan suyun elektrolizi ile karşılaştırıldığında da avantajlı durumdadır. Suyun elektrolizinde ihtiyaç duyulan teorik potansiyeller için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyulurken, gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırması sırasında gliserinin içerdiği -OH grubunun sahip olduğu yüksek enerji, dışarıdan sağlanacak enerji ihtiyacının bir kısmını karşılamaktadır [18]. Bu sayede suyun elektrolizine kıyasla gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırması önemli ölçüde düşük voltajlarda gerçekleşmektedir. Suyun elektrolizi için elektrik tüketimi teorik olarak 55 kWh/kg-H<sub>2</sub> iken gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırması için bu değer 20 kWh/kg-H<sub>2</sub>’dir. Enerji geri dönüşü, suyun elektrolizi ile H<sub>2</sub> üretimi yöntemine göre daha verimlidir [20].

Gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak Pt, Pd, Au gibi soy metallerin elektrot olarak kullanıldığı görülmüştür [21-24]. İncelenen çalışmalarda asidik ve bazik farklı elektrolit ortamlarında çalışılmıştır. Ortam pH’ının ve kullanılan elektrodun ürün çeşitliliğine etkisi görülmüştür.

Gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması farklı pH değerlerinde farklı elektrotlarda aktiflik göstermektedir. Kwon ve çalışma grubu (2011) araştırmalarında asidik, bazik ve nötr ortam şartlarında Pt ve Au elektrotlar kullanılarak gliserin oksidasyonu gerçekleştirmiş ve bazik ortamda gliserin oksidasyonunda Au elektrodun Pt elektroda göre 10 kat daha yüksek akım yoğunluğu verdiği belirtmişlerdir. Asidik koşullarda çalışıldığında ise Au’nun aktif olmadığını sadece Pt elektrotla çalışılabildiğini raporlamışlardır [25]. Bu durum çözelti pH’ı ve kullanılan elektrot çiftinin önemini göstermiştir. Muneeb ve çalışma grubu (2016) ise çalışmalarında Pd-Cu ve Pd/C katalizörlerinin etilen glikol, propilen glikol ve gliserinin elektrokimyasal oksidasyonundaki etkisini incelemiştir. Gliserin elektrokimyasal oksidasyonunda Pd-Cu/C katalizörünün hızı, Pd/C katalizöründen daha yüksek bulunmuştur. Pd/C katalizörü kullanıldığı durumda 0,023 mA/cm<sup>2</sup> olan akım yoğunluğu değeri, Pd<sub>63</sub>Cu<sub>37</sub>/C katalizörü kullanıldığında 14 katına çıkarak 0,332 mA/cm<sup>2</sup> değerine ulaşmıştır [26]. İncelenen çalışmayla Cu ilavesinin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına olumlu etkisi görülmüş ve soy olmayan farklı metallerin elektrot olarak sistemde kullanılması fikrinin önünü açmıştır. Hidrojen oluşum reaksiyonunun akım yoğunluğu değişiminin hidrojen adsorpsiyon entalpisine bağlılığını gösteren Volkan eğrisi de incelendiğinde Pt, Pd, Au gibi pahalı metallere alternatif olabilecek, yüksek aktiviteye sahip farklı metallerin varlığı dikkat çekmektedir.

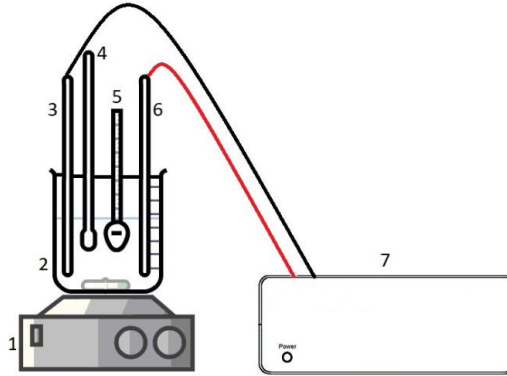
Gliserinin elektrokimyasal oksidasyonu sırasında oluşan ürünlerin nitel ve nicel olarak belirlenmesinde dörtlü kütle spektrometre, gaz kromatografi (GC), online yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) ve online elektrokimyasal kütle spektrometresi gibi farklı yöntem ve cihazlar kullanılmaktadır [25,27].

Ayrıca daha pratik bir yaklaşım olarak akım yoğunluğu-hidrojen üretim ilişkisinin incelenmesi de hidrojen oluşumunun belirlenmesinde bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Sasikumar ve çalışma grubu (2008) çalışmalarında, anotta Pt-Ru/C katalizör, katotta Pt/C katalizör kullanılarak metanol elektroliziyle hidrojen üretimini gerçekleştirmişlerdir. Metanol konsantrasyonu, hücre voltajı, sıcaklık, membran kalınlığı gibi parametreler çalışılmıştır. Deneyler, akım yoğunluğu ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) ve hidrojen üretim hızının ( $\text{cc}/\text{dk}$ ) birbirine paralel geliştiğini göstermiştir [28].

Bu bilgiler ışığında çalışmada, gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına etki eden faktörler potansiyel (voltaj) kontrollü olarak incelenmiştir. Çalışma sabit voltaj uygulamalarına karşı sistemin verdiği akım yoğunluğu cevaplarıyla değerlendirilerek kronoamperometrik yöntem kullanılmıştır. Elde edilen akım yoğunluğu değerleri hidrojen oluşumuyla ilişkilendirilerek, gliserin çözeltisi konsantrasyonu, çözeltinin karıştırılmasının etkisi, elektrot malzemesi, elektrotlar arası mesafe, sıcaklık, elektrolit türü ve farklı katkı malzemelerinin etkisi incelenmiştir. Literatürde geliştirilen yöntemlere ve kullanılan bileşenlere alternatifler üreterek gliserinden, daha ucuz ve verimli yollarla hidrojen oluşumu için yapılan çalışma kapsamında en uygun koşulların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca çalışmada, elektrokimyasal yeniden yapılandırma esnasında kullanılan enerji miktarını düşürerek maliyetlerin azaltılması ve suyun elektrolizine alternatif olarak gliserinin hammadde olarak kullanılmasıyla yenilenebilir kaynak entegrasyonuna fayda sağlanması amaçlanmıştır.

## 2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Çalışmada, elektrotlara uygulanan farklı potansiyeller sonucu elde edilen akım yoğunluğu değerleri değişen ortam koşullarına göre kaydedilmiştir. Akım yoğunluğu değerleri  $\text{H}_2$  oluşumuyla doğrudan ilişkili olduğundan bu sonuçlardan  $\text{H}_2$  oluşumuyla ilgili fikir elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, gliserin çözeltisi konsantrasyonu, elektrot malzemesi, elektrotlar arası mesafe, sıcaklık, çözeltinin karıştırılmasının etkisi, elektrolit ve katkı malzemesi ilavesi gibi farklı parametrelerin akım yoğunluğuna ve hidrojen oluşumuna etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen parametre çalışmalarıyla farklı çalışma koşulları altında sistemin performansı değerlendirilip, çalışma kapsamındaki optimum ve en uygun çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.



**Şekil 1.** Deney sistemi (1: manyetik karıştırıcı ısıtıcı (VELP SCIENTIFICA ARE), 2: elektroliz hücresi, 3: katot elektrot, 4: pH metre (WTW pH 3110), 5: termometre, 6: anot elektrot, 7: güç kaynağı (GW INSTEK PSP-405))

Deneyler Şekil 1'de verilen 0,25 L'lik elektroliz hücresinde gerçekleştirilmiştir. Sistem manyetik karıştırıcı ısıtıcı ile 25,13 rad/s hızda (240 RPM) sürekli karıştırıcı ve karıştırmasız olarak çalıştırılmıştır. Deneylerde elektrotlar arası mesafenin etkisini incelemek amacıyla elektrotlar aralarındaki mesafe 2 cm ve 6 cm olacak şekilde iki farklı durumda konumlandırılmıştır. Elektrokimyasal yeniden yapılandırma çalışmaları 20-90°C arasında artan sıcaklık koşullarında ve 90°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilerek sistem tepkileri incelenmiştir. Kullanılan gliserin çözeltilerinin atmosferik şartlarda kaynama noktası yaklaşık 100°C'dir [29]. Daha yüksek sıcaklıklarda, su molekülleri buharlaşıp, difüzyon kontrol prosesinde sapmalar oluşacağı ve akım değerleri düşüşler meydana geleceği için 90°C'den yüksek sıcaklıklara çıkılmamıştır. Ayrıca deney sırasında buharlaşmadan kaynaklı konsantrasyon farkının önüne geçebilmek için elektroliz hücresinin üzeri kapatılarak buharlaşan çözelti tekrar yoğunlaştırılmıştır.

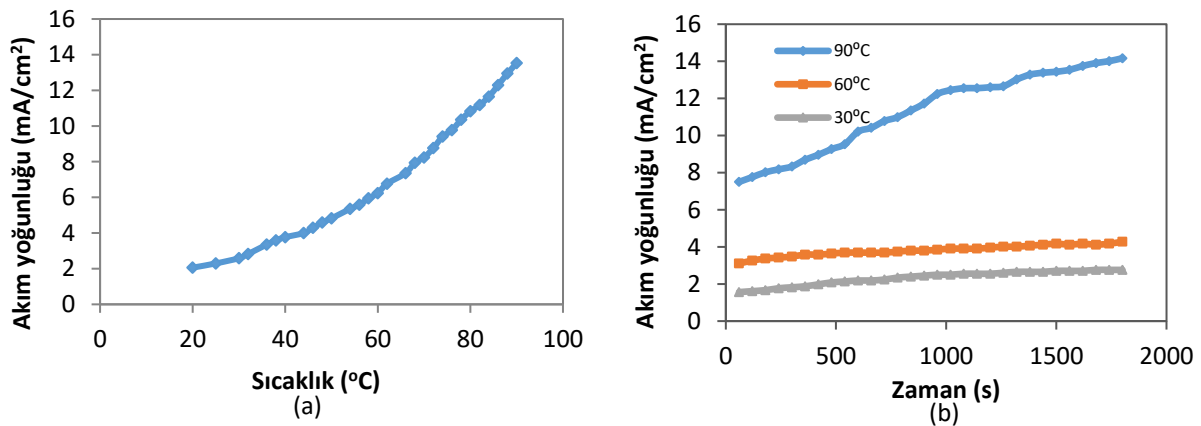
Gliserin konsantrasyonunun akım yoğunluğuna etkisinin incelenmesi ve en uygun çözelti konsantrasyonunun belirlenmesi amacıyla su ve 6 farklı konsantrasyonda gliserin (Atabay %99,8) çözeltisiyle çalışılmıştır. Çalışmada 10-20 cm<sup>2</sup> aralığına aktif yüzey alanına sahip farklı boyutlarda metal plaka elektrotlar kullanılmıştır. Farklı yüzey alanlarına sahip elektrotlarla gerçekleşen deneylerde akım yoğunluğu değerleri karşılaştırılarak elektrot boyutunun etkisi ortadan kaldırılmıştır. Çalışmada çinko (Zn), bakır (Cu), pirinç (Cu-Zn), fosfor bronz (Cu-Sn-P) gibi soy olmayan ucuz metaller ve alaşımlar elektrot olarak seçilmiştir. Deneyler asidik, nötr ve bazik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), fosforik asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), okzalik asit (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum sülfat (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), potasyum klorür (KCl), sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve sodyum klorür (NaCl) elektrolit olarak kullanılarak elektrolit türünün gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına etkisi incelenmiştir.

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

Bu çalışma kapsamında gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması yönteminde farklı parametrelerin hidrojen üretimi üzerine etkisi incelenmiştir. Paralel yürütülen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar farklı parametre başlıkları halinde sunulmuştur.

#### 3.1. Sıcaklığın Etkisi (Effect of Temperature)

0,4 M asidik gliserin çözeltisinin Cu-Cu elektrot çifti kullanıldığı durumda elektrokimyasal yeniden yapılandırılması farklı sıcaklıklarda incelenmiştir. Şekil 2a'da görüldüğü gibi 1V sabit voltaj altında 20-90°C arasında çalışılmış ve beklendiği üzere sıcaklığın artmasıyla akım yoğunluğu arttığı görülmüştür. Bu durum reaksiyon kinetiğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca tüm konsantrasyon değerleri için sıcaklığın artmasıyla çözelti viskozitesi azalmakta ve daha iyi iyon iletimi için ortam oluşmaktadır. Şekil 2b'de üç farklı sabit sıcaklıkta akım yoğunluğunun zamanla değişimi incelenmiş, 30 dakika süren deneylerde de aynı şekilde en yüksek akım yoğunluğu değerleri 90°C'de elde edilmiştir. Zaman aralığına karşılık farklı sıcaklıklarda sistemin tepkisinin incelendiği bu durum da elde edilen sonucu desteklemektedir. Sistem güvenliği ve maliyet açısından daha yüksek sıcaklıklara çıkılmamıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda deneylerde çalışma sıcaklığı 90°C olarak belirlenmiştir.

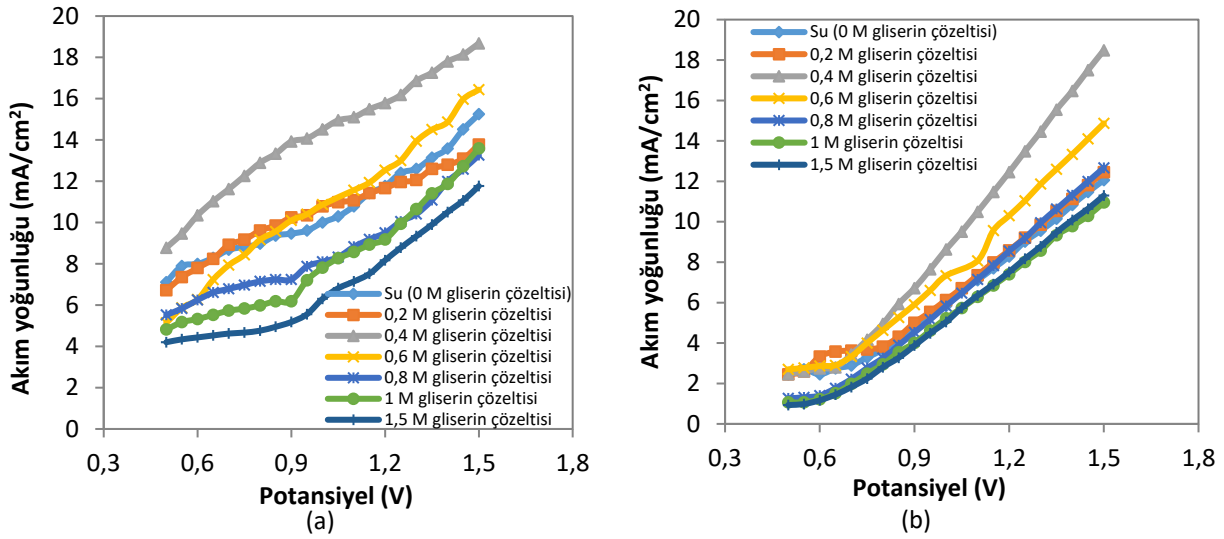


Şekil 2. 1 V sabit voltaj altında a) akım yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi b) akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda zamanla değişimi

#### 3.2. Çözelti Konsantrasyonunun ve Karıştırmanın Etkisi (Effect of Solution Concentration and Mixing)

Gliserin çözeltisi için en yüksek akım yoğunluğunu veren ve en yüksek hidrojen oluşumunun elde edildiği konsantrasyonun belirlenmesi amacıyla su ve 0,2 M-1,5 M arasında 6 farklı gliserin çözeltileriyle asidik ortamda (1 M 10 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesiyle 0,04 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi; pH≈1,5) çalışılmıştır. Deney hiç karıştırmanın olmadığı ve 25,13 rad/s hızda (240 RPM) karıştırılmalı durumlarda gerçekleştirilmiştir. Deney süresi boyunca çözelti sıcaklığı 90°C'de sabit tutulmuştur. Deneyde anot ve katot elektrodu olarak 7x1,5 cm boyutunda bakır (Cu) levha kullanılmıştır. Elektrotlar arası mesafe yaklaşık 2 cm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Elektrotlara uygulanan farklı potansiyeller sonucu elde edilen akım yoğunluğu değerleri kaydedilerek potansiyel kontrollü çalışılmıştır.

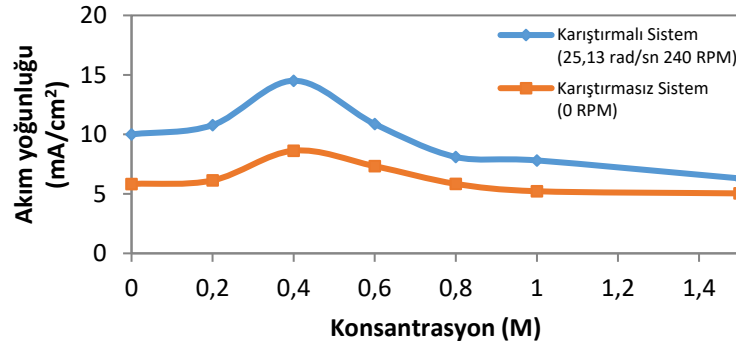




**Şekil 3.** Farklı konsantrasyonlardaki gliserin çözeltileri için a) 25,13 rad/s hızda (240 RPM) karıştırma durumunda ve b) karıştırma olmadığı durumda sabit sıcaklıkta potansiyel-akım yoğunluğu değişimi

Şekil 3a'da farklı konsantrasyonlarda gliserin çözeltilerinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması sırasında elde edilen polarizasyon eğrileri verilmiştir. Suyun ve farklı konsantrasyonlardaki gliserin çözeltilerinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmaları karşılaştırılmıştır. 0,4 M gliserin çözeltisi içeren deney verileriyle karşılaştırıldığında aynı potansiyel değerinde 0,4 M gliserin çözeltisinde suya göre daha yüksek akım yoğunluğu değerleri elde edilmiş ve daha fazla hidrojen üretimi gözlenmiştir.

Şekil 3b'de görüldüğü gibi gliserin çözeltisi karıştırılmadığı durumda polarizasyon eğrisinin şekli değişmiş ve "S eğrisi" oluşmuştur. Yaklaşık 0,8 V değerindeki başlangıç (onset) potansiyeli daha net görülmektedir. Karıştırmanın olmadığı sistemlerde  $H^+$  iyonları ortamdaki diğer iyonların difüzyon direnciyle yarışmakta, bu nedenle sistemden daha düşük akım yoğunluğu değerleri elde edilmekte ve daha az hidrojen oluşumu meydana gelmektedir.



**Şekil 4.** 90°C sıcaklıkta 1 V sabit voltaj değerine karşılık gelen akım yoğunluğu değerlerini çözelti konsantrasyonuna göre değişimi

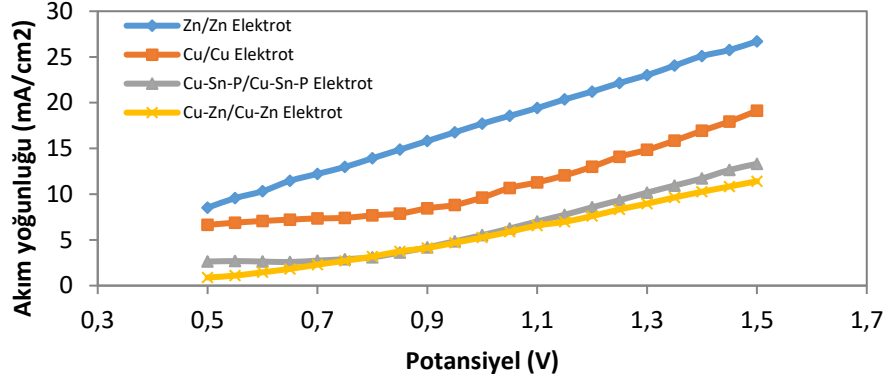
Şekil 4'te açıkça görüldüğü gibi, en yüksek akım yoğunluğu değeri 0,4 M gliserin çözeltisi kullanıldığı durumda 1V'a karşılık 14,5 mA/cm<sup>2</sup> bulunmuştur. Bu çözelti konsantrasyonu çalışmanın ileriki aşamalarında kullanılmak üzere optimum çözelti olarak belirlenmiştir. Konsantrasyonun artmasıyla akım yoğunluğu değerlerinde 0,4 M'a kadar artış meydana gelmiştir. Daha yüksek konsantrasyon değerleri için akım yoğunluğu düşmüştür. Bu davranışa benzer duruma literatürdeki farklı alkolle yapılan bir çalışmada da rastlanmıştır [28].

Ayrıca konsantrasyonun artmasıyla çözelti içerisindeki kütlece yüzde gliserin miktarına bağlı olarak çözeltinin viskozitesi de artmakta ve bu durum çözelti içindeki iyonların kütle transferini ve dolayısıyla hidrojen oluşumunu olumsuz etkilemektedir [30]. Çalışmanın ileriki aşamalarında kullanılmak üzere belirlenen 0,4 M'lık gliserin çözeltisinin viskozite değerleri 20°C ve 90°C çalışma sıcaklıkları için sırasıyla 1,1 cP ve 0,3379 cP'dir. Düşük viskoziteye sahip, sabit konsantrasyonda gliserin çözeltisinin

kullanılmasıyla sistemdeki iyon iletkenliği olumsuz etkilenmemekte çözelti içindeki kütle transfer dirençleri artmamaktadır.

### 3.3. Elektrot Malzemesinin ve Elektrotlar Arası Mesafenin Etkisi (Effect of Electrode Material and Distance Between Electrodes)

Literatürde genellikle kullanılan soy metallere alternatif olarak ucuz metallerin gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasında elektrot olarak kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. Bu kapsamda anot/katot olarak sırasıyla Cu/Cu, Zn/Zn, Cu-Zn/Cu-Zn ve Cu-Sn-P/Cu-Sn-P elektrot çiftlerinin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasındaki performansları incelenmiştir.



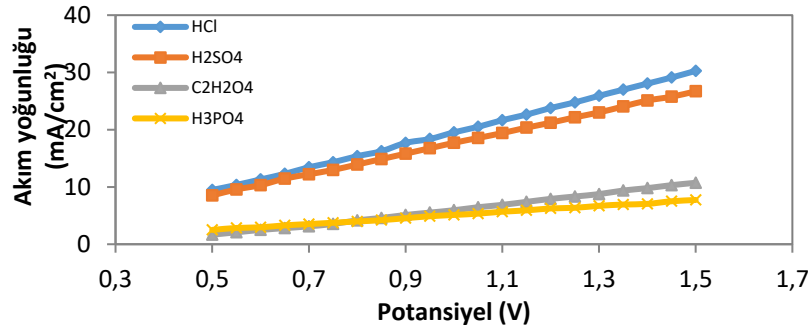
**Şekil 5.** Farklı elektrot çiftlerinin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması üzerine etkisi

Deneylerde 0,4 M gliserin ve 0,04 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ten oluşan çözelti kullanılmıştır. 90°C sabit sıcaklıkta gerçekleşen deneylerde Zn/Zn ve Cu/Cu elektrot çiftleri karşılaştırıldığında 1 V'da elde edilen akım yoğunluğu değerlerine göre yaklaşık 2 katlık bir artış görülmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, farklı elektrot çiftlerinin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına etkisinin incelendiği deneylerde en yüksek akım yoğunluğu değerine Zn/Zn elektrot çifti kullanıldığı durumda ulaşılmıştır. Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında elektrot olarak Zn/Zn kullanılmasına karar verilmiştir.

Ayrıca elektrotlar arası uzaklık da bu çalışma kapsamında incelenen ve oldukça önemli bir parametredir. Zn/Zn elektrot kullanılarak ve diğer tüm parametrelerin eşit olduğu iki paralel deney yürütülmüştür. Elektrotlar arası uzaklığın 2 cm olduğu durumda 90°C'de 1 V potansiyele karşılık gelen akım yoğunluğu değeri 17,71 mA/cm<sup>2</sup> iken, elektrotlar arası uzaklık 6 cm olduğunda akım yoğunluğu değeri 7,5 mA/cm<sup>2</sup>'ye düşmüştür. Elektrotların, bu çalışmada kullanılan deney sisteminde olduğu gibi birbirine yakın konumlandırılması, çözelti dirençlerinin en az seviyede tutulmasına etki ederek daha yüksek akım yoğunluğunu ve bağlantılı olarak daha yüksek hidrojen oluşumunu sağlamaktadır.

### 3.4. Elektrolitin Etkisi (Effect of Electrolyte)

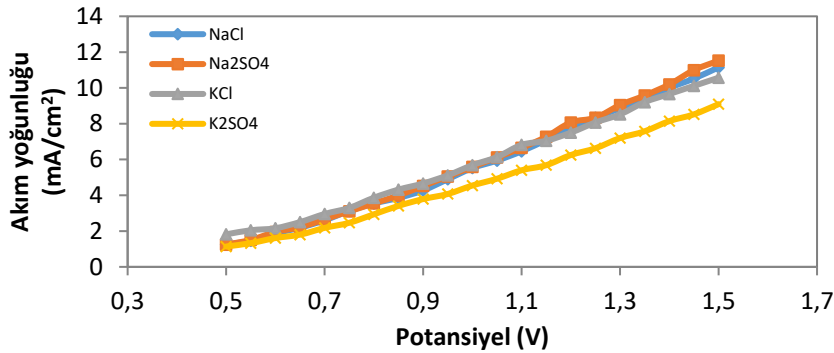
Gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması farklı elektrolit ortamlarında ve farklı pH'larda gerçekleşmektedir. Gliserin elektrooksidasyonunda başlangıç (onset) potansiyeli pH'dan çok etkilenmemesine rağmen ürün dağılımları pH'a doğrudan bağlıdır. Çalışmada asidik ortam koşullarında çalışmak amacıyla elektrolit olarak HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ve C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün etkisi incelenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi 0,4 M gliserin çözeltisine 1 M 10 mL asit ilaveleriyle Zn/Zn elektrot çiftinin kullanılmasıyla gerçekleşen deneylerde en yüksek akım yoğunluğu değeri HCl kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Ancak bu durumda katotta H<sub>2</sub> gazı, anotta ise CO<sub>2</sub> ve Cl<sub>2</sub> gazı meydana gelmektedir. Anotta oluşan bu gaz karışımını ayırmak zor olduğundan ve CO<sub>2</sub> saf olarak elde edilemediğinden HCl kullanımı tercih edilmemiştir. HCl'ten sonra en yüksek akım yoğunluğu elde edilen elektrolit H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'tir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanıldığı durumda katotta H<sub>2</sub>, anotta CO<sub>2</sub> oluşmaktadır. Bu nedenle gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasında elektrolit olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'in kullanılması uygun görülmüştür. Çalışmada elektrolit olarak kullanılan kuvvetli asitlere kıyasla zayıf asit kullanıldığı durumda daha düşük akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Bu durumun zayıf asitlerin düşük K<sub>a</sub>'ya sahip olması ve ortama yeteri miktarda H<sup>+</sup> iyonu verememesinden kaynaklanmaktadır.



**Şekil 6.** Farklı elektrolitlerin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması üzerine etkisi

Bazik ortam koşullarında çalışmak için 0,4 M gliserin çözeltisine 1 M 10 mL NaOH çözeltisi ilave edilmesiyle oluşan çözeltinin (pH≈12,5) elektrokimyasal yeniden yapılandırılması incelenmiş ancak çok düşük akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir (0,1-0,5 mA/cm<sup>2</sup>). Bu durum bazik ortam koşullarının Zn/Zn elektrot çifti kullanıldığı durumda gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırması için uygun olmadığını göstermektedir.

Çalışmada nötr ortam elde etmek amacıyla farklı tuzlar kullanılmıştır. Potasyum ve sodyumun sülfat ve klorlu tuzlarının ilavesinin gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına etkisi incelenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi ilave edilen tüm tuzlarda polarizasyon eğrisi trendi aynı olmakla birlikte sodyum tuzlarının ilavesiyle daha yüksek akım yoğunluğu değerlerine ulaşılmıştır. Ancak bu değerler elektrolit olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HCl kullanıldığı durumla karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır. Bu durum literatürde incelenen bir çalışma tarafından da desteklenmektedir [31].



**Şekil 7.** Farklı tuzların gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılması üzerine etkisi

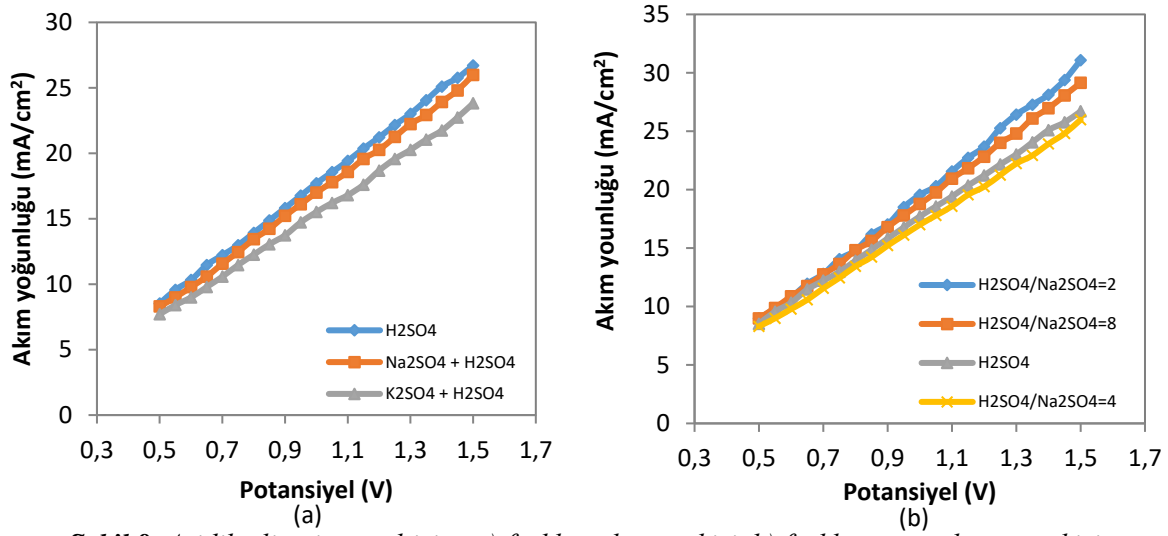
### 3.5. Asidik Elektrolite Katkı Malzemesi Olarak Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Tuzlarının Eklenmesinin Etkisi (Effect of Addition of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Salts as Additives to Acidic Electrolyte)

Çalışmanın bir diğer bölümünde asidik gliserin çözeltisine (pH≈1,5) tuz ilaveleriyle performans arttırılmaya çalışılmıştır. Elektrolit olarak H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanımı seçildiğinden ortak iyon oluşturması amacıyla farklı sülfat tuzları gliserin çözeltisine eklenmiştir. 0,4 M gliserin ve 0,04 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ten oluşan çözeltilere 2,5 mmol (0,25 M, 10 mL) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltileri ilave edilerek hidrojen oluşum performansı üzerine etkisi incelenmiştir.

Bu tür katkı malzemeleri ilavesiyle elektroforetik etkilerin gözlemlenmesi beklenmektedir. Sistemde dış bir elektrik alanının etkisiyle yüklü bir parçacığın çözelti içerisinde yönlendirilmesi söz konusu olacaktır. Molekül ağırlığı büyük olan sodyum ve potasyum iyonları katoda doğru ilerlerken beraberinde H<sup>+</sup> iyonlarını da sürükleyecek ve katotta daha fazla H<sub>2</sub> oluşumuna neden olacaktır. Ancak asidik gliserin çözeltisine farklı katkı maddeleri ilavesiyle gerçekleşen elektrokimyasal yeniden yapılandırma sonrası elde edilen Şekil 8a'daki polarizasyon eğrileri incelendiğinde, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tuzlarının ilavesinin akım yoğunluğu üzerinde belirgin bir etkisi kaydedilememiştir.

Hem polarizasyon eğrisindeki akım yoğunluğu değerleri incelendiğinde hem de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tuzlarının su ve gliserin içindeki çözünürlükleri incelendiğinde [32] Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanımı daha avantajlı görülmektedir. Ayrıca biyodizel üretiminde gliserinin yanında Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de oluşmaktadır. Bu nedenle sistemi

daha iyi simüle edebilmek amacıyla ortama  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  eklenmesi ve etkisinin incelenmesi anlamlı bulunmuştur. Bu amaçla farklı oranlarda  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanılmasıyla çalışmalara devam edilmiştir. Kullanılan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  miktarı (10 mL 1 M) sabit tutularak farklı konsantrasyonlarda (0,5 M, 0,25 M ve 0,125 M) 10 mL  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ilaveleri yapılmıştır. Bu durumda asit/tuz oranı 2, 4 ve 8 olan çözeltiler elde edilmiştir. Şekil 8b’de görüldüğü gibi en yüksek akım yoğunluğu değeri  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Na}_2\text{SO}_4$  oranının 2 olduğu durumda elde edilmiştir. Ancak sadece  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kullanıldığı duruma kıyasla akım yoğunluğu değerlerinde çok büyük bir artış görülmemektedir.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{K}_2\text{SO}_4$  tuz ilaveleri  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ortamıyla kıyaslandığında farklı ürün dağılımları meydana gelmekte ancak hidrojen üretimi için uygun bulunmamıştır.



Şekil 8. Asidik gliserin çözeltisine a) farklı tuzların etkisi, b) farklı tuz oranlarının etkisi

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmada gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılanmasına etki eden gliserin çözeltisi konsantrasyonu, elektrot malzemesi, elektrotlar arası mesafe, elektrolit, sıcaklık, çözelti karıştırılmasının etkisi, katkı malzemelerinin etkisi gibi parametreler incelenmiştir. 0,4 M gliserin ve 0,04 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ’ten oluşan çözelti çalışılan aralıkta optimum çözelti olarak belirlenmiştir. Kullanılan elektrot çiftleri arasından en yüksek akım yoğunluğu değerine Zn/Zn elektrot çifti kullanıldığı durumda ulaşılmıştır. Zn/Zn ve Cu/Cu elektrot çiftleri kullanıldığı durumlarda 1 V potansiyel karşılık elde edilen akım yoğunluğu değerleri sırasıyla, 17,7 ve 9,6  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ’dir. Zn/Zn elektrot çifti kullanıldığında akım yoğunluğu değeri yaklaşık 2 katına çıkmıştır. Zn/Zn elektrot kullanıldığı durumda 1 V potansiyelde elde edilen akım yoğunluğu değeri elektrotlar arasındaki uzaklığın 2 cm olduğu durumda geçerlidir. Elektrotlar arası uzaklık 6 cm’e çıktığında akım yoğunluğu yaklaşık %60 azalarak 7,5  $\text{mA}/\text{cm}^2$  değerine düşmüştür. Deneysel sonuçlar gliserin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasında Zn/Zn elektrot kullanıldığı durumda asidik ortamın daha uygun olduğunu göstermiştir.

Çalışmada gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasının suyun elektrolizine göre çok daha düşük potansiyelerde gerçekleştiği ve daha yüksek akım yoğunluğu elde edildiği görülmektedir. Elde edilen akım yoğunluğu değerleri doğrudan oluşan hidrojen miktarıyla ilişkilendirildiğinden, hidrojen üretimi için ucuz, verimli ve yenilenebilir kaynaklara dayalı bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel sonuçlar, gliserinden düşük sıcaklık ve atmosferik basınç koşullarında saf hidrojen üretiminin mümkün ve uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Literatürde gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasına yönelik farklı çalışmalar mevcuttur [2, 27, 33]. Literatürdeki bu çalışmalar, mevcut çalışmamız ile karşılaştırıldığında sabit potansiyel altında daha yüksek akım yoğun değerleri elde ettiğimiz görülmüştür. Bu sonuç çalışmamız açısından umut vadeden bir sonuçtur. Ayrıca çalışmamızda, gliserinin elektrokimyasal yeniden yapılandırılmasında soy olmayan metallerin kullanılmasıyla ucuz elektrotlarla gliserinden hidrojen üretimi sağlanmıştır. Bunun yanı sıra, biyodizel üretiminde gliserinin yanında oluşan safsızlıkların ve farklı katkı malzemelerinin sisteme etkilerinin incelenmesi çalışmaya özgünlük katmaktadır.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)**

Bu çalışmanın bir bölümü Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 06/2019-03) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Aslan Ö., Özcan B. Sürdürülebilir Kalkınma ve Hidrojen Enerjisi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3, 2, (152-160), (2008).
- [2] Marshall AT, Haverkamp RG. Production of hydrogen by the electrochemical reforming of glycerol-water solutions in a PEM electrolysis cell. *Int. J. Hydrogen Energy*, 33, (4649-4654), (2008).
- [3] Karinen RS, Krause AOI. New biocomponents from glycerol. *Appl Catal A*, 306, (128-133), (2006).
- [4] Özgür ÖD, Uysal BZ. Hydrogen production by aqueous phase catalytic reforming of glycerine. *Biomass and Bioenergy*, 35, (822-826), (2011).
- [5] Melero JA, Vicente G., Morales G., Paniagua M., Moreno J.M., Roldan R., Ezquerro A., Perez, C. Acid-catalyzed Etherification of Bio-glycerol and Isobutylene over Sulfonic Mesoporous Silicas. *Applied Catalysis A: General*, 346, 1-2, (44-51), (2008).
- [6] Uysal BZ. Biyodizel Prosesi Yan Ürünü Gliserinin Saflaştırılması ve Değerlendirilmesi. *Biyoyakıt*, 2, (22-24), 2006.
- [7] Czernik S., French R., Feik C., Chornet, E. Production of hydrogen from biomass-derived liquids. *Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review, Colorado, NREL/CP-570-28890*, (2000).
- [8] Hirai T., Ikenaga N., Miyake T., Suzuki T. Production of hydrogen by steam reforming of glycerin on ruthenium catalyst. *Energy & Fuels*, 19, (1761-1762), (2005).
- [9] Adhikari S., Fernando S., Bricka RM, Steele PH, Haryanto, A. Conversion of glycerol to hydrogen via a steam reforming process over nickel catalysts. *Energy Fuel*, 22, 2, (1220-1226), (2008).
- [10] Czernik S., French R., Feik C., Chornet E. Hydrogen by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion process. *Ind Eng Chem Res*, 41, (4209-4215), (2002).
- [11] Slinn M., Kendall K., Mallon C., Andrews J. Steam reforming of biodiesel byproduct to make renewable hydrogen. *Bioresour Technol*, 99, (5851-5858), (2008).
- [12] Swami SM, Abraham MA. Integrated catalytic process for conversion of biomass to hydrogen. *Energy Fuel*, 20, (2616-2622), (2006).
- [13] Dauenhauer PJ, Salge JR, Schmidt LD. Renewable hydrogen by autothermal steam reforming of volatile carbohydrates. *J Catal*, 244, (238-247), (2006).
- [14] The North American Catalysis society. Hydrogen production by aqueous-phase reforming of glycerol on supported metal catalysts. <http://www.nacatsoc.org/20nam/abstracts/O-S12-14.pdf> Son erişim tarihi:07.10.2018
- [15] Cortright R. D., Davda, R. R., Dumesic, J. A. Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, 418, (964-966), (2002).
- [16] Iriondo A., Barrio VL, Cambra JF, Arias PL, Guemez MB, Navarro RM. Hydrogen production from glycerol over nickel catalysts supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modified by Mg, Zr, Ce or La. *Top Catal*, 49, (46-58), (2008).

- [17] Yörük Ö., Zıraman DU, Doğan ÖM, Uysal BZ. Çan Linyitinden Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretiminde Çeşitli Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(4), 957-968, (2019).
- [18] Chen YX, Lavacchi A., Miller HA, Bevilacqua M., Filippi J., Innocenti M., Marchionni A., Oberhauser W., Wang L., Vizza F. Nanotechnology makes biomass electrolysis more energy efficient than water electrolysis. Nat. Commun. 5, 4036, (2014).
- [19] Enea, O., Ango, JP. Molecular structure effects in electrocatalysis-I. Oxidation of polyols (C2- C6) on Pt and Au electrodes. Electrochimica acta, 34, 3, (391-397), (1989).
- [20] De Paula J., Nascimento D., Linares JJ. Electrochemical reforming of glycerol in alkaline PBI-based PEM reactor for hydrogen production. Chemical Engineering Transactions, 41, (205-210), (2014).
- [21] Othman RM, Ahmad A. Electrochemical Oxidation Of Glycerol Using Gold Electrode. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 19, 2, (291-299), (2015).
- [22] Arjona N., Rivas S., Alvarez-Contreras L., Guerra-Balcazar M., Ledesma-Garcia J., Kjeang E., Arriaga G. Glycerol electro-oxidation in alkaline media using Pt and Pd catalysts electrodeposited on three-dimensional porous carbon electrodes. New J.Chem., 41, 1854, (2017).
- [23] Pulido DFQ, Kortenaar MVT, Hurink, J. L., Smit GJM. A practical approach in glycerol oxidation for the development of a glycerol fuel cell. Trends Green Chem., 3, 1, 5, (2017).
- [24] Schell M., Xu X., Zdraveski Z. Mechanism for the Electrocatalyzed Oxidation of Glycerol Deduced from an Analysis of Chemical Instabilities. The Journal of Physical Chemistry, 100, 49, (19862-19869), (1996).
- [25] Kwon Y., Schouten KJ, Koper TM. Mechanism of the Catalytic Oxidation of Glycerol on Polycrystalline Gold and Platinum Electrode. ChemCatChem, 3, 7, (1176-1185), (2011).
- [26] Muneeb O., Estrada J., Tran L., Nguyen K., Flores J., Hu S., Fry-Petit AM, Scudiero L., Ha S., Haan JL. Electrochemical oxidation of polyalcohols in alkaline media on palladium catalysts promoted by the addition of copper. Electrochimica Acta, 218, (133-139), (2016).
- [27] Yahiro H., Matsunaga Y., Asamoto M., Yamaji T. Low Potential Electrolysis of Aqueous Glycerin Using Polymer Electrolyte Membrane. ECS Transactions 25, 1, (1943-1949), (2009).
- [28] Sasikumar G., Muthumeenal A., Pethaiah SS, Nachiappan N., Balaji R. Aqueous methanol eletrolysis using proton conducting membrane for hydrogen production. International journal of hydrogen energy, 33, 21, (5905-5910), (2008).
- [29] GP Association. Physical properties of glycerine and its solutions. Glycerine Producers' Association (1963).
- [30] Segur JB., Oberstar HE. Viscosity of glycerol and its aqueous solutions. Industrial & Engineering Chemistry, 43, 9, (2117-2120), (1951).
- [31] James OO, Sauter W., Schröder, U. Towards selective electrochemical conversion of glycerol to 1, 3-propanediol. RSC advances, 8, 20, (10818-10827), (2018).
- [32] Kondo T., Kamikawa M., Oka K., Matsuo T., Tanto M. Glycerin purification method. U.S. Patent No. 8,940,947, (2013).
- [33] Simões, M., Baranton, S., Coutanceau, C. Electrochemical valorisation of glycerol. ChemSusChem, 5, 11, (2106-2124), (2012).

## Determination of some trace elements with ICP-OES in Hirfanlı dam lake

Şükrü KALAYCI 

Gazi University Vocational School of Technical Sciences, Department of Chemistry Technology, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, some trace elements in it are summarized by examining the water of Hirfanlı Dam Lake, which is used for irrigation of surrounding agricultural areas, recently. Dam water samples were collected from 3 different distances: A, B, C. ICP-OES technique was used for determination of trace elements in these water samples. The validation of the method was performed and the suitability of trace elements to water regulation was compared.

### Article Info:

Research article  
 Received: 10/04/2020  
 Revision 13/05/2020  
 Accepted: 15/05/2020

### Highlights

- ICP-OES.
- Some Trace Elements.
- Hirfanlı Dam Lake

### Keywords

ICP-OES  
 Iron  
 Copper  
 Lead  
 Cadmium  
 Chromium  
 Nickel  
 Zink  
 Molybdenum  
 Selenium  
 Hirfanlı Dam Lake

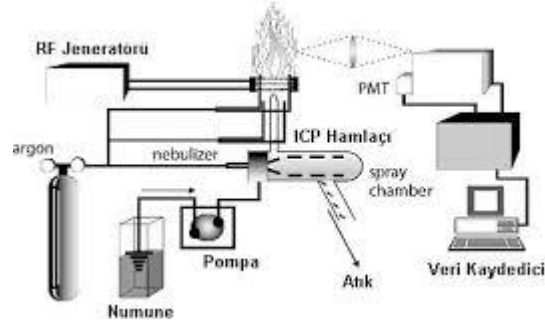


Figure A. ICP-OES Device flow chart

**Purpose:** In this study, Increasing the amount of dissolved trace elements affects the quality of the water and causes the water to become contaminated. Some trace elements in the dam water used in agricultural areas were determined. It was determined that the pollution rate in the dam water increased.

**Theory and Methods:** Trace elements are very important for the biological activities of living things. People get trace elements from nutrients. Analysis of trace elements in the dam lake water was done with Perkim Elmer Optima 5300 Dv model device. Using this method, iron, copper, lead, cadmium, chromium, nickel, manganese, zinc, arsenic, molybdenum and selenium elements in the water samples taken from Hirfanlı Dam lake were determined.

**Results:** Standard solutions of analytical purity salts of these elements to be measured were prepared and calibrations were performed at appropriate wavelengths. First, the reference standard Ni amount, and then the amount of trace elements in the water samples were measured. The measured values are given in section 3.

**Conclusion:** We applied the method we prepared to the certified reference substance first. It is seen that the measured values are very close to the values in it. It was determined that the results of the analysis were measured with high sensitivity. The trace elements in Hirfanlı Dam Lake water were measured with the same method and the results were given as 95% confidence interval and the average of 5 measurements. The measured values decrease as they move away from the dam.

These values are below the metal values of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs in aquatic environments.



## Hirfanlı baraj gölünde bazı eser elementlerin ICP-OES ile tayini

Şükürü KALAYCI

Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojisi Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

### Öz

Bu çalışmada, Kızılırmak üzerine kurulmuş olan Hirfanlı Baraj Gölü'nde eser elementlerin tayin için ICP-OES kullanıldı. Hirfanlı Baraj Gölü'nün değişik yerlerinden polietilen şişelere bir iki mililitre HCl eklenerek su örnekleri alındı. Bu örneklerdeki eser elementler, Perkin Elmer marka ICP-OES cihazıyla tayin edildi.

ICP-OES cihazıyla, barajdan alınan su örneklerindeki demir, bakır, kurşun, kadmiyum, krom, nikel, çinko, molibden ve selenyum elementleri tayin edildi. Uygun standart çözeltilerle belirli dalga boylarında elementlerin kalibrasyon işlemi yapıldı. Cihaz önce sertifikalı örnekteki elementlerin ölçümleri yapılarak duyarlılığı tespit edildi. Daha sonra su örneklerindeki elementlerin analizleri yapıldı. Baraj gölüne en yakın yerde yapılan ölçümlere göre; Fe (III)  $40 \pm 0,3 \mu\text{g/L}$ , Cu (II)  $10 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ , Pb (II)  $25 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ , Cd (II)  $18 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ , Cr (III)  $15 \pm 0,2 \mu\text{g/L}$ , Ni (II)  $12 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ , Zn (II)  $22 \pm 0,2 \mu\text{g/L}$ , Mo (VI)  $8 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ , Se (IV)  $35 \pm 0,3 \mu\text{g/L}$  olarak % 95 güven aralığı ve 4 ölçümün sonunda bulunmuştur.

### Determination of some trace elements with ICP-OES in Hirfanlı dam lake

### Abstract

In this study, ICP-OES was used to determine trace elements in Hirfanlı Dam Lake, which was established on Kızılırmak. Water samples were taken from polyethylene bottles from different parts of Hirfanlı Dam Lake by adding two milliliters of HCl. Trace elements in these examples were determined by Perkin Elmer ICP-OES device.

Iron, copper, lead, cadmium, chromium, nickel, zinc, molybdenum and selenium elements in the water samples from the dam were determined with the ICP-OES device. Calibration of the elements at certain wavelengths was performed with suitable standard solutions. The sensitivity of the elements in the certified sample was made by first measuring the device. Then, analysis of the elements in the water samples was made. According to the measurements nearest to the dam lake; Fe (III)  $40 \pm 0.3 \mu\text{g/L}$ , Cu (II)  $10 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$ , Pb (II)  $25 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$ , Cd (II)  $18 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$ , Cr (III)  $15 \pm 0.2 \mu\text{g/L}$ , Ni (II)  $12 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$ , Zn (II)  $22 \pm 0.2 \mu\text{g/L}$ , Mo (VI)  $8 \pm 0.1 \mu\text{g/L}$  Se (IV) was found as  $35 \pm 0.3 \mu\text{g/L}$  at 95% confidence interval and after 4 measurements.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 10/04/2020

Düzeltilme: 13/05/2020

Kabul: 15/05/2020

### Anahtar Kelimeler

ICP-OES

Demir

Bakır

Kurşun

Kadmiyum

Krom

Nikel

Çinko

Molibdenyum

Selenyum

### Keywords

ICP-OES

Iron

Copper

Lead

Cadmium

Chromium

Nickel

Zinc

Molybdenum

Selenium

Hirfanlı Dam Lake

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hirfanlı Barajı, Kırşehir ilinde, Kırşehir ile Şereflikoçhisar arasında, Kızılırmak üzerinde 1953-1959 yılları arasında inşa edilmiş kurulmuş olan, enerji üretimi ve taşkın kontrolü amaçlı bir barajdır. Baraj gölü, yore insanların balıkçılık yaparak geçinmelerinde önemli bir rolü vardır. Ayrıca baraj gölünün suyu, tarımsal faaliyetlerde de kullanılmaktadır. Son zamanlardaki baraj gölünün suyunun kirlenmesi ekolojik dengesini de bozmuştur. Özellikle baraj gölü çevresinde bulunan tarım arazilerinin sulamasında kullanılmaktadır. Araziler sulandıktan sonra toprak üzerinde beyaz renkli bir tortu bırakmaktadır. Tarımsal ürünlerin zarar görmesi üzerine baraj suyunu özellikle eser elementler açısından analizi yapılmak istendi.

Su kirliliği, kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini olumsuz etkilemesi sonucunda su kalitesi, ekolojisini ve insan sağlığını bozmaktadır [1].



Elementler doğada farklı formlarda bulunur ve bu elementler vücudun farklı işlevleri yerine getirdiği için çok önemlidir. Eser elementler biyolojik, kimyasal ve moleküler seviyelerde hücre fonksiyonları için çok önemlidir. Gıdalarda ve sularda pek çok element bulunur. Bunların derişmlerinin bilinmesi de önemlidir. İnsanlar, bu katyon eksikliklerini beslenmede kullandığı bitkilerden elde ederler. K, Ca, Mg, Cr, Co, Fe, F, I, Cu, Mn, Mo, Ni, Se ve Zn gibi temel elementler için insan besin gereksinimlerini karşılarlar [2]. Pb, As ve Cd gibi birçok metalin potansiyel olarak toksik olduğu bilinmektedir [3]. Kemiklerde birikme olasılığı ile kurşun kalsiyumun yerini alarak metabolik bir zehir gibi davranabilir. Diğer taraftan kadmiyum karaciğerde ve böbreklerde birikebilir. Bazen, bu eser elementlerin günlük alımı izin verilen seviyelerin üstüne çıkabilir. Bu durumda, toksit etki söz konusu olabilir. Gıdalarda özellikle toksik etki yapacak elementlerin analizi oldukça önemli önemlidir [4].

Güneydoğu Amerika Birleşik Devleti'nde bulunan Tuskegee Gölü'ndeki su, tortu ve balık numunelerindeki eser elementlerin derişimleri araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen eser elementlerin değerlerinin standartların altında olduğu bulunmuştur [5].

CM-PEHA reçinesi kullanılarak katı faz ekstraksiyonu yöntemi ile içme ve yer altı sularında 10 eser element (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V ve Zn) toplandıktan sonar ICP-OES ile tayinleri yapılmıştır [6]. Başka bir çalışmada TiO ile doldurulmuş mikro kolondan geçirilen su örnekleri zenginleştirilerek ICP-OES ile tayinleri yapılmıştır [7].

Çin'deki Dan nehrindeki çözünmüş eser elementlerin, dağılımları, su kaynakları ve su kalitesi değerlendirmesi yapılmıştır. Nehir suyundan alınan 99 numune analiz edilmiş ve As, Sb, Cd, Mn ve Ni'nin başlıca kirleticiler olduğu tespit edilmiştir [8]. Kuzey Çin'deki Dali Gölünün yüzey tortularında zararlı olan eser elementlerin dağılımları yapılmıştır [9].

Eser elementlerin tayinin de elektrokimyasal yöntemlerde kullanılmıştır. Gıdalarda bulunan eser elementler, diferansiyel puls polarografisi yöntemiyle tayinleri için yöntem geliştirildi. Bu yöntemden yararlanarak inek sütünde [10], inek karaciğerinde [11], koyun karaciğerinde [12], karalahanada [13], şarapta [14] ve kuru üzümde [15] eser elementler tayin edilmiştir.

Eser elementlerin tayinin de başka yöntemler de kullanılır. Su içerisinde bulunan eser elementler voltametri yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Burada çalışma elektrot olarak modifiye elektrot kullanılmıştır [16]. Başka bir çalışma da deniz, göl ve kuyu suyunda anodic sıyırma voltametri yöntemini kullanarak kurşun ve civa tayini yapılmıştır [17].

Bu çalışmada, hırfanlı baraj gölünden alınan su örneklerinde bulunan eser elementlerin ICP-OES cihazı ile tayinleri yapıldı. Önce tayin edilecek çözeltilerin standart çözeltilerinden kalibrasyon işlemleri yapıldı. Sertifikalı madde ICP-OES ile tayinleri yapılarak sonuçların % hata değerleri bulundu. Ardından baraj suyunun içerisindeki eser elementlerin analizleri yapıldı.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Kırşehir ilinde, Kırşehir ile Şereflikoçhisar arasında, Kızılırmak üzerinde 1953-1959 yılları arasında inşa edilmiş kurulmuş olan, enerji üretimi ve taşkın kontrolü amaçlı bir barajdır. Kaya gövde dolgu tipi olan baraj 2.000.000 m<sup>3</sup> gövde hacminde ve akarsu yatağından 78 metre yükseklikindedir. Normal su kotunda göl hacmi 5.980 hm<sup>3</sup>, normal su kotunda gölalanı 263,00 km<sup>2</sup>'dir. 128 MW güç kapasitesindeki HES (hidroelektrik santrali) yılda 400 GWh elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadır.

Hırfanlı Baraj bendinden dışarı doğru 200, 300 ve 500 m olmak üzere 3 noktadan su örneklerini 2019 yılı temmuz ayında aldık. Bunlara sırasıyla A, B ve C olmak üzere numune isimlerini koyduk. Baraj gölünden aldığımız polietilen içerisinde bulunan su örneklerine 1 mL HCl ekledik. Böylece su örneklerimizi hazırladık.

İndüktif eşleşmiş plazma (ICP) Optik Emisyon Spektrometresi (OES), sıvı ve katı numunelerin her ikisi için de eser elementlerin analizi ve miktar ölçümü için bir iyi tasarlanmış ve güçlü bir tekniktir. ICP-OES, içerisindeki donanım ve yazılım ile analitik performans ve kullanım kolaylığını sağlamaktadır. Bu yöntem

ile numundeki eser elementleri, alkali ve toprak alkali metallerin rutin analizlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Eser elementlerin analizleri Perkim Elmer Optima 5300 Dv model cihaz ile yapıldı.

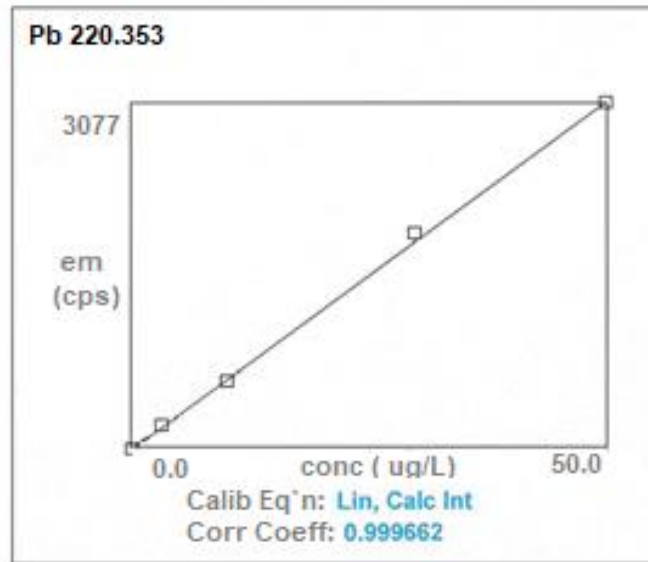
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSION)

Hirfanlı Baraj gölünden alınana su örneklerinde bulunan demir, bakır, kurşun, kadmiyum, krom, nikel, mangan, çinko, arsenik, molibden ve selenyum elementlerinin tayinleri için uygun dalga boyları tablo 1`de verilmektedir.

**Tablo 1.** ICP-OES ölçümlerinde çalışılan dalga boyları.

| Element  | Simgesi | Dalgaboyu ( $\lambda$ ): nm |
|----------|---------|-----------------------------|
| Demir    | Fe      | 238,204                     |
| Bakır    | Cu      | 327,393                     |
| Kurşun   | Pb      | 220,253                     |
| Kadmiyum | Cd      | 228,802                     |
| Krom     | Cr      | 267,716                     |
| Nikel    | Ni      | 231,604                     |
| Çinko    | Zn      | 206,200                     |
| Molibden | Mo      | 202,031                     |
| Selenyum | Se      | 196,026                     |

Ölçümleri yapılacak bu elementlerin analitik saflıktaki tuzlarından standart çözeltileri hazırlandı ve tablo 1 de verilen dalga boylarında kalibrasyon işlemleri yapıldı. Pb elementinin kalibrasyon grafiği şekil 1 de örnek olarak verildi.



**Şekil 1.** Kurşun elementinin 220,353 nm dalga boyunda ölçülmüş kalibrasyon grafiği.

Kalibrasyon işlemi tamamlanmış cihazımız ile QSR Certificate Number QSR-1034 nolu 100 µg /L derişime sahip Ni çözeltisinin analizi yapıldı. Yöntemimizin tayin sınırı 1 µg /L dir. Analiz sonuçları % 95 güven aralığı ve 5 ölçümün ortalaması olarak tablo 2 de verilmiştir.

**Tablo 2.** ICP-OES ile sertifikalı referans maddenin ölçülen değerleri.

| Sertifikalı referans madde | Ölçülen değer: µg/L | % Hata |
|----------------------------|---------------------|--------|
| 100 µg /L Ni <sup>2+</sup> | 99 ± 2              | 1,0    |

%95 Güven aralığı ve N=5 ölçüm

Buradan elde edilen sonuçlar gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmektedir. Bundan sonra Hirfanlı Baraj Gölü'nden alınan su örneklerinin analizleri yapıldı ve sonuçlar tablo 3 de verilmiştir.

**Tablo 3.** Hirfanlı Baraj Gölü su örneklerindeki (A,B,C) eser elementlerin miktarları.

| Element | A numunesi<br>Miktar : µg/L | B numunesi<br>Miktar : µg/L | C numunesi<br>Miktar : µg/L |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Fe      | 30 ± 0,3                    | 28 ± 0,3                    | 22 ± 0,2                    |
| Cu      | 16 ± 0.2                    | 13 ± 0.2                    | 10 ± 0.1                    |
| Pb      | 25 ± 0.1                    | 23 ± 0.1                    | 21 ± 0.1                    |
| Cd      | 18 ± 0.2                    | 17 ± 0.2                    | 14 ± 0.1                    |
| Cr      | 15 ± 0.2                    | 13 ± 0.2                    | 10 ± 0.1                    |
| Ni      | 12 ± 0.1                    | 10 ± 0.1                    | 8 ± 0.04                    |
| Zn      | 22 ± 0.2                    | 19 ± 0.2                    | 15 ± 0.1                    |
| Mo      | 6 ± 0.02                    | 5 ± 0.03                    | 3 ± 0.04                    |
| Se      | 9 ± 0.05                    | 8 ± 0.05                    | 7 ± 0.06                    |

%95 Güven aralığı ve N=5 ölçüm

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Hazırladığımız yöntemi önce sertifikalı referans maddeye uyguladık. Ölçülen değerlerin, içerisinde bulunan değerlere çok yakın olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarının yüksek duyarlılıkla ölçüldüğü tespit edildi. Hirfanlı Baraj Gölü suyunda bulunan eser elementler aynı yöntemle ölçülmüş ve sonuçlar % 95 güven aralığı ve 5 ölçümün ortalaması olarak verildi. Ölçülen değerler baraj bendinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bu değerler suda bulunan eser elementlerin Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı sulu ortamlardaki metal değerlerinin altında çıkmıştır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın numune hazırlama kısmı, Gazi Üniversitesi Kimya Teknolojisi Bölümü Laboaratuvarında yapılmıştır. Eser elementlerin ölçümlerinde ise Çevre Bakanlığı Analiz Laboratuvarı Birimi destek sağlamıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sönmez A.Y., Hisar O., Karataş M., Arslan G., Aras M.S. (2008). Sular Bilgisi. Nobel Bilim ve Araştırma Merkezi, Nobel Basımevi, Ankara.Magnetics® Databook, 2004 Magnetics Catalog, [www.mag-inc.com](http://www.mag-inc.com).
- [2] Iyengar G.V., Kasperek K., Feindenegen L.E. (1978). Retention of the metabolized trace elements in biological tissues following different drying procedures: I. Antimony, cobalt, iodine, mercury, selenium and zinc in rat tissues, *Science of the environment*, 10 (1), 1-16.
- [3] Williams P.B., Buhr M.P., Weber R.W., Volz M.A., Koepke J.W., Selner J.C. (1995). Latex allergen in respirable particulate air pollution, *Journal of allergy and clinical immunology*, 95 (1), 88-95.
- [4] Srikumar T.S. (1993). The mineral and trace element composition of vegetables, pulses and cereals of southern India, *Food chemistry*, 6 (2), 163-167.
- [5] Ikem A., Egiebor N.O., Nyavor K. (2003). Trace elements in water, fish and sediment from Tuskegee Lake, Southeastern Usa, *Water, Air, and Soil Pollution*, 149, 51–75.
- [6] Shigehiro K., Emiko M., Yoshinori I., Waka K., Takehiro K., Hideyuki Y., Mitsuru S., Koji T. (2009). A solid phase extraction using a chelate resin immobilizing carboxymethylated pentaethylenhexamine for separation and preconcentration of trace elements in water samples, *Talanta*, 79 (2), 146-152.
- [7] Baytak S., Zeren F., Arslan Z. (2011). Preconcentration of trace elements from water samples on a minicolumn of yeast (*Yamadazyma spartinae*) immobilized TiO<sub>2</sub> nanoparticles for determination by ICP-AES, *Talanta*, 84 (2), 319-323.
- [8] Meng Q., Zhang J., Zhang Z., Wu T. (2016). Geochemistry of dissolved trace elements and heavy metals in the Dan River Drainage (China): distribution, sources, and water quality assessment, *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 8091–8103.
- [9] Min X., Weiwei S., Rong W. (2019). Spatial distribution and ecological risk assessment of potentially harmful trace elements in surface sediments from Lake Dali, North China, *Water*, 2544-2548.
- [10] Inam R., Somer G. (2000). A direct method for the determination of selenium and lead in cow's milk by differential pulse stripping voltammetry, *Food Chem.*, 69, 345-349.
- [11] Somer G., Guliyeva G., Ekmekci G., Şendil O. (2003). Simultaneous determination of copper,lead, cadmium, zinc, and selenium in cow liver by DPP., *Can. J. Chem.*, 81, 31-36.
- [12] Somer G., Ünal Ü. (2004). A new and direct method for the trace element determination in cauliflower by differential pulse polarography, *Talanta*, 62, 323-327.
- [13] Somer G., Nakışçı A., Kalaycı Ş., Şahin F. (2006). Trace element determination in Brassica oleraceae var. acephale by differential pulse polarography, *Turkish Journal of chemistry*, 30, 419-427.
- [14] Somer G., Almas Z. (2006). Differential pulse polarographic determination of trace quantities of arsenic using catalytic hydrogen wave and its application, *Journal of electroanalytical chemistry*, 593 (1-2), 179-184.

- [15] Somer G., Kalaycı Ş. (2015). A new and simple method for the simultaneous determination of Fe, Cu, Pb, Zn, Bi Cr, Mo, Se, and Ni in dried red grapes using differential pulse polarography, *Food Analytical Methods*, 8, 604-611.
- [16] Lu Y., Liang X., Niyungeko C., Zhou J., Xu J., Tian G. (2018). A review of the identification and detection of heavy metal ions in the environment by voltammetry, *Talanta*, 178, 324-338.
- [17] Kumar S. S., Sangilimuthu S. N. (2018). Synthesis and characterization of carbon nanotubes/asymmetric novel tetradentate ligand forming complexes on PIGE modified electrode for simultaneous determination of Pb(II) and Hg(II) in sea water, Lake water and well water using anodic stripping voltammetry, *Journal electroanalytical chemistry*, 810, 176-184.

## Recognition of Human Emotions by Machine Learning Method Using Turkish Music Stimuli

 Mehmet Bilal ER\*  Harun ÇİĞ 

Harran University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Haliliye/Şanlıurfa

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received: 10/02/2020  
 Revision 03/05/2020  
 Accepted: 16/05/2020

#### Highlights

- EEG
- Emotion Recognition
- Machine Learning

#### Keywords

Recognizing Human  
 Emotions  
 EEG  
 Machine Learning  
 Signal Processing

In this study, experiments are carried out both on our own dataset and on the DEAP dataset, which are widely used in the literature. Different types of Turkish songs were played to the participants. By examining the electrical waves that occur in their brain's surface, happy, sad, relaxing and angry mood states were recognized. Participants were asked to listen to music from different types in a noiseless environment. To classify the emotions, electroencephalography (EEG) signals were saved primarily from different channels. Certain features have been extracted from these signals. Extracted features have been classified using machine learning algorithms.



**Figure A.** schema of the Steps of Emotion Recognition

**Purpose:** The aim of this study is to estimate the emotional state with machine learning and signal processing techniques by measuring the electrical energy of the brain using Turkish music stimuli.

**Theory and Methods:** The proposed model for the recognition of human emotions while listening to music is explained step by step. For the proposed model brain signal recording, feature extraction calculations and classification types are given in the paper. Emotive recording device was used to record brain signals. Support Vector Machines (DVM), K Nearest Neighbor (KNN) and Artificial Neural Networks (ANN) machine learning algorithms were used to classify signals.

**Results:** We conduct an experiment, in a silent and dark environment, where 10 people participated and they are required to listen to different types of music in order to record brain signals. Four emotion labels have been used: angry, sad, happy or relaxing emotion. First, recorded EEG signals passed a bandpass filter. Then, the classification was made by extracting the feature from the filtered signals and the results are compared in section 5.

**Conclusion:** In this study, a new method is presented for emotion recognition on EEG signals while listening to music using some signal processing and machine learning methods. According to the results, it is shown that the proposed method can be used for the problem of recognizing human emotions. It has been observed that the efficiency of the system increased depend on increasing the number of samples and taking the recorded signals from humans at the right time (morning). It is recommended to prepare EEG datasets by using music data as a stimulus for future studies and to use deep learning models in the problem of recognition of human emotions.



## Türk Müziği Uyarımları Kullanılarak İnsan Duygularının Makine Öğrenmesi Yöntemi İle Tanınması

Mehmet Bilal ER\* Harun ÇİĞ

*Harran University Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Haliliye/Şanlıurfa*

### Öz

Müzik, zaman ve frekansa göre değişiklik gösteren çok çeşitli karmaşık bileşenlerden oluşan bir ses sinyalidir. Müziğin dinleyicide çok çeşitli duygular uyandırdığı literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir. Bir kişinin dinlediği müziğe hüzünlü ya da mutlu duygu içeriyor demesi gerçekte hissettiği duyguyu ortaya koymayabilir. Ancak müzik dinleme anında hissedilen duyguya göre beyin içinde meydana gelen elektriksel dalgalanmalar, algılanan gerçek duygunun yapısını daha doğru bir şekilde ortaya koyabilmektedir. Beyin sinyalleri kullanılarak insan duygularının tespit edilmesi, birçok alanda güncel araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada ise müzik parçaları dinlenirken insan duygularının tanınması problemi ele alınmıştır. Deneyler hem kendi veri setimiz üzerinde hem de literatürde yaygın olarak kullanılan DEAP veri seti üzerinde yapılmıştır. Farklı türlerdeki Türk müziği parçaları katılımcılara dinletilerek beyinlerinde oluşan elektriksel dalgalar incelenerek mutlu, hüzünlü, rahatlatıcı ve gergin duygu durumları tanınmaya çalışılmıştır. Katılımcılardan gürültüsüz bir ortamda farklı türlerden müzik parçaları dinlemeleri istenilmiştir. Duyguların sınıflandırılması için öncelikle farklı kanallardan Elektroensefalografi (EEG) sinyalleri alınmıştır ve elde edilen bu sinyaller üzerinden belirli öznelikler çıkarılmıştır. Çıkarılan öznelikler Destek Vektör Makineleri (DVM), K En Yakın Komşu (KNN) ve Yapay Sinir Ağlarını (YSA) makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Veri setini eğitmek ve insan duygularını sınıflandırmak için kullanılan algoritmalarından en iyi doğruluk oranı YSA ile elde edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kullanılan yöntemin iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 10/02/2020*  
*Düzeltilme: 03/05/2020*  
*Kabul: 16/05/2020*

### Anahtar Kelimeler

*İnsan Duygularını Tanıma*  
*EEG*  
*Makine Öğrenmesi*  
*Sinyal İşleme*

### Keywords

*Recognizing Human*  
*Emotions*  
*EEG*  
*Machine Learning*  
*Signal Processing*

## Recognition of Human Emotions by Machine Learning Method Using Turkish Music Stimuli

### Abstract

Music is an audio signal consisting of a wide variety of complex components which vary according to time and frequency. It is widely accepted in the literature that music evokes a wide variety of emotions in the audience. When a person says that the music they are listening to contains sad or happy feelings, this may not reveal the feeling they actually feel. However, according to the emotion felt during listening to music, fluctuations in electrical activity of the brain can more accurately reveal the structure of perceived true emotion. Detecting human emotions using brain signals has been the subject of current research in many areas. In this study, the problem of detection human emotions while listening to music has been discussed. Experiments are carried out both on our own dataset and on the DEAP dataset, which is widely used in the literature. Different types of Turkish music's were played to the participants. By examining the electrical waves that occur in their brain's surface, happy, sad, relaxing and angry mood states were recognized. Participants were asked to listen to music from different types in a noiseless environment. To classification the emotions, electroencephalography (EEG) signals were saved primarily from different channels. Certain features have been extracted from these signals. Extracted features have been classified using machine learning algorithms for Support Vector Machines (SVM), K nearest neighbor (KNN), and Artificial Neural Networks (ANN). The best accuracy rate was obtained by ANN from algorithms used to train the data set and classify human emotions. According to the results obtained, it was observed that the used method performed well.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Müzik, duyguların dili olarak bilinir ve dinleyicide neşe, heyecan ve korku gibi farklı duygusal tepkiler ortaya çıkarabilen güçlü bir yöntem olarak kabul edilmektedir [1]–[4]. Bir kişinin kendini üzgün hissetmesi durumunda mutlu bir müzik dinlemesi kişinin duygu durumunun mutlu olarak değişmesine yardımcı olacaktır. Müzik dinleyen insanlarda belirli duyguların uyanmaması çok nadir görülen bir durumdur. Müzik hem duyguları ifade etme hem de dinleyicide duygusal tepkiler uyandırma da etkili olduğu için müzikoloji, psikoloji, sinyal işleme gibi birçok alanda araştırma konusu olmuştur. Nörolojik çalışmalar, müziğin beyin sistemini değerlendirmek için önemli bir araç olduğunu ortaya koymuştur [5]. İnsan duygularının hesaplamalarla tahmin edilmesi, yorumlanması ve işlenmesi bir makine öğrenmesi alanıdır. Ayrıca duygu durum analizleri sağlık, güvenlik ve eğitim gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır. EEG tabanlı duygu tanıma çalışmaları son zamanlarda insan-bilgisayar etkileşimi alanında çok fazla ilgi görmüştür.

Duygu, bireyin düşüncelerinden oluşur. Duygular, insanların düşünürken, iletişim kurarken, öğrenirken ve karar verirken dış uyaranlara karşı vermiş oldukları tepkiler olarak ifade edilir. Bu yüzden duygular insanların günlük hayattaki davranışlarının belirlenmesinde temel rol oynarlar. Ancak duygu, oldukça öznel bir olgudur. Çünkü farklı insanlar dış uyaranlara tepki olarak aynı ortam ve koşullarda farklı tepkiler verirler. Bütün insan duyguları birkaç temel duygudan üretilmektedir. Duygu, kategorik veya boyutsal olarak iki ana gruba altında incelenir. Ayrık modeller olarak da bilinen kategorik modellerde duyguların tanımlanması için tek kelime veya kelime grupları kullanılır. İki boyutlu düzlemde değerlilik ve uyarılma değerleri ölçülür [6], [7]. Bilim adamları ve psikoloji uzmanları farklı önerilerde bulunarak duygusal modellerde insani duyguları kategorik olarak altı temel sınıfa ayırmışlardır. Bu sınıflar; mutluluk, korku, iğrenme, üzülmeye, neşe ve öfke şeklindedir [8]. Bu çalışmada mutlu, hüzünlü, rahat ve gergin gibi dört temel duygu incelenmiştir. Duygu tanıma üç ana kategoride incelenebilir. İlkinde yüz ifadeleri ya da konuşmaların analizine odaklanılır. Bu görsel-işitsel temelli teknikler, duyguların temasız olarak algılanmasını sağlar. İkinci tür yaklaşımlarda ise çevresel fizyolojik sinyallere odaklanılır. Çeşitli çalışmalarda, elektrokardiyogram (EKG), solunum ve nabız gibi çevresel fizyolojik sinyallerin farklı duygusal durumlarda değişiklik gösterdiği ve otonom sinir sistemini etkilediği gözlenmektedir. Çevresel fizyolojik sinyaller, görsel-işitsel tabanlı yöntemlerle karşılaştırıldığında, duygusal durumları tahmin etmek için daha ayrıntılı bilgi vermektedir [9], [10]. Üçüncü tür yaklaşımlarda ise, EEG gibi merkezi sinir sisteminden üretilen beyin sinyallerine odaklanılır. EEG sinyalleri kullanılarak duygu durumunu tahmin etmeyi amaçlayan birçok araştırma bulunmaktadır. EEG sinyalleri, elektrotlar kullanılarak kafa derisinden kaydedilir. Esas olarak mono-polar ve bipolar olmak üzere iki tür EEG kaydı vardır. Mono-polar kayıt, kafa derisindeki aktif elektrotlar ile bir referans elektrot arasındaki voltaj farkını ölçer. Öte yandan iki kutuplu elektrotlar, iki aktif elektrot arasındaki voltaj farkını sağlamaktadır.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibidir:

- Müzik parçaları dinlerken kaydedilen EEG sinyalleri ile insan duygularını yansıtan 4 sınıftan oluşan yeni bir veri seti oluşturulmuştur.
- Müzik dinletileri uyaran olarak kullanılmıştır. Uyarılan EEG sinyalleri ile insan duygularını tanıması için etkili bir yöntem önerilmiştir.
- Makine öğrenmesinin duyguları tanıma problemindeki etkin gücü ortaya koyulmuştur.

EEG sinyalleri kullanarak insan duygu tanıma sistemleri geliştirilmesi için göz önünde bulundurulması gereken bazı kısıtlamalar vardır. Bunlar;



- Duygu algısının öznel olması ve tam olarak evrensel bir tanımının yapılamamasından dolayı kullanılan duygu etiketlerinin sıfat sayıları sınırlı olmalıdır.
- Uyarıcı olarak kullanılan müziklerin eşit örneklem frekansına sahip olması gerekir.
- Veri setindeki EEG kayıtlarının hepsi eşit örneklem frekansına sahip olmalıdır.
- İnsanların müziklerden hissettikleri duyguları ifade etmek için, EEG kayıtlarından çıkarılan özelliklerin müzikal duygularla ilişkili olmasına dikkat edilmelidir.
- EEG durağan bir sinyal olmadığından EEG'den elde edilen özellik genellikle çarpıcı bir şekilde değişirken, duygulanma durumları kademeli olarak değişir. Duygular belirli bir süre içerisinde anlamlılık kazandığı için EEG kayıtlarının süresi çok kısa olmamalıdır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de literatürdeki duygu tanıma ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir ve aralarındaki farklar ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Bölüm 3'de veri seti, materyal ve metod tanımlanmıştır. Bölüm 4'de araştırmada kullanılan insan duygu tanıma ile ilgili deneysel uygulamalar verilmiştir. Bölüm 5'de ise araştırmanın bulguları tartışılmıştır ve insan duygu tanıma modellerinin geliştirilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

[11]'de APM veri tabanı kullanılarak deneklerden EEG kayıtları alınmıştır. OpenSMILE kullanılarak müzik dosyalarından 5 farklı öznel çıkartılmıştır. Deneklerden alınan EEG sinyallerinden 12 öznel çıkartılmıştır ve son olarak bu öznel etiketler Orman sınıflandırıcı ile mutlu, hüzünlü, rahat ve gergin olmak üzere 4 ayrı kategoride sınıflandırılmıştır. Başarı oranında %0.4'lük bir artış gözlemlenmiştir.

[12]'de müzikli video uyarıcılarına maruz kalma sırasında erkek ve kadınlarda ayrı ayrı EEG güç spektrumları ile beyin kaynaklarındaki farklılıkları karşılaştırmak amaçlanmıştır. Deneklere hüzünlü, eğlenceli ve iç karartıcı müzik klipleri izletilmiş ve aynı anda EEG sinyalleri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu EEG sinyalleri yedi ayrı frekans bandında incelenmiştir. Bu frekans bantları teta (h: 4-7.5 Hz), alfa1 (A1: 8-10 Hz), alfa2 (A2: 10-12 Hz), beta1 (B1: 13-18 Hz), beta2 (B2: 18.5-21 Hz), beta3 (B3: 21.5-30 Hz) ve gama (C: 30.5-44 Hz) olmak üzere ortalama Fourier çarpaz spektral matrisler kullanılarak hesaplanmıştır. B2, B3 ve C frekans bantlarında hüzünlü ve eğlenceli müzikler arasında anlamlı bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Uyarıcı dinletilere karşı beyin bazı bölgelerinde meydana gelen duygusal tepkiler, B3 frekans bandında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

[13]'de frekans domeni özellikleri için Hamming penceresi ile kısa süreli Fourier dönüşümü kullanılmıştır. Güç spektral yoğunluğu ve bant gücü frekans alanındaki özellikler olarak hesaplanmıştır. Zaman domeni, frekans domeni ve wavelet domeni olmak üzere üç farklı alandan on üç öznel çıkartılmış ve bunlar YSA, DVM ve KNN olmak üzere üç farklı sınıflandırıcı ile dört farklı duygu sınıflandırılmıştır. YSA'nın DVM ve KNN sınıflandırıcılarına kıyasla en iyi doğruluk oranını sağladığı görülmüştür.

[14]'de bir dizi Intrinsic Mode Functions (IMF) elde etmek için video müzikleri dinletilen deneklerin EEG sinyalleri kaydedilmiştir. EEG sinyalleri üzerinde Ampirik Kip Ayırışım ile öznel çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha iyi bir zaman frekans çözünürlüğü elde etmek için sadece baskın IMF'ler üzerinde Ayrık Wavelet Dönüşümü kullanılmıştır. Principal Component Analysis (PCA) ile boyutlar azaltılmış, öznel vektörü daha sonra DVM ile duyguları sınıflandırmak için kullanılmıştır.

[15]'de müzik ve duygu arasındaki ilişkinin analizinde boyut azaltma yöntemi kullanılmıştır. Denekler tarafından sağlanan duygu etiketlerini iyileştirmek için deneklerin EEG sinyalleri kaydedilmiştir. Daha sonra Bilinear Multi Emotion - Similarity Preserving Embedding (BME-SPE) boyut azaltma yöntemi kullanılarak yeni bir öğrenme planı önerilmiştir. Çalışmada Çin kültürüne ait müzikler kullanılmıştır. Ancak diğer kültürlerde de benzer duygular gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemde etkili korelasyon tespit edilerek sınıflandırmada yüksek performans sağlandığı gözlemlenmiştir.

[16]'da farklı müzik uyarıları altında EEG dinamiklerini araştırılmıştır. Çalışmada iki tür müzik uyarısı; favori müzik (deneklerin tercih ettiği müzikler) ve rahatlatıcı (alfa binaural ritimlerden oluşan müzikler) kullanılmıştır. Müziğin insan beyni üzerindeki yatıştırıcı etkilerinin değerlendirilmesi için deneklerin EEG kayıtları kullanılmıştır. Alfa bandında mutlak güç, yaklaşık entropi, örnek entropi ve ön asimetri gibi farklı öznitelikler hesaplanmıştır. Sonuçlar rahatlatıcı müziğin, favori müziğe göre daha iyi yatıştırıcı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Önce deneklerden ruh hallerini tespit eden bir anket doldurmaları istenmiş ve çalışmanın sonunda bu anketler göz önüne alınarak değerlendirme yapılmıştır.

[17]'de kişiselleştirilmiş bir müzik duygu tanıma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, eğitim aşaması, kişisel adaptasyon ve test aşamasından oluşmaktadır. MIRtoolbox kullanarak ses nesnelere spektrum, spektral centroid, Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), tonalite, harmonik tını dahil olmak üzere toplamda 141 boyutlu özellik çıkarılmıştır. EEG özniteliklerini elde etmek için EEGLAB ve Signal Processing Toolbox kullanılmıştır. Deneklere dinletilen müzik verileri ve müzik dinletilirken kaydedilen EEG verilerinden elde edilen öznitelikler eğitim ağını oluşturmak için vektör halinde ayrı ayrı yapay sinir ağına verilmiştir. %85 eğitim % 15 ise test verileri için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yaklaşımın etkili olduğunu göstermiştir.

[18]'de, deneklerin EEG sinyalleri kullanılarak kendi seçtikleri müziğe dinamik duygusal tepkileri analiz edilmiştir. Deneklerin sevdiği ve sevmediği müzikler deneklere dinletilerek EEG sinyalleri kaydedilmiştir. Daha sonra zamana göre frekans lokalizasyonu ve Wavelet Paket Dekompozisyonu (WPD) kullanılarak EEG verileri analiz edilmiştir. Beğenilen müzik dinlenirken, beğenilmeyen müziğe kıyasla F3, F4, F7 ve F8'in ön elektrot lokasyonlarında intheta bileşeninde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Sevilmeyen müzik dinlenirken frontal beta bileşen enerjisinde artış gözlemlenmiştir. Deneklerde beğenilen müzik için gözlemlenen duygular benzerken beğenilmeyen müzikler için önemli bir benzerliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

[19]'da CNN tarafından sınıflandırılan EEG ham verilerinin doğruluğu değerlendirilmiştir. CNN'nin öznitelik çıkarabildiği düşünülerek EEG ham verileri ön işleme yapılmadan doğrudan CNN'e verilmiştir. Bu şekilde CNN'in ham EEG verilerinden duyguları tanıyıp tanımayacağı test edilmiştir. EEG verilerinin değişkenliğini dikkate alan modellerin doğruluğunu değerlendirmek için 11 katlı çapraz doğrulama kullanılmıştır. CNN'in duygusal sınıflarla ilgili veya ilgisiz olan bileşenleri ayırt edici bir şekilde öğrenebildiği ve % 20'nin üzerinde doğrulukta tanıyabildiği gözlemlenmiştir.

[20]'de deneklere müzik dinletilerek stres duygularını tahmin etmek için öğrenme yöntemi olarak CNN kullanılmıştır. 7 deneğe 10'ar dakikalık müzik dinletilmiş ve EEG sinyalleri kaydedilmiştir. Kaydedilen EEG sinyalleri fourier dönüşümü ile zaman domeninden frekans domenine dönüştürülmüştür. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Ardından bu sinyaller derin öğrenme ile sınıflandırılmış ve %80'e varan bir doğruluk oranı elde edilmiştir.

### 3. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHODS)

#### 3.1. EEG

İnsan beyni, milyarlarca sinir hücresinin birbirine bağlandığı karmaşık bir sistemdir. Beyin hücreleri elektriksel impulslarla birbirleriyle iletişim kurarlar. EEG, beyin tarafından üretilen elektriksel aktiviteyi kafa derisi yüzeyine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla kaydetmek için kullanılan fizyolojik yöntemdir. 1929'da Hans Berger, ilk insan beyni EEG' sini kaydetmiştir [21]. EEG, doktorlar ve bilim adamları tarafından beyin fonksiyonlarını incelemek ve nörolojik hastalıkları teşhis etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir EEG kayıt işleminde, beyin dalgası paternleri izlenir ve kaydedilir. EEG testi sırasında, elektrot olarak adlandırılan küçük düz metal diskler teller ile kafa derisine sabitlenir ve daha sonra her elektrot bir EEG kayıt makinesine bağlanır. Elektrotlar beyindeki elektriksel impulsları analiz eder ve sonuçları kaydeden bir bilgisayara sinyaller gönderir. Kullanımlarına bağlı olarak, paralel olarak

veri kaydedebilen çok kanallı EEG kayıt cihazları 256 ya kadar elektrot içerebilir. Her kanal bir EEG kaydı sırasında bir sinyal üretir [22]. Bir EEG kaydındaki elektriksel dürtüler, tepe noktaları ve çukur noktaları olan dalgalı çizgiler gibi görünür [23]. Bu çizgiler, doktorların anormal kalıpların olup olmadığını hızlı bir şekilde değerlendirmesini sağlar. Herhangi bir düzensizlik nöbet veya diğer beyin bozukluklarının bir belirtisi olabilir. İşaret işleme tekniklerini kullanarak normal ve anormal bir kişinin beyin aktivitesi kolayca ayırt edilebilir.

Normal bir EEG sinyalinin frekans aralığı 1 Hz-100 Hz'dir, ancak 100 Hz çok nadir görülür. Sinyalin genliği ise genel olarak 10  $\mu$ V - 100  $\mu$ V arasındadır. EEG'nin karakteristik özellikleri, bireyin kendisi, yaşı ve öznenin zihinsel durumu gibi birçok faktöre bağlıdır [24].

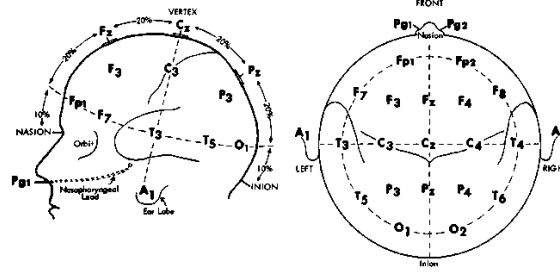
### 3.1.1. EEG Dalga Şekli (EEG Wave Shape)

Beyin yüzeyinde meydana gelen elektriksel aktiviteler, EEG makinesinin ekranında, voltaj olarak ölçülen değişen frekans ve genlikteki dalga formları olarak görünür. EEG aktivitesi mikrovolt (mV) cinsinden ölçülen sinyallerdir. Yaşadığımız andaki duruma göre beynimizde farklı şekillerde elektriksel dalgalanmalar olur ve durumlara göre farklı frekans kalıpları oluşur. EEG sinyalleri frekans genlik ve şekilleri bakımından sınıflandırılır. Beyin dalgası hızı Hertz (saniyedeki devir) cinsinden ölçülür ve yavaş, orta ve hızlı dalgaları tanımlayan frekans bantlarına ayrılır. Frekans aralıklarına bağlı olarak, beş tip dalga tanımlanabilir. Sırasıyla düşük frekanstan yüksek frekansa doğru; delta ( $\delta$ ), teta ( $\theta$ ), alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), ve gamma ( $\gamma$ ) şeklindedir. Bu frekans bantları tablo 1'deki gibidir.

**Tablo 1.** Dalgaların Frekans Aralıkları

| Dalga | Frekans  |
|-------|----------|
| Delta | 0-4 HZ   |
| Teta  | 4-8 HZ   |
| Alfa  | 8-13 HZ  |
| Beta  | 13-30 HZ |
| Gama  | >30 HZ   |

EEG Sinyalleri kafanın neresinden alındığına bağlı olarak iki türe ayrılabilir vardır. Bunlar, kafa derisinden alınan EEG sinyalleri ve kafa içinden alınan EEG sinyalleridir. Kafa derisinden alınan EEG için, kafa derisinin üzerine iyi mekanik ve elektriksel teması olan küçük elektrotlar yerleştirilir. Kafatası içinden EEG sinyali almak için ameliyat sırasında beyine implant edilen özel elektrotlar kullanılır. Beynin mimarisi üniform olmaması ve korteksin fonksiyonel yapıya sahip olmasından dolayı kaydedilen EEG sinyalleri elektrotlarının konumuna bağlı olarak değişebilir. EEG sinyalleri kayıt edilmeden önce elektrotların yerleştirilmesine dikkat edilmelidir. Elektrotların kafa derisinin üzerine nasıl yerleştirileceği önemli bir süreçtir, çünkü farklı türdeki aktivitelerin işlenmesinden farklı beyinsel korteks lobları sorumludur. Kafa derisi elektrot lokalizasyonu için yaygın olarak kullanılan elektrot yerleştirme yöntemlerinden biri, Amerikan Elektroensefalografik Topluluğu tarafından standart hale getirilmiş olan 10-20 elektrot sistemidir [25]. Bu sistemi kullanarak, kafa derisi üzerine toplam 21 elektrot yerleştirilir. Şekil 1'de, uluslararası 10-20 sistemine göre beyindeki elektrot pozisyonunu göstermektedir. Her bölge lobu tanımlamak için bir harf ve yarım küre konumunu tanımlamak için bir sayı kullanır. F, T, C, P ve O harfleri sırasıyla Frontal, Temporal, Central, Parietal ve Oksipital anlamına gelir. "Z" orta hatta yerleştirilen bir elektrodu ifade eder. Çift rakamlar sağ yarım küre üzerindeki elektrot pozisyonlarını belirtirken, tek rakamlar sol yarım küre üzerindeki gösterir.



Şekil 1. Uluslararası 10-20 elektrot yerleştirme sistemi

### 3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Müzik dinlerken EEG sinyalleri kaydedilen deneklerin, duygu durumlarının tanınması için önerilen sistem dört adımdan oluşmaktadır. Bu işlem adımları; sırası ile veri toplama, sinyal ön işleme, öznelik çıkarma ve sınıflandırma şeklinde yapılmaktadır. Müzik dinlenmesi sırasında beyin üzerinde oluşan elektriksel aktiviteler, EEG sinyal okuyucu kullanılarak kafa derisi üzerinden kaydedilir. Kaydedilen EEG sinyalleri daha sonra dış ortamdan gelen gürültülerin giderilmesi ve ham EEG verilerinin işlenebilir hale getirilebilmesi için sinyaller ön işlemden geçirilir. EEG sinyalleri ön işleme tabi tutulduktan sonra öznelik çıkarılır. Son olarak, çıkarılan öznelikler sınıflandırıcıları eğitmek ve insan duygularını tanımak için kullanılır. Her adımın detayı aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır. Önerilen yöntem şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. Duygu Tanıma Adımları

#### 3.2.1. Uyarı ve Katılımcılar (Stimulus and Subjects)

16 adet sesli müzik dinletisi, EEG tabanlı duygu tanıma deneyi için harici bir uyarıcı olarak kullanılmıştır. Tüm müzik dinletileri MP3 formatındadır ve örnekleme hızı 320 kbps'dir. Bu çalışmada kullanılan müzikler, Türk Sanat Müziği, Türk Halk Müziği, Türk Pop ve Türk Caz Müziği olmak üzere dört türden oluşmaktadır. Seçilen türler fark edilebilir duygular üretmektedir. Farklı kültürlere sahip toplam on katılımcı gönüllü olarak çalışmaya katılmıştır. On sağlıklı denekten beşi erkek beşi ise kadındır. Tüm katılımcılar 20 ila 25 yaş arasındadır ve katılımcıların herhangi bir beyin hastalığı rahatsızlığı bulunmamaktadır ve normal işitme gücüne sahiptir. Deneyden önce, katılımcılara çalışmanın kapsamı ve prosedürü hakkında bilgi verilmiştir.

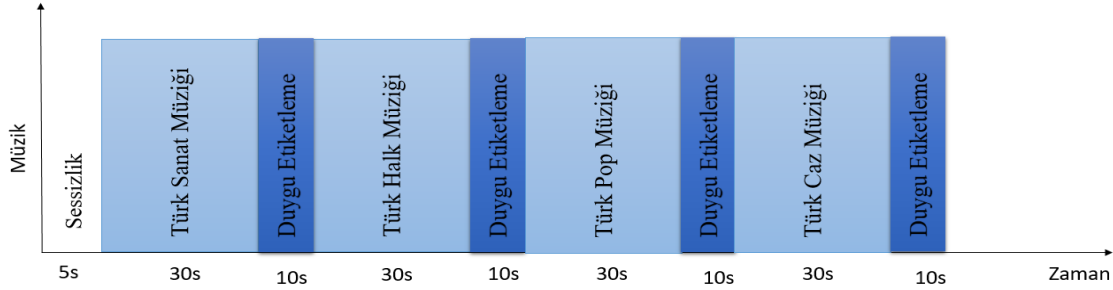
#### 3.2.2. EEG Veri Toplama (EEG Data Collection)

Bu çalışmada EEG sinyallerini alabilmek için EMOTIV EPOC+ kulaklığı kullanılmıştır. EMOTIV EPOC+ insan beyni araştırması için tasarlanmıştır. Bu EEG kayıt cihazı kullanımı kolay bir tasarımla, hızlı ve profesyonel olarak yüksek kalitede beyin verilerine erişim sağlar. Bu cihazda toplam 14 kanal vardır ve 5 dakikaya kadar kayıt alabilmektedir. Cihaz 128 örnekleme frekansı ile veri alabilmektedir. Bluetooth bağlantısı ile Matlab üzerinde hazırlanan yazılım kullanılarak ham EEG verileri kaydedilmiştir. Tüm EEG kayıtları izole ve gürültüsüz bir odada alınmıştır. Şekil 3'de gösterildiği gibi müzik dinlerken Emotiv EPOC+ kulaklığından EEG sinyalleri kaydedilmiştir.



**Şekil 3. EMOTIV EPOC**

Cihazdaki elektrotlar uluslararası 10-20 sistemine göre beynin çeşitli bölgelerinde konumlandırılarak EEG kayıtları alınmıştır. Her katılımcıya, 30 saniyelik bölümlerden oluşan toplam 16 adet müzik dinletilmiştir. Her katılımcıya her türden birer birer dört müzik dinletilmiştir ve her müzikten sonra 10 saniye sessizlik sağlanmıştır. Bu müzikler katılımcıya dinletilirken dinleyicinin EEG kayıtları alınmıştır ve her müzik sonunda hissettiği duygu sorularak alınan EEG kaydı hissedilen duyguya göre etiketlenmiştir. Duygu tanıma ve sınıflandırıcının eğitimi işlemi için manuel olarak etiketlenen duygu etiketleri kullanılmıştır. Şekil 4’de katılımcılar için EEG veri toplama aşamasındaki genel yapı ifade edilmiştir. Kayıtlar günün farklı saatlerinde alınmıştır. Veri seti, her sınıfta eşit sayıda kayıt olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk deneyde sabah saatlerinde toplam 160 kayıt, ikinci deneyde ise öğlen saatlerinde toplam 160 kayıt alınmıştır. Veri setindeki her sınıftaki kayıt sayısını aynı olmasını sağlamak için her deneydeki 144 kayıt dikkate alınmıştır.



**Şekil 4. EEG Kayıt Alma Süreci**

Ayrıca bu çalışmada DEAP veri kümesi kullanılmıştır. DEAP veri seti duyguların değerlendirilmesi için birden fazla fizyolojik sinyal içerir. 32 denekten EEG verisi toplanmıştır. EEG sinyalleri, her biri 60 saniye süren müzik videosu gösterilerek kaydedilmiştir [26]. Daha sonra sinyaller 128 Hz'e örneklenip, bant geçiren filtreler kullanılarak gürültü giderilmiştir. DEAP veri kümesi, Russell'in duygu modeline göre sınıflandırılmıştır. DEAP veri kümesinde, 1-9 ölçeğinde değerlilik ve uyarılma adlı iki tür etiket vardır. Etiketlerden 1-4 değerliliği, 5-9 ise uyarılma ölçeğini temsil eder. Derecelendirme 5'ten büyük veya ona eşitse etiket "yüksek" olarak, 5'ten küçükse etiket "düşük" olarak ayarlanmıştır. Veri setinde toplam dört sınıf etiket vardır: yüksek uyarılma düşük değerlik, düşük uyarılma yüksek değerlik, yüksek uyarılma yüksek değerlik ve düşük uyarılma düşük değerlik.

### 3.3. EEG Sinyal Ön İşleme ve Öznelik Çıkarma (EEG Signal Preprocessing and Feature Extraction)

İnsan kafa derisinden kaydedilen EEG sinyalleri beyin dalgalarının, seslerin ve farklı dış gürültülerin birleşiminden oluşur. EEG sinyalleri ile insan beyni aktivitesini araştırmak için 0Hz-50Hz bandını kullanırız. Özellik çıkarımı ve sınıflandırma için kaliteli, gürültüsüz sinyallere sahip olmak gerekir. Gürültü azaltmak için kaydettiğimiz sinyaller, 1.0 Hz-50 Hz arasında band geçişine sahip bir filtre kullanılarak sinyaller analiz için uygun hale getirilmiştir.

Filtreden geçirilen sinyallerden öznelik çıkarabilmek için ilk olarak sinyal belli uzunluktaki çerçevelere ayrılmıştır. Sinyalindeki işaretler zamana bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu yüzden sinyallerinin karakteristik özelliklerini belirleyen parametreler çok küçük zaman diliminde kararlı kalmaktadır. Bu çalışmada EEG sinyalleri 25 ms uzunluklarda çerçevelere bölünmüştür. Ayrıca her çerçeve kendinden bir önceki çerçevenin bir kısmını örtecek şekildedir. Çerçevelerinin birbirini örtmesinin amacı çerçeveler arası geçişin yumuşak olmasını sağlamaktır [27]. Eğer bu örtüşme olmasaydı birbirini izleyen iki çerçeveyi izlediğimiz zaman veya bu çerçevedeki sinyalleri işlenirken çerçeveler arasındaki özellik değişimi kesintiye veya sıçramaya neden olabilecekti. Ayrıca komşu çerçevelerin parametre değerlerinin farkı da daha yüksek olacaktı. Bu nedenlerden dolayı çerçeveler birbirini örtecek şekildedir. Bu çalışmada çerçevelerin örtüşme oranı bir çerçevenin %50 si kadar olarak seçilmiştir.

Bir sinyale çerçeveleme uygulandıktan sonra pencereleme işlemi uygulanır. Amaç her bir çerçevenin başında sonunda oluşan süreksizliği önlemektir. Her çerçevedeki ses sinyalinin orta bölgesi güçlendirilir uç bölgeler ise zayıflatılır. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan “Hamming penceresi” kullanılmıştır. “Hamming Pencereleme” sayesinde sinyalin merkez bölgesi daha belirgin hale gelir. Uç kısımlarda sifıra yaklaştırılır. Hamming Penceresi sinyalin uç bölgelerdeki istenmeyen radyasyonları en aza indir [28]. Ayrıca sinyali Fourier dönüşümüne uygun hale getiren fonksiyondur. Hamming fonksiyonun çalışma mantığı hamming penceresi ile çerçevenmiş ses sinyali çarpılır ve sonunda pencerelenmiş sinyal elde edilir. Hamming pencere formülü denklem 1’de verilmiştir.

$$w[n] = 0.54 - 0.46 * \cos\left(2 * \pi * \frac{n}{N}\right), \quad N: \text{Pencere uzunluğu} \quad (1)$$

$$n: 0, 1, 2 \dots \dots N - 1$$

Hamming penceresinden sonra sinyale Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Sinyal işlemede dönüşüm bir sinyalin başka parametrelerle ifade edilmesi anlamına gelir. Fourier dönüşümü bir sinyalin zaman domaininden frekans domainine dönüşümünü sağlar. Fourier dönüşümü sinyal işlemede sinyalin içindeki bilgileri elde etmek için çok önemli bir yöntemdir. Sinyali oluşturan bileşenleri (frekans, genlik, faz) kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının toplamı olarak ifade etmeye yarar. Bu çalışmada Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Bu adımda N örnekten oluşan her çerçeve Hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak zaman domaininden frekans domainine geçirilmiştir. N örneklili bir küme denklem 2’deki gibi tanımlanır. Son aşamada N örnekten oluşan her çerçeve üzerinden istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır.

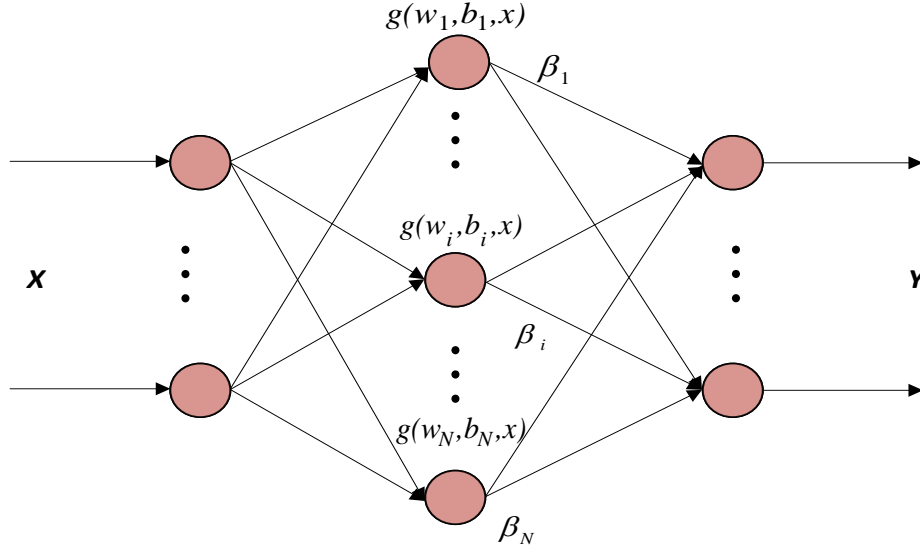
$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-2\pi jkn / N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2)$$

Her çerçevenin standart sapması, maksimum değeri, minimum değeri ortalaması ve kare ortalamalarının karekökü hesaplanmıştır.

### 3.4. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

YSA, insan beyninin akıllı veri işleme yeteneğinden ilham alınarak oluşturulmuştur. YSA beyindeki nöronların birbirleri ile etkileşimini taklit ederek motive edilmiştir [29]. Nöronlardan oluşan, ilişkili nöron bağlantıları içeren ve matematiksel bir model olan YSA modeli şekil 5’te gösterilmiştir. Ağ oluşumunda

kullanılan nöronlar arasında oluşturulan bağlantılar ağırlık denen sayısal değerler ile ilişkilendirilir. Her ağırlık, ağda transfer edilen ve sinyal ile çarpılan belirli bir değere sahiptir [30], [31]. YSA'lar, problem hakkında bilgi sahibi olmaksızın girdi ve çıktı verileri arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri tanımak için eğitilebilirler. Eğitimden sonra YSA'nın çalışma süresi son derece hızlıdır, çünkü yalnızca birkaç basit, birbirine bağlı işlem birimi içermektedir. YSA'ların model tanıma, genelleme ve enterpolasyon yapabilme özellikleri vardır. Bu nedenle eğitilen ağa bilinmeyen bir girdi uygulandığında uygun bir çıktı üretebilirler. Deterministik hata ve sistem modelleri yerine yalnızca simüle edilmiş eğitim verileri gerektirirler [32].



Şekil 5: Yapay Sinir Ağları

### 3.5. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines)

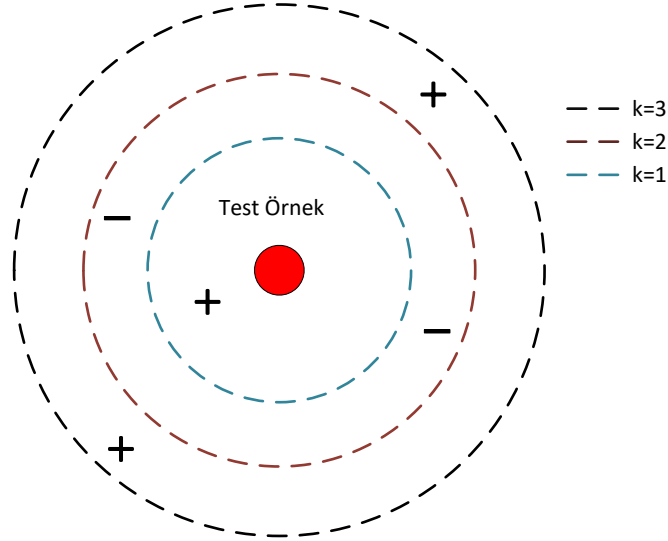
DVM Vapnik'in istatistiksel öğrenme teorisinden nemalanan lineer ve lineer olmayan çizgiler ile ayrıştırılabilen en iyi makine öğrenme tekniklerinden biridir [33]. Bu teknik hem sınıflandırma hem de regresyon analizi için kullanılabilir ve küçük örneklerin sınıflandırılması için hesaplamalı bir öğrenme yöntemidir [34]. DVM de öncelikle girdi verileri daha yüksek boyutlu bir alana alınır ve bu alanda iki sınıf arasında bir en uygun ayırıcı hiper düzlem oluşturulur [35]. DVM ile öncelikle bir düzlemde bulunan sınıflandırılacak veri grupları arasında bir sınır çizgisi belirlenir. Bu sınırın belirleneceği yer ise bu veri gruplarının üyelerine en uzak bir yer olmalıdır. Basit bir şekilde tanımlamak gerekirse DVM bu sınırın nasıl çizileceğini belirler. Algoritmik olarak DVM, yapısal risk minimizasyonuna dayalı kısıtlanmış bir kuadratik optimizasyon problemini çözerek veri kümeleri arasında optimal ayırma hiper düzlemi ( $f(x) = 0$ ) oluşturmaktadır [36].

### 3.6. K En Yakın Komşu (K Nearest Neighbor)

Büyük ölçekli bir veri kümesinden, bir sorgu örneğine en çok benzer bir veri alt kümesi bulmayı amaçlayan KNN algoritmaları; boyut indirgeme, model sınıflama ve görüntü alımı gibi geniş kapsamlı uygulamalarda temel bir bileşen olarak kullanılmaktadır [37],[38]. KNN, bir veri kümesindeki örneklerin genellikle benzer özelliklere sahip diğer örneklerin yakınında bulunacağı ilkesine dayanan, örnek tabanlı bir öğrenme algoritmasıdır [39]. Bu algoritma ile yeni bir nokta verisini sınıflandırmak için bu nokta verisine en yakın k tane eğitim noktası bulunur. Sınıflandırma işlemi, komşularının oy çoğunluğuyla yapılır; sınıflandırma işlemi yapılacak bir eleman, bir uzaklık fonksiyonuyla ölçülen en yakın komşular arasında en yakın olan sınıfa dağıtılır [40]. KNN algoritmasının formülü denklem 3'te gösterilmiştir.

$$x(x, y) = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (x_j - z_j)^2} \quad (3)$$

Denklem 3'te;  $w_j$ - j boyutuyla ilişkilendirilen ağırlıktır. Her boyut için ağırlık seçilir ve karesel uzaklık fonksiyonu belirtilir. Şekil 6 'da Test örneğinin sınıflandırılmasında,  $k=1$  veya  $k=3$  olarak seçildiğinde pozitif sınıfta,  $k=2$  olarak seçildiğinde negatif sınıfta olduğu görülmektedir.



Şekil 6: K-NN Diyagramı

#### 4. DENEYSSEL UYGULAMALAR (EXPERİMENTAL APPLİCATIONS)

##### 4.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada sınıflandırma işlemi için, YSA, DVM ve KNN kullanılarak 5-kat çapraz doğrulama uygulanmıştır. DVM'ler polinom ve radyal temelli fonksiyon çekirdekleri kullanılarak eğitilmiştir. YSA, iki farklı çekirdekle eğitilmiş DVM'ler ve KNN'den elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin başarımları doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F-skoru oranlarına dayalı olarak yapılmıştır. Sınıflandırma problemlerindeki değerlendirme ölçütleri, karışıklık matrisi adı verilen her sınıf için doğru ve yanlış sınıflandırılmış örnek sayılarının bulunduğu bir matris kullanılarak yapılır. YP, YN, DP ve DN kavramları aşağıda belirtildiği gibi tanımlanabilir:

- Yanlış pozitifler (YP): negatif sınıftan olan, pozitif olarak tahmin edilen örnekler.
- Yanlış negatifler (YN): gerçek sınıfı pozitif olan negatif olarak tahmin edilen örnekler.
- Doğru pozitifler (DP): pozitif sınıfa ait doğru tahmin edilen örnekler.
- Doğru negatifler (DN): negatif sınıfa ait olarak doğru tahmin edilen örnekler.

$$\text{Doğruluk} = \frac{|DN|+|DP|}{|YN|+|YP|+|DN|+|DP|} \quad (4)$$

Hassasiyet ölçümü, ikili problemlerde her bir sınıf için sınıflandırıcının etkinliğini değerlendirir. Gerçek pozitif oran olarak bilinen hassasiyet, pozitif sınıfa ait tahmin edilen verilerin gerçek pozitif verilerine oranıdır. Hassasiyet ölçümü denklem 5'de verilmiştir.

$$\text{Hassasiyet} = \frac{|DP|}{|YN|+|DP|} \quad (5)$$

Kesinlik (P), pozitif bir tahminin doğru olma olasılığını tahmin eden bir ölçüdür. Kesinlik ölçümü denklem 6'da verilmiştir.

$$\text{Kesinlik(P)} = \frac{|DP|}{|DP|+|YP|} \quad (6)$$



F-skoru, pozitif kestirim oranı ve duyarlılık ölçülerinin uyumlu bir ortalaması olup denklem 7’de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$F - \text{skor} = \frac{2*|DP|}{2*|DP|+|YP|+|YN|} \quad (7)$$

Yukarıda verilen denklemler genellikle performans değerlendirme ölçütlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Ayrıca bu hesaplama ölçüleri ikili sınıfa ait veri setlerinde kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Ancak ikiden fazla sınıfa ait sınıflandırma problemlerinin çözümü için genel olarak bu yöntemlerin genelleştirilmiş halleri kullanılmaktadır. Modelin performansını ölçmek ve deneklerin günlük ruh hallerinin kayıtlar üzerinde etkileri için üç farklı deney yapılmıştır. İlk deneyde kayıtların hepsi farklı günlerin sabah saatlerinde alınmıştır. İkinci deneyde kayıtlar farklı günlerin öğlen saatlerinde alınmıştır. Üçüncün deneyde ise sabah ve öğlen saatlerinde alınan kayıtlar birleştirilmiştir. Hazırlanmış olduğumuz veri seti kullanarak gerçekleştirmiş olduğumuz deneylerden elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’de verilmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen sınıflandırma sonuçlarının karşılaştırılması şekil 10’da verilmiştir. Önerilen yöntemin uygulaması, İ7 2.50GHz işlemci, 12GB hafıza ve NVIDIA 940M GPU donanım özelliklerine sahip makine üzerinde yapılmıştır. Uygulama için gerekli yazılım kodları matlab2018a kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 2’de deney 1 (sabah saatlerindeki kayıtlar)’den elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Ayrıca deney1’den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi şekil 7’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Deney 1’den Elde Edilen Sınıflandırma Sonuçları

| Model         | Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi | Doğruluk % | Kesinlik % | Hassasiyet % | F-skoru % |
|---------------|--|------------|------------|--------------|-----------|
| YSA           | %70 - %30  | 74,32      | 75,80      | 74,31        | 74,45     |
| YSA           | %80 - %20  | 78,44      | 78,30      | 78,47        | 78,33     |
| DVM (Polinom) | %70 - %30  | 71,91      | 72,59      | 71,53        | 71,41     |
| DVM (Polinom) | %80 - %20  | 75,63      | 75,91      | 75,70        | 75,58     |
| DVM (RBF)     | %70 - %30  | 70,14      | 70,65      | 70,14        | 69,94     |
| DVM (RBF)     | %80 - %20  | 73,26      | 72,71      | 72,92        | 72,64     |
| KNN           | %70 - %30  | 65,77      | 67,70      | 65,97        | 65,98     |
| KNN           | %80 - %20  | 68,12      | 70,68      | 68,06        | 68,40     |

| Karışıklık Matrisi | Mutlu | Hüzünlü | Rahatlatıcı | Gergin |
|--------------------|-------|---------|-------------|--------|
| Mutlu              | 32    | 1       | 0           | 3      |
| Hüzünlü            | 4     | 23      | 7           | 2      |
| Rahatlatıcı        | 0     | 8       | 28          | 0      |
| Gergin             | 3     | 2       | 1           | 30     |

**Şekil 7:** Deney 1’den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi

Tablo 3’de deney 2 (öğlen saatlerindeki kayıtlar)’den elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Ayrıca Deney 2’den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi şekil 8’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Deney 2'den Elde Edilen Sınıflandırma Sonuçları

| Model         | Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi | Doğruluk % | Kesinlik % | Hassasiyet % | F-skoru % |
|---------------|--|------------|------------|--------------|-----------|
| YSA           | %70 - %30  | 71,62      | 72,27      | 71,53        | 71,39     |
| YSA           | %80 - %20  | 73,52      | 73,32      | 73,61        | 73,35     |
| DVM (Polinom) | %70 - %30  | 69,54      | 69,96      | 69,45        | 69,25     |
| DVM (Polinom) | %80 - %20  | 72,22      | 72,37      | 72,22        | 71,93     |
| DVM (RBF)     | %70 - %30  | 71,36      | 72,84      | 71,53        | 71,62     |
| DVM (RBF)     | %80 - %20  | 72,73      | 73,09      | 72,92        | 72,59     |
| KNN           | %70 - %30  | 66,15      | 65,17      | 65,98        | 65,27     |
| KNN           | %80 - %20  | 67,87      | 69,37      | 68,06        | 68,00     |

| Karışıklık Matrisi | Mutlu | Hüzünlü | Rahatlatıcı | Gergin |
|--------------------|-------|---------|-------------|--------|
| Mutlu              | 26    | 4       | 4           | 2      |
| Hüzünlü            | 7     | 21      | 6           | 2      |
| Rahatlatıcı        | 0     | 5       | 28          | 3      |
| Gergin             | 4     | 1       | 0           | 31     |

**Şekil 8:** Deney 2'den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi

Tablo 4'de deney 3 (sabah + öğlen saatlerinde alınan kayıtlar)'den elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Ayrıca Deney 3'den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi şekil 9'da verilmiştir.

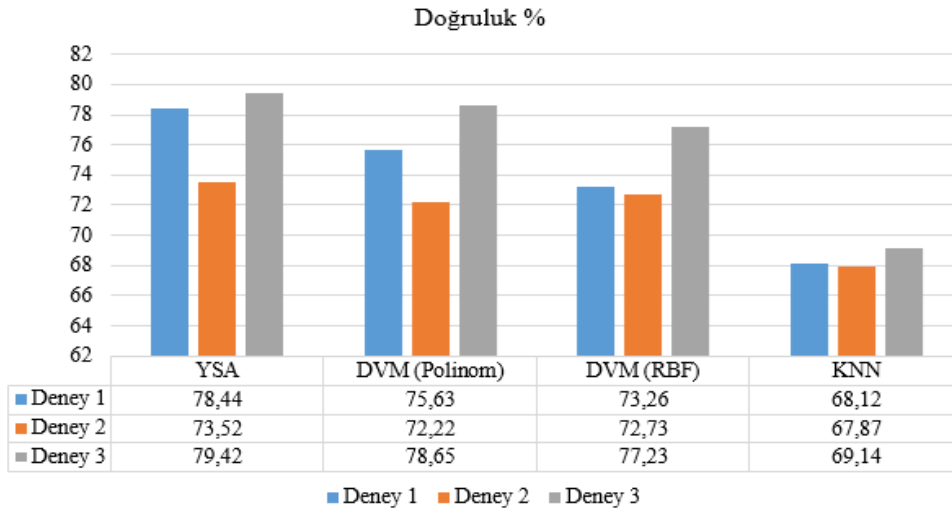
**Tablo 4.** Deney 3'den Elde Edilen Sınıflandırma Sonuçları

| Model         | Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi | Doğruluk % | Kesinlik % | Hassasiyet % | F-skoru % |
|---------------|--|------------|------------|--------------|-----------|
| YSA           | %70 - %30  | 77,34      | 77,53      | 77,43        | 77,29     |
| YSA           | %80 - %20  | 79,42      | 79,53      | 79,51        | 79,12     |
| DVM (Polinom) | %70 - %30  | 75,91      | 76,67      | 76,04        | 76,18     |
| DVM (Polinom) | %80 - %20  | 78,65      | 75,86      | 91,67        | 83,02     |
| DVM (RBF)     | %70 - %30  | 73,13      | 73,53      | 72,92        | 73,12     |
| DVM (RBF)     | %80 - %20  | 77,23      | 77,95      | 77,08        | 77,13     |
| KNN           | %70 - %30  | 68,76      | 69,25      | 68,75        | 68,58     |
| KNN           | %80 - %20  | 69,14      | 71,26      | 69,10        | 69,08     |

| Karışıklık Matrisi | Mutlu | Hüzünlü | Rahatlatıcı | Gergin |
|--------------------|-------|---------|-------------|--------|
| Mutlu              | 70    | 1       | 0           | 1      |
| Hüzünlü            | 4     | 47      | 16          | 5      |
| Rahatlatıcı        | 10    | 9       | 51          | 2      |
| Gergin             | 6     | 5       | 0           | 61     |

**Şekil 9:** Deneysel 3'den elde edilen en iyi sınıflandırma sonucuna ait karışıklık matrisi

Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'deki sonuçlara göre, eğitim verisinin artırılması ile birlikte sınıflandırma doğruluğu da artmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak, deneylerde kullanılan örnek sayısının artırılması modelin doğruluğunu da arttırmıştır. Ayrıca Tablo 2'deki veriler Tablo 3'deki veriler ile kıyaslandığında sabah saatlerinde alınan kayıtlardan daha fazla sınıflandırma başarımı elde edilmiştir. Bu durum farklı saatlerdeki ruh hallerinin sınıflandırma üzerindeki etkisini göstermektedir.



**Şekil 10:** Deneylerden Elde Edilen En İyi Sınıflandırma Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo 5'de DEAP veri setinden elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Ayrıca bu veri kümesinden elde edilen sonuçların önceki çalışmalarla karşılaştırılması tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 5.** DEAP veri setinden Elde Edilen Sınıflandırma Sonuçları

| Model         | Verinin Eğitim ve Test için Farklı oranlarda Bölünmesi | Doğruluk % | Kesinlik % | Hassasiyet % | F-skoru % |
|---------------|--|------------|------------|--------------|-----------|
| YSA           | %70 - %30  | 69,23      | 69,58      | 69,42        | 69,12     |
| YSA           | %80 - %20  | 70,12      | 70,46      | 70,24        | 70,02     |
| DVM (Polinom) | %70 - %30  | 67,16      | 67,42      | 67,35        | 67,12     |
| DVM (Polinom) | %80 - %20  | 68,24      | 68,67      | 68,42        | 68,11     |
| DVM (RBF)     | %70 - %30  | 64,41      | 64,62      | 64,51        | 64,24     |
| DVM (RBF)     | %80 - %20  | 66,32      | 66,57      | 66,46        | 66,15     |
| KNN           | %70 - %30  | 64,23      | 64,61      | 64,45        | 64,07     |
| KNN           | %80 - %20  | 65,36      | 65,61      | 65,52        | 65,14     |

**Tablo 6.** DEAP Veri seti için Performans Karşılaştırılması

| Metod           | Sınıflandırıcı | Doğruluk % |
|-----------------|----------------|------------|
| [41]            | CapsNet        | 68,20      |
| [42]            | Random Forest  | 72,07      |
| [43]            | DVM            | 60,50      |
| Önerilen Yöntem | YSA            | 70,12      |

Tablo 6'te görüldüğü gibi, önerilen yöntemin literatürde kullanılan diğer iki yöntemden daha iyi performans gösterdiği gözlenmektedir. Bu bilgiler ışığında, önerilen mimarinin insan duygularının EEG ile tanınmasında etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, bazı sinyal işleme metotları ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak müzik dinlerken EEG sinyalleri üzerinden duygu tanıma için yeni bir yöntem sunulmuştur. Sessiz ve karanlık ortamda 10 kişinin katılım sağladığı bir deney yapılmıştır. Farklı müzik türlerinden seçilen şarkılar eşit örneklem frekansına getirilerek deneye katılan kişilere dinletilmiştir. Deneklere müzik dinletilirken aynı anda bu deneklerin EEG sinyalleri EEG kayıt cihazı ile bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Duygular belirli bir süre içerisinde anlamlılık kazandığı için her EEG kaydı 30 saniye olarak alınmıştır. Dinletilen her şarkının sonunda denneğin hissettiği duygu kendisine sorulmuş ve dengeğe ait kaydedilen EEG sinyalleri etiketlenmiştir. Duygu algısının öznel olmasından dolayı dört adet duygu etiketi kullanılmıştır. Bu etiketler gergin, hüzünlü, mutlu veya rahatlatıcı duygu olarak tanımlanmıştır. Etiketlenerek kaydedilen EEG sinyalleri, öncelikle bant geçiren filtreden geçirilmiştir. Daha sonra filtrelenmiş sinyallerden öznitelik çıkarılarak sınıflandırma işlemi yapılmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sınıflandırıcı olarak YSA, DVM ve KNN kullanılmıştır. En iyi sınıflandırma başarısı ortalama olarak %79,42 olarak YSA ile kendi veri setimiz üzerinden elde edilmiştir. Ayrıca DEAP veri seti kullanılarak %70,12 doğruluk elde edilmiştir. Sonuçlara göre, önerilen yöntemin insan duygularını tanıma problemi için kullanılabileceği belirtilmiştir. Gelecekte çalışmalar için uyarıcı olarak müzik verileri kullanılarak EEG veri setleri hazırlanması ve derin öğrenme modellerinin insan duygularının tanınma probleminde kullanılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. C. Pratt, *Music as the language of emotion*. Oxford, England: The Library of Congress, 1952.
- [2] R.-F. Day, C.-H. Lin, W.-H. Huang, and S.-H. Chuang, "Effects of music tempo and task difficulty on multi-attribute decision-making: An eye-tracking approach," *Comput. Human Behav.*, vol. 25, no. 1, pp. 130–143, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.CHB.2008.08.001.
- [3] G. Varotto, P. Fazio, D. R. Sebastiano, G. Avanzini, S. Franceschetti, and F. Panzica, "Music and emotion: An EEG connectivity study in patients with disorders of consciousness," in *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2012, pp. 5206–5209, doi: 10.1109/EMBC.2012.6347167.
- [4] D. HURON, "Is Music an Evolutionary Adaptation?," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 930, no. 1, pp. 43–61, 2001, doi: 10.1111/j.1749-6632.2001.tb05724.x.
- [5] I. Peretz and R. J. Zatorre, "Brain Organization for Music Processing," *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 56, no. 1, pp. 89–114, 2005, doi: 10.1146/annurev.psych.56.091103.070225.
- [6] S. M. Alarcão and M. J. Fonseca, "Emotions Recognition Using EEG Signals: A Survey," *IEEE Trans. Affect. Comput.*, vol. 10, no. 3, pp. 374–393, 2019, doi: 10.1109/TAFFC.2017.2714671.
- [7] P. J. Lang, "The emotion probe: Studies of motivation and attention.," *American Psychologist*, vol. 50, no. 5. American Psychological Association, US, pp. 372–385, 1995, doi: 10.1037/0003-066X.50.5.372.
- [8] R. W. Picard, *Affective Computing*. The MIT Press, 2000.
- [9] L. Shu *et al.*, "A Review of Emotion Recognition Using Physiological Signals," *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 7, p. 2074, Jun. 2018, doi: 10.3390/s18072074.

- [10] A. M. Bhatti, M. Majid, S. M. Anwar, and B. Khan, "Human emotion recognition and analysis in response to audio music using brain signals," *Comput. Human Behav.*, vol. 65, pp. 267–275, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.CHB.2016.08.029.
- [11] F. Zhang, H. Meng, and M. Li, "Emotion extraction and recognition from music," *2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. IEEE, 2016, doi: 10.1109/fskd.2016.7603438.
- [12] A. Goshvarpour and A. Goshvarpour, "EEG spectral powers and source localization in depressing, sad, and fun music videos focusing on gender differences," *Cogn. Neurodyn.*, vol. 13, no. 2, pp. 161–173, 2018, doi: 10.1007/s11571-018-9516-y.
- [13] A. M. Bhatti, M. Majid, S. M. Anwar, and B. Khan, "Human emotion recognition and analysis in response to audio music using brain signals," *Comput. Human Behav.*, vol. 65, pp. 267–275, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.CHB.2016.08.029.
- [14] C. Shahnaz, Shoaib-Bin-Masud, and S. M. S. Hasan, "Emotion recognition based on wavelet analysis of Empirical Mode Decomposed EEG signals responsive to music videos," *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. IEEE, 2016, doi: 10.1109/tencon.2016.7848034.
- [15] Y. Liu *et al.*, "What Strikes the Strings of Your Heart?—Multi-Label Dimensionality Reduction for Music Emotion Analysis via Brain Imaging," *IEEE Trans. Auton. Ment. Dev.*, vol. 7, no. 3, pp. 176–188, 2015, doi: 10.1109/tamd.2015.2429580.
- [16] R. Nawaz, H. Nisar, and Y. V. Voon, "The Effect of Music on Human Brain; Frequency Domain and Time Series Analysis Using Electroencephalogram," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45191–45205, 2018, doi: 10.1109/access.2018.2855194.
- [17] J.-L. Hsu, Y.-L. Zhen, T.-C. Lin, and Y.-S. Chiu, "Affective content analysis of music emotion through EEG," *Multimed. Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 195–210, 2017, doi: 10.1007/s00530-017-0542-0.
- [18] G. Balasubramanian, A. Kanagasabai, J. Mohan, and N. P. G. Seshadri, "Music induced emotion using wavelet packet decomposition—An EEG study," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 42, pp. 115–128, 2018, doi: 10.1016/j.bspc.2018.01.015.
- [19] M. Yanagimoto and C. Sugimoto, "Recognition of persisting emotional valence from EEG using convolutional neural networks," *2016 IEEE 9th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA)*. IEEE, 2016, doi: 10.1109/iwcia.2016.7805744.
- [20] C.-Y. Liao, R.-C. Chen, and S.-K. Tai, "Emotion stress detection using EEG signal and deep learning technologies," *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*. IEEE, 2018, doi: 10.1109/icasi.2018.8394414.
- [21] S. Vaid, P. Singh, and C. Kaur, "EEG Signal Analysis for BCI Interface: A Review," *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. IEEE, 2015, doi: 10.1109/acct.2015.72.
- [22] Siuly, "ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF EEG SIGNALS," UNIVERSITY OF SOUTHERN QUEENSLAND, 2012.
- [23] B. Farnsworth, "What is EEG (Electroencephalography) and How Does it Work?" <https://imotions.com/blog/what-is-eeeg>.
- [24] S. D. Puthankattil, P. Joseph, U. R. Acharya, and C. Lim, "EEG signal analysis: a survey," *J. Med. Syst.*, vol. 34, pp. 195–212, Apr. 2010, doi: 10.1007/s10916-008-9231-z.
- [25] H. . Jasper, "The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 10, pp. 371–375, 1958.
- [26] S. Koelstra *et al.*, "DEAP: A Database for Emotion Analysis ;Using Physiological Signals," *IEEE Trans. Affect. Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 18–31, 2012, doi: 10.1109/T-AFFC.2011.15.
- [27] B. S. Atal, "Automatic recognition of speakers from their voices," *Proc. IEEE*, vol. 64, no. 4, pp. 460–475, 1976, doi: 10.1109/proc.1976.10155.
- [28] S. Gupta, J. Jaafar, W. F. Wan Ahmad, and A. Bansal, "Feature Extraction Using Mfcc," *Signal Image*

- Process. An Int. J.*, vol. 4, pp. 101–108, Aug. 2013, doi: 10.5121/sipij.2013.4408.
- [29] S. I.-J. Chien, Y. Ding, and C. Wei, “Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks,” *J. Transp. Eng.*, vol. 128, no. 5, pp. 429–438, 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-947x(2002)128:5(429).
- [30] S. M. J. Pappu and S. N. Gummedi, “Artificial neural network and regression coupled genetic algorithm to optimize parameters for enhanced xylitol production by *Debaryomyces nepalensis* in bioreactor,” *Biochem. Eng. J.*, vol. 120, pp. 136–145, 2017, doi: 10.1016/j.bej.2017.01.010.
- [31] Q. Yang, S. Le Blond, R. Aggarwal, Y. Wang, and J. Li, “New ANN method for multi-terminal HVDC protection relaying,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 192–201, 2017, doi: 10.1016/j.epr.2017.03.024.
- [32] D. Niebur and A. J. Germond, “Power flow classification for static security assessment,” *Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*. IEEE, doi: 10.1109/ann.1991.213502.
- [33] “Support Vector Machines, 1992; Boser, Guyon, Vapnik,” in *SpringerReference*, Springer-Verlag.
- [34] A. Widodo and B.-S. Yang, “Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, 2007, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.12.007.
- [35] E. Kabir, Siuly, and Y. Zhang, “Epileptic seizure detection from EEG signals using logistic model trees,” *Brain Informatics*, vol. 3, no. 2, pp. 93–100, 2016, doi: 10.1007/s40708-015-0030-2.
- [36] B. Schölkopf and A. J. Smola, *Smola, A.: Learning with Kernels - Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*. MIT Press, Cambridge, MA, vol. 98. 2001.
- [37] Y. Zhang, X. Ji, and S. Zhang, “An approach to EEG-based emotion recognition using combined feature extraction method,” *Neurosci. Lett.*, vol. 633, pp. 152–157, 2016, doi: 10.1016/j.neulet.2016.09.037.
- [38] H. Jégou, M. Douze, and C. Schmid, “Product Quantization for Nearest Neighbor Search,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 1, pp. 117–128, 2011, doi: 10.1109/tpami.2010.57.
- [39] T. Cover and P. Hart, “Nearest neighbor pattern classification,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 1967, doi: 10.1109/tit.1967.1053964.
- [40] C. Li *et al.*, “Using the K-Nearest Neighbor Algorithm for the Classification of Lymph Node Metastasis in Gastric Cancer,” *Comput. Math. Methods Med.*, vol. 2012, pp. 1–11, 2012, doi: 10.1155/2012/876545.
- [41] H. Chao, L. Dong, Y. Liu, and B. Lu, “Emotion Recognition from Multiband EEG Signals Using CapsNet,” *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2212, 2019, doi: 10.3390/s19092212.
- [42] V. Gupta, M. D. Chopda, and R. B. Pachori, “Cross-Subject Emotion Recognition Using Flexible Analytic Wavelet Transform From EEG Signals,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 6, pp. 2266–2274, 2019, doi: 10.1109/jsen.2018.2883497.
- [43] X. Li, D. Song, P. Zhang, Y. Zhang, Y. Hou, and B. Hu, “Exploring EEG Features in Cross-Subject Emotion Recognition,” *Front. Neurosci.*, vol. 12, 2018, doi: 10.3389/fnins.2018.00162.

## Investigation of Insert Material in Inserted Powder Injection Molding

 Mehmet SUBAŞI<sup>1,\*</sup> Kamran SAMET<sup>2</sup> Çetin KARATAŞ<sup>2</sup>
<sup>1</sup> Department of Machine and Metal Technology, Technical Sciences Vocational School, Gazi University, Ostim/Ankara, Turkey

<sup>2</sup> Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Teknikokullar/Ankara, Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 28/04/2020

Revision 01/05/2020

Accepted: 05/06/2020

#### Highlights

- Insert material.
- Tool steel.
- Melting

#### Keywords

Sintering

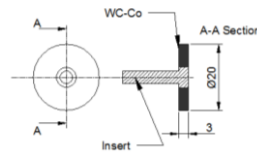
 Inserted powder injection  
 molding

Tungsten carbide

Insert

Powder injection molding

In this study, the suitability and effects of the insert material were investigated in the parts to be produced by the Inserted Powder Injection Molding (IPIM) method. Tungsten carbide cobalt (WC- 9%Co) feedstock was used in the experiments. In order to determine the effects of the insert material, inserts were prepared from steels 1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050), 1.2312, 1.2344, 1.2379 and 1.7225 (AISI4140). After injecting WC-Co feedstock on these inserts, sintering processes were carried out at 1200, 1250 and 1400 °C temperatures and dwell time of 60, 180 and 240 minutes.



**Figure A.** The specimen produced by the Inserted Powder Injection Molding method

**Purpose:** In this study, it was aimed to investigate the ideal insert material in the production of parts of which the inner part is steel and the outer part is WC-Co (9%) with IPIM method. As a result of the experiments, the effect of insert material on the production of inserted parts has been demonstrated.

**Theory and Methods:** Inserts were prepared from different steels in order to determine the necessary insert material that perfectly fitting at the first step of producing the parts with WC on the outside and steel on the inside. The inserts used in the experiments has been prepared from 1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050), 1.2312, 1.2344, 1.2379 and 1.7225 (AISI 4140) steels. After the inserts were prepared, they were placed in the mold and WC-9% Co feedstock were injected on the insert. After the injection process, the samples were sintered at 1200, 1250 and 1400 °C temperatures and 60, 180 and 240 minutes holding times. Heating rise rate in sintering experiments is 5 °C / minute. The hardness of the injected part after sintering was measured with (HV30) Emco Test Duravision 2000 brand hardness tester under 294.2 N load.

**Results:** As a result of the experiments, it was determined that inserts melted at 1400 °C sintering temperature but they preserve their geometric form at 1200 °C and 1250 °C temperature. However, at these temperatures (1200 °C - 1250 °C) it was determined that there was no diffusion between the insert and the injected region.

**Conclusion:** In this study, it is aimed to determine the suitable insert material for the production of insert parts with WC-Co outside and steel inside with the IPIM method.

- It was determined that tool steel (1.2379, 1.2344, 1.2312), plain carbon steel (1.0535 (AISI 1050)) and manufacturing steel (1.7225 (AISI4140)) melted at 1400 °C sintering temperature.
- It was determined that tool steel (1.2379, 1.2344, 1.2312), plain carbon steel (1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050)) and manufacturing steel ((1.7225 (AISI4140)) do not melt at 1200 and 1250 °C sintering temperatures but do not merge with injection region.
- It is determined that the carbon (C) ratio of the insert is effective in sintering conditions for producing sample of which the outer part WC-Co inner part steel by IPIM method.
- The hardness of the injected region of the sintered samples at 1200°C for 180 and 240 minutes was determined as 1020 HV and 1080 HV, respectively.
- The hardness of the injected region of the sintered samples at 1250°C for 180 and 240 minutes was determined as 1450 HV and 1505 HV, respectively.



## İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplamada İnsört Malzemesinin Araştırılması

Mehmet SUBAŞI<sup>1</sup>, \* Kamran SAMET<sup>2</sup>, Çetin KARATAŞ<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ostim/Ankara

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar/Ankara

### Öz

İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) kalın parçaların (>10 mm) üretilebilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde önceden hazırlanmış insörtler üzerine besleme stoku enjekte edilir. Enjeksiyon işleminden sonra kalıplanan parçalara bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanır. Bu çalışmada, İTEK yöntemi ile üretilecek parçalarda, insört malzemesinin uygunluğu ve etkileri araştırılmıştır. Deneylede tungsten karbür kobalt (WC-%9Co) besleme stoku kullanılmıştır. İnsört malzemesinin etkilerini belirlemek için DIN malzeme nolu, 1.2312, 1.2344, 1.2379, 1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050) ve 1.7225 (AISI 4140) çeliklerinden insörtler hazırlanmıştır. Bu insörtler üzerine WC besleme stoku enjekte edildikten sonra 1200, 1250 ve 1400 °C derecelerde ve 60, 180 ve 240 dakika sürelerde sinterleme işlemleri yapılmıştır. Deneyle sonucunda 1400°C sinterleme sıcaklığında insörtlerin eridiği, 1200 °C ve 1250 °C sıcaklıklarda ise geometrik formlarını koruduğu belirlenmiştir. Fakat bu sıcaklıklarda (1200 °C - 1250 °C) insört ile enjekte bölge arasında bir birleşme oluşmadığı belirlenmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*

*Başvuru: 28/04/2020*

*Düzeltilme: 01/05/2020*

*Kabul: 05/06/2020*

### Anahtar Kelimeler

*Sinterleme*

*İnsörtlü toz enjeksiyon*

*kalıplama*

*Tungsten karbür*

*İnsört*

*Toz enjeksiyon kalıplama*

### Keywords

*Sintering*

*Inserted powder injection*

*molding*

*Tungsten carbide*

*Insert*

*Powder injection molding*

## Investigation of Insert Material in Inserted Powder Injection Molding

### Abstract

Inserted powder injection molding (IPIM) is a method developed to produce of thick parts (> 10 mm). In this method, feedstock is injected onto the previously prepared inserts. After the injection process, binder removal and sintering processes are applied to the molded parts. In this study, the suitability and effects of the insert material were investigated in the parts to be produced by the IPIM method. Tungsten carbide cobalt (WC- 9%Co) feedstock was used in the experiments. In order to determine the effects of the insert material, inserts were prepared from steels DIN 1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050), 1.2312, 1.2344, 1.2379 and 1.7225 (AISI 4140). After injecting WC-Co feedstock on these inserts, sintering processes were carried out at 1200, 1250 and 1400 °C temperatures and dwell time of 60, 180 and 240 minutes. As a result of the experiments, it was determined that inserts melted at 1400 °C sintering temperature but they preserve their geometric form at 1200 °C and 1250 °C temperature. However, at these temperatures (1200 °C - 1250 °C) it was determined that there was no diffusion between the insert and the injected region.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK) teknolojisi toz metalürjisi ve plastik enjeksiyon kalıplama prensiplerinin birleşimine dayanmaktadır. TEK yönteminde enjeksiyon aşamasından sonra parçalara bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanır. TEK yöntemi ile seramik ve metal malzemelerden bazı sınırlamalar içerisinde parça üretimi oldukça yaygınlaşmıştır. Bu yöntem ile 10 mm den daha kalın parçaların üretiminde yöntemin tüm aşamalarında (kalıplama, bağlayıcı giderme, sinterleme) bir çok sıkıntı ile karşılaşmaktadır. Bu sıkıntılar İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama (İTEK) yöntemi ile aşılmıştır. İTEK yönteminde ilk olarak insörtler hazırlanır. Hazırlanan insörtler üzerine besleme stoku enjekte edilir. Enjeksiyon aşamasından sonra parçalara bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanır. Geliştirilen İTEK yöntemi ile farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerden 10 mm den daha kalın parçaların üretilmesi mümkün olmaktadır [1-3].



Literatürde farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip iki malzeme kullanarak yekpare parça üretimine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca son yıllarda İTEK yöntemi ile parça üretimi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Heaney ve arkadaşları [4], ko-enjeksiyon yöntemi ile parça üretimini araştırmışlardır. Çalışmalarında 316L paslanmaz çelik ve Fe-10Cr olmak üzere iki farklı besleme stoku kullanmışlardır. Deneyler sonucunda kusursuz numune elde edebilmek için parçanın içindeki ve dışındaki malzemelerin çekme oranlarının birbirine yakın olması gerektiğini belirlemişlerdir. Antusch ve arkadaşları [5] iç kısmı tungsten dış kısmı tungsten alaşımı olacak şekilde ko-enjeksiyon yöntemi ile parçalar üretmişlerdir. Deneyler sonucunda bu iki malzeme kullanarak kusursuz parçalar üretilebileceğini ortaya koymuşlardır. Simchi ve Petzoldt, [6] ko-enjeksiyon yöntemi ile tungsten karbür – kobalt (WC-Co) ve 316L paslanmaz çelik besleme stokları kullanarak parçalar üretmişlerdir. Sinterleme deneyleri sonucunda besleme stokları arasındaki çekme oranlarındaki farklılıktan dolayı güçlü bir birleşme elde edemediklerini belirtmişlerdir. Zhang ve arkadaşları [7] gözenek değeri farklı seramiklerden ko-enjeksiyon yöntemi ile parçalar hazırlamışlardır. Deneyler sonucunda problemsiz ara yüzeye sahip parçalar üretebilmişlerdir. Dourandish ve Simchi [8] seramik (3Y-TZP) ve paslanmaz çelik (430SS) tozlarının birleşmelerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda sinterleme atmosferinin birleşme üzerinde çok etkili bir parametre olduğunu belirlemişlerdir. Ruh ve arkadaşları [9, 10] farklı çalışmalarda mikro toz enjeksiyon yöntemi ile iki farklı malzemeden oluşan parçaların üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında sinterleme parametrelerinin parçaların birleşim türünde etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Safarian ve arkadaşları [2] İTEK yöntemi ile iç kısmı 316L paslanmaz çelik ve dış kısmı 316L besleme stoku olan parçaların üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında kusursuz parça üretiminde en etkili parametrenin sinterleme sıcaklığı olduğunu belirlemişlerdir. Gal ve arkadaşları [11] TEK yöntemi ile iki farklı (316L (SUS316L)/zirconia) besleme sokundan tek parça üretmek için deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda besleme stoklarının çekme oranlarındaki farklılıktan dolayı numunelerde çatlaklar olduğunu belirlemişlerdir. Subaşı ve arkadaşları [1] İTEK yöntemi ile iç kısmı 4340 dış kısmı WC besleme stoku olan parçaların üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında insört ile besleme stoku bölgeleri arasında ara katman kullanımının difüzyon bağımlı pozitif yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Koçak ve arkadaşları [3, 12] İTEK yöntemi ile WC parça üretimi üzerine yaptıkları çalışmada HSS'nin insört malzemesi olarak kullanılmasının uygun olmadığını belirlemişlerdir. Yaptıkları başka bir çalışmada da insört olarak kullandıkları HSS malzemesini nikel ile kaplamalarına rağmen, insört ile enjekte bölge arasında olumlu sonuç alamadıklarını belirtmişlerdir. Liu ve arkadaşları [13] mıknaş özelliği olan insörtler üzerine alüminyum besleme stoku enjekte etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda mıknaşlanma özelliğine sahip alüminyum parçaların İTEK yöntemi ile üretilebileceği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada, İTEK yöntemi ile dış kısmı WC-%9Co iç kısmı çelik parça üretiminde ideal insört malzemesinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu çerçevede, 1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050), 1.2312, 1.2344, 1.2379 ve 1.7225 (AISI4140) olmak üzere altı farklı çelik türünden insörtler hazırlanmıştır. Hazırlanan insörtler üzerine WC-%9Co besleme stoku enjekte edilmiştir. Enjeksiyon işleminden sonra parçalara bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Sinterleme deneyleri 1200, 1250 ve 1400 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve 60, 180 ve 240 dakika sürelerde yapılmıştır. İnsört malzemesinin parça üretimindeki etkisi ortaya konulmuştur.

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

Parçaların hazırlanmasında kullanılan WC-%9Co besleme stoku RYER firmasından temin edilmiştir. Besleme stokunun kimyasal bileşimi Tablo 1 'de, teknik özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

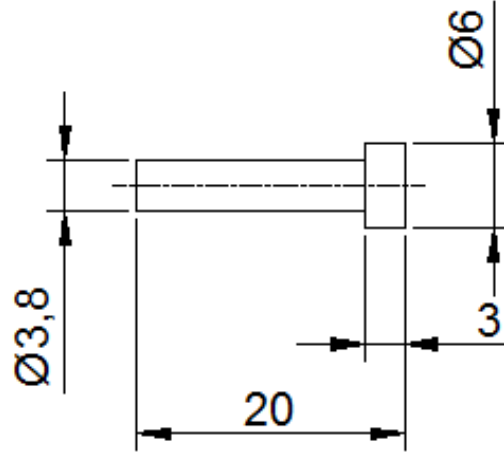
**Tablo 1.** WC-%9Co besleme stokunun kimyasal bileşimi

| Elementler  | C    | Cr   | Fe   | Mo   | Ni   | W     | Co   | O    |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| Kütlece (%) | 5,54 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 85,43 | 8,94 | 0,05 |

**Tablo 2.** WC- %9 Co besleme stokunun teknik özellikleri özellikleri

| Toz şekli        | Yoğunluk                | Toz boyutu ( $\mu\text{m}$ ) |                 |                 |
|------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
|                  |                         | D <sub>10</sub>              | D <sub>50</sub> | D <sub>90</sub> |
| Karmaşık şekilli | 8.0600g/cm <sup>3</sup> | 0,15                         | 0,28            | 0,52            |

Dış kısmı WC iç kısmı çelik parçaların tek aşamada kusursuz olarak elde edilebilmesi için gerekli insört malzemesini belirleyebilmek için farklı çeliklerden insörtler hazırlanmıştır (Şekil 1). Parçaların hazırlanmasında kullanılan insört malzemelerinin kimyasal bileşimleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Şekil 1.** Parçaların üretiminde kullanılan insört geometrisi**Tablo 3.** İnsörtlerin hazırlanmasında kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi

| Malzeme                      | Kütlece % |      |     |     |      |    |      |   |       |       |
|------------------------------|-----------|------|-----|-----|------|----|------|---|-------|-------|
|                              | C         | Si   | Mn  | Cr  | Mo   | Ni | V    | W | P     | S     |
| <b>1.2379</b>                | 1,52      | 0,35 | 0,4 | 12  | 0,85 | -  | 0,85 | - | 0,03  | 0,03  |
| <b>1.2344</b>                | 0,43      | 1,1  | 0,4 | 5,5 | 1,3  | -  | 1,1  | - | 0,03  | 0,03  |
| <b>1.2312</b>                | 0,4       | 0,4  | 1,5 | 1,9 | 0,2  | -  | -    | - | 0,03  | 0,05  |
| <b>1.0402</b><br>(AISI 1020) | 0,25      | 0,4  | 0,5 | -   | -    | -  | -    | - | 0,045 | 0,045 |
| <b>1.0535</b><br>(AISI 1050) | 0,5       | 0,4  | 0,8 | -   | -    | -  | -    | - | 0,035 | 0,035 |
| <b>1.7225</b><br>(AISI4140)  | 0,4       | 0,2  | 0,8 | 1,0 | 0,2  | -  | -    | - | 0,025 | 0,025 |

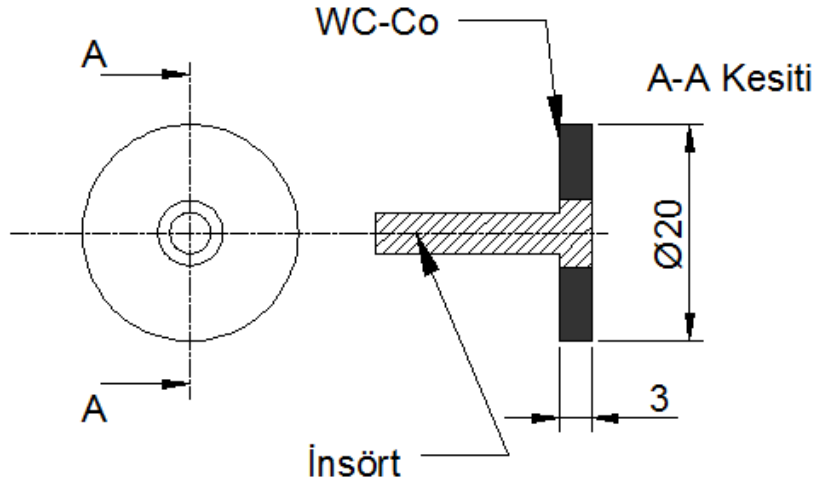
## 2.1. İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama, Bağlayıcı Giderme ve Sinterleme (Inserted Powder Injection Molding, Debiding and Sintering)

Deney numunelerinin enjeksiyon işlemi için ARBURG Allrounder 220S Toz enjeksiyon kalıplama tezgahı kullanılmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan enjeksiyon parametreleri Tablo 4 de verilmiştir.

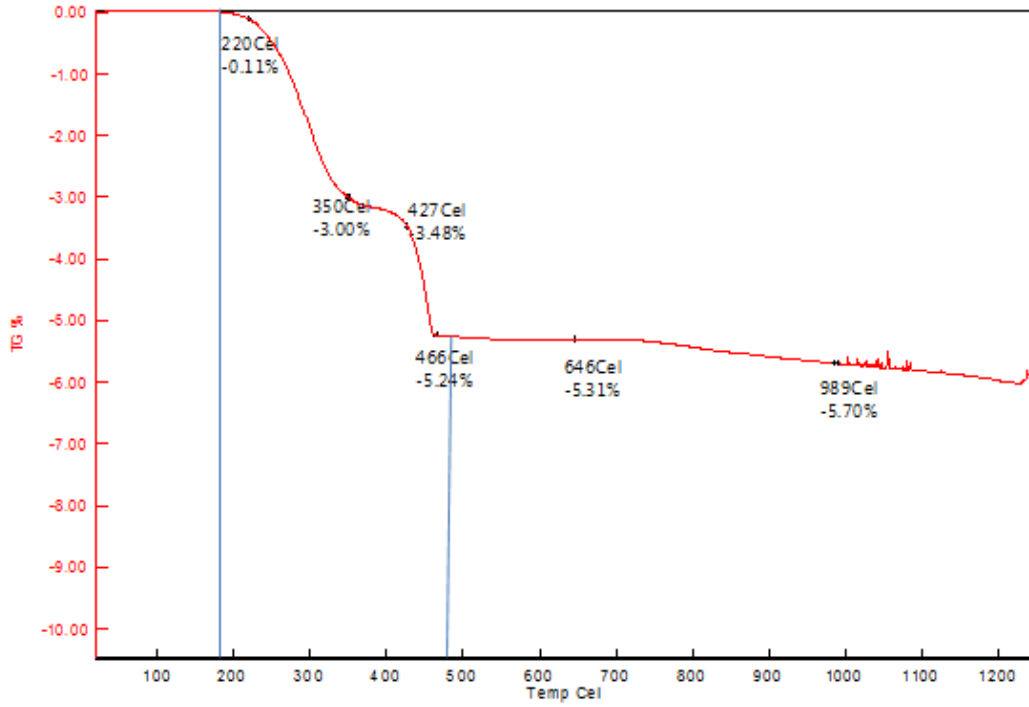
**Tablo 4.** Enjeksiyon parametreleri

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| Enjeksiyon hızı (cm <sup>3</sup> /s) | 50  |
| Enjeksiyon basıncı (bar)             | 270 |
| Enjeksiyon süresi (s)                | 3   |
| Ütüleme basıncı (bar)                | 50  |
| Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)            | 200 |
| Kalıp sıcaklığı (°C)                 | 45  |
| Soğuma süresi (s)                    | 5   |

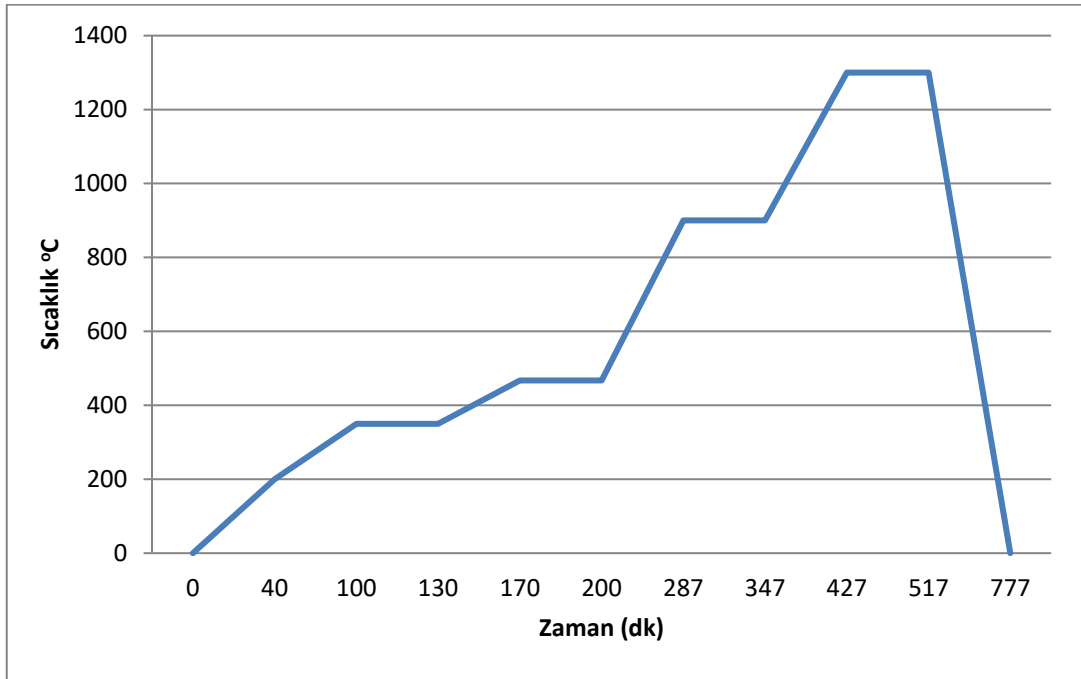
İnsörtler hazırlandıktan sonra kalıp içerisine yerleştirilmiş ve üzerine WC- %9 Co besleme stoku basılmıştır. Kalıplama işleminden sonra numunelerin dış çapı 20 mm enjekte bölgenin kalınlığı 3 mm olmuştur (Şekil 2).

**Şekil 2.** Enjeksiyon işleminde üretilen numune

Enjeksiyon işleminden sonra numunelere kimyasal ve ısıl olmak üzere iki aşamalı bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Kimyasal bağlayıcı giderme aşaması numunelerin 60°C sıcaklıkta etanol çözeltisi içerisinde 48 saat bekletilmesi ile yapılmıştır. Isıl bağlayıcı giderme parametrelerinin belirlenmesi için besleme stokuna uygulanan termogravimetrik (TG) analiz sonucundan yararlanılmıştır (Şekil 3).TG analizi sonucunda besleme stokundaki bağlayıcıların büyük bir kısmının (%5,24) 175-475 °C sıcaklıklarda yapıdan uzaklaştığı tespit edilmiştir. 475 °C sıcaklıktan sonra ise sinterleme sıcaklığına kadar önemli bir kayıp olmadığı belirlenmiştir. Sinterleme işlemleri ise %95 N2 ve %5 H2 karışımı gazı altında tüp fırında yapılmıştır. Isıl bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri aynı fırın içerisinde Şekil 4 de verilen adımlarda gerçekleştirilmiştir. Sinterleme deneyleri 1200, 1250 ve 1400 °C derecelerde ve 60, 180 ve 240 dakika bekleme sürelerinde yapılmıştır. Sinterleme deneylerindeki sıcaklık artış hızı 5 °C/dakika dır.



Şekil 3. WC-9Co besleme stokunun TG analizi



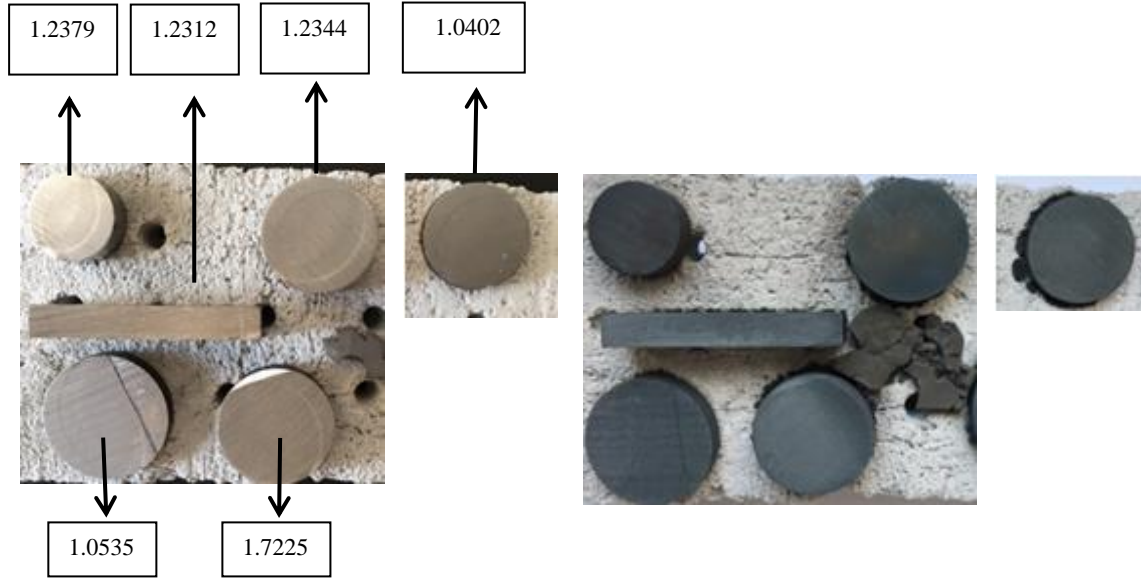
Şekil 4. Isıl bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamaları

## 2.2. Sertlik Ölçümü ve Görüntü İncelemeleri (Hardness Measurement and Image Examinations)

Enjekte kısmın sinterleme sonrası sertlikleri (HV30) Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçme cihazıyla 294,2 N yük altında ölçülmüştür. Enjekte bölge ile insört arasındaki alan JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir.

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

Çalışmada ilk olarak takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050)) ve imalat çeliklerinin (1.7225 (AISI 4140)) yüksek sıcaklıktaki davranışlarını görmek için çelikler 1400 °C 180 dakika fırınlanmışlardır (Şekil 5).



**Şekil 5.** Farklı çelik malzemelerinin yüksek sıcaklık sonrası fiziksel durumları a) fırınlama öncesi b) fırınlama sonrası

Deney sonucunda insört malzemelerinde herhangi bir erime olmadığı belirlenmiştir. Ön deney sonrası WC-%9Co besleme stoku ile kusursuz insörtlü parça üretebilmek için takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050)) ve imalat çeliği (1.7225 (AISI 4140)) malzemelerinden insörtler hazırlanmış ve üzerlerine WC-%9Co besleme stoku enjekte edilmiştir.

Enjeksiyon ve bağlayıcı giderme işlemlerinden sonra numuneler 1400 °C 60 dakika kontrol atmosferli tüp fırın içerisinde sinterlenmişlerdir. Sinterleme deneyi sonucunda takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0535 (AISI 1050)) insörtlerinin eridiği görülmüştür (Şekil 6). Sımchı ve Petzoldt [6] yaptıkları çalışmada malzemelerin temas bölgelerinde karbon (C) ve kobalt (Co) difüzyonundan dolayı 1220 °C de sıvı faz oluştuğunu ve oluşan sıvı fazdan ölçüsel stabilitenin de etkilendiği belirlemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan insört malzemelerinin içerisindeki C oranları besleme stokunun içindeki C oranından düşüktür (Tablo 1-3). Literatürde yapılan çalışmalarda iki malzemenin difüzyonunda yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine hareket olduğu belirtilmiştir [14]. İTEK yöntemi ile WC-Co parça üretimine yönelik çalışmalarda insört olarak HSS kullanıldığı zaman yüksek sıcaklıkta insörtün eridiği belirtilmektedir. Bunun sebebi olarak insört yüzeyine C ve Co geçişinden dolayı sıvı faz sinterleme sıcaklığının azalması gösterilmiştir [1]. Bu çalışmada da insörtlerin yapıldığı malzemelerin içerisinde Co yoktur ve C oranları da WC-Co besleme stokundan düşüktür. Bu nedenle besleme stoku içerisindeki C ve Co insört tarafına difüzyon olduğu ve insörtün C ve Co oranının artmasına sebep olarak 1400 °C sıcaklıkta eridiği düşünülmektedir.



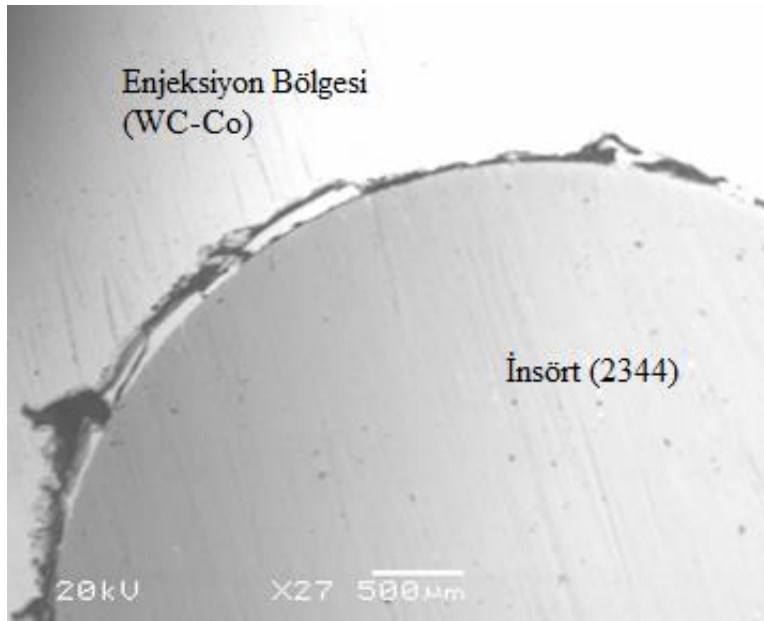
**Şekil 6.** 1400 °C de 60 dakika sinterlenen numuneler a) 1.2379 b) 1.2344 c) 1.2312 çeliği

1020 çeliğinden yapılan insörtlerde diğer malzemelerden yapılan insörtlere göre geometrik bozulma çok fazla olmuştur. Bununla sebebi olarak iç ve dış yapı arasındaki termal genişleme katsayısının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir [5, 6, 11]

1400 °C de sinterleme de insörtlerin erimesi üzerine deneyler 1200 ve 1250 °C lerde ve 180 ila 240 dakikalarda yapılmıştır. Takım çeliğinden (1.2379, 1.2344, 1.2312) hazırlanan insörtlerin bu sinterleme sıcaklığında erimeyeceği tespit edilmiştir (Şekil 7). Fakat erimeyen insörtlerin enjeksiyon bölgesi (WC-Co) ile tam bir difüzyon oluşturmadığı SEM görüntülerinde belirlenmiştir (Şekil 8). Ayrıca difüzyon bölgesinin incelenmesi için parçaların parlatılması aşamasında insörtlerin kendi ekseni etrafında döndüğü tespit edilmiştir.



**Şekil 7.** 1200 °C de 240 dakika sinterlenen numuneler a) 1.2379 b) 1.2344 c) 1.2312 çeliği



**Şekil 8.** İnsört ile enjeksiyon bölgesi arasındaki birleşme bölgesi

Sade karbonlu çelikler ve imalat çelikleri ile 1200 °C de 240 dakika sürede yapılan sinterleme deneylerinde de insörtlerin erimediği görülmüştür (Şekil 9). Bu sinterleme deneyi sonrasında da insörtlerin enjeksiyon bölgesi ile bir difüzyon oluşturmadığı, belirlenmiştir. İki farklı malzemenin birbirine difüzyon olmasında sıcaklık ve sürenin temel faktörler içerisinde olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ve atmosferinin de difüzyon üzerinde etkili parametreler olduğu literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmektedir [1, 2, 8]. Bu çalışmada da 1200 ve 1250°C nin difüzyon bağının oluşması için yeterli bir sıcaklık olmadığı sonucuna varılmıştır.



**Şekil 9.** 1200 °C de 240 dakika sinterlenen numuneler a) 1.0535 (AISI 1050) b) 1.7225 (AISI 4140) c) 1.0402 (AISI 1020) çeliği

Literatürde yapılan çalışmalarda WC-Co besleme stokunun içerisindeki Co değerine bağlı olarak 1300-1600°C ve 60-90 dakika süreler arasında sinterlendiği belirtilmektedir [12, 15]. WC-Co parçalarda sinterleme sıcaklığının yükseltilmesi mekanik özelliklerin pozitif yönde değişmesine sebep olabilmektedir [15]. Ancak bu çalışmada görüldüğü üzere yüksek sıcaklıkta (1400 °C) takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0535 (AISI 1050)) ve imalat çeliğinden (1.7225 (AISI 4140)) yapılmış insörtler erimiştir. Bu durum deneylerin daha düşük sıcaklıklarda yapılmasına sebep olmuştur.

Çalışmada enjeksiyon bölgesinin sertlik değerindeki zamana bağlı değişimi belirlemek için 1200°C sıcaklık 180 ve 240 dakika sürede numuneler sinterlenmiştir. Deneyler sonucunda 180 dakika sinterlenen numunelerin enjeksiyon bölgesi 1020 HV sertlikte olurken, 240 dakika sinterlenen numunelerde bu bölge 1080 HV sertliğe ulaştığı görülmüştür. 1250°C sıcaklıkta 180 dakikada 1450 HV sertlik var iken 240 dakika da sinterlenen numunelerde ise 1505 HV sertlik değeri ölçülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalar da WC besleme stokunun sertliğinin sinterleme sıcaklığının ve süresine bağlı olarak artış gösterdiği ortaya konmuştur [15] Elde edilen sonuçlar çerçevesinde sinterleme sıcaklığının ve süresinin sertlik değeri üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

İTEK yöntemi ile dış kısmı WC-Co ve iç kısmı çelik insört parça üretiminde uygun insört malzemesinin belirlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada;

- 1400 °C sinterleme sıcaklığında takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0535 (AISI 1050)) ve imalat çeliğinin (1.7225 (AISI 4140)) eridiği belirlenmiştir
- 1200 ve 1250 °C sinterleme sıcaklığında takım çeliği (1.2379, 1.2344, 1.2312), sade karbonlu çelik (1.0402 (AISI 1020), 1.0535 (AISI 1050)) ve imalat çeliğinin (1.7225 (AISI 4140)) erimediği fakat enjeksiyon bölgesi ile de birleşmediği tespit edilmiştir.
- İTEK yöntemi ile üretilecek dış kısmı WC-Co iç kısmı çelik parça da insörtün karbon (C) oranının, sinterleme şartlarında etkili olduğu belirlenmiştir.
- 1200°C sıcaklık da 180 ve 240 dakika sürelerde sinterlenmiş numunelerin enjekte bölgesinin sertliği sırası ile 1020 HV ve 1080 HV olarak tespit edilmiştir.
- 1250°C sıcaklık da 180 ve 240 dakika sürelerde sinterlenmiş numunelerin enjekte bölgesinin sertliği sırası ile 1450 HV ve 1505 HV olarak tespit edilmiştir.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)**

Bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK (Proje No. 115M437) ve Gazi Üniversitesi'ne (Proje No. 07 / 2016-21) teşekkürlerimizi sunarız.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Subaşı, M., Koçak, H., Safarian, A., Karataş Ç. (2020). Investigation of functional core-rim composite part production by inserted powder injection moulding. *Materials Science and Technology*, 36, 293-298.
- [2] Safarian, A., Subaşı, M., Karataş, Ç. (2017). The effect of sintering parameters on diffusion bonding of 316L stainless steel in inserted metal injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 2165-2173.
- [3] Koçak, H., Subaşı, M., Karataş, Ç. (2019). Sinter bonding of AISI 4340 and WC-Co using Ni interlayer by inserted powder injection molding. *Ceramics International*, 45, 22331-22335.
- [4] Heaney, DF., Suri, P., German, R.M. (2003). Defect-free sintering of two material powder injection molded components Part I Experimental investigations. *Journal of Materials Science*, 38, 4869-4874.
- [5] Antusch, S., Norajitra, P., Piotter, V., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Spatafora, L. (2011). Powder Injection Molding – An innovative manufacturing method for He-cooled DEMO divertor components. *Fusion Engineering and Design*, 86, 1575-1578.
- [6] Simchi, A., Petzoldt, F. (2009). Cosintering of Powder Injection Molding Parts Made from Ultrafine WC-Co and 316L Stainless Steel Powders for Fabrication of Novel Composite Structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 233-241.
- [7] Zhang, S.X., Ong, Z.Y., Li, T., Li, Q.F., Pook, S.F. (2010). Ceramic composite components with gradient porosity by powder injection moulding. *Materials & Design*, 31, 2897-2903.
- [8] Dourandish, M., Simchi, A. (2009). Study the sintering behavior of nanocrystalline 3Y-TZP/430L stainless-steel composite layers for co-powder injection molding. *Journal of Materials Science*, 44, 1264-1274.
- [9] Ruh, A., Hanemann, T., Heldele, R., Piotter, V., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Hausselt, J., Hanemann, T., Heldele, R., Hausselt, J. (2011). Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C MicroPIM): Characteristics of Applicable Materials. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8, 194-202.
- [10] Ruh, A., Piotter, V., Plewa, K., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Haußelt, J. (2010). Effects of material improvement and injection moulding tool design on the movability of sintered two-component micro parts. *Microsystem Technologies*, 16, 1989-1994.
- [11] Gal, C.W., Han, S.S., Han, J.S., Lin, D., Park, S.J. (2019). Investigation of stainless steel 316L/zirconia joint part fabricated by powder injection molding. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 16, 315-323.
- [12] Koçak, H., Kamran, S., Yılmaz, O., Karataş, Ç. (2018). Nikel Ara Katman Kullanılarak İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle WC-Co/HSS Kompozit Parça Üretiminin Araştırılması. *GU J Sci Part C*, 6, 374-384.
- [13] Liu, Z.Y., Kent, D., Schaffer, G.B. (2009). Powder Injection Molding of Al-(Steel and Magnet) Hybrid Components. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40, 2785-2788.



- [14] Kurt, A., Uygur, I., AteŐ, H. (2007). Effects of temperature on the weldability of powder metal parts joined by diffusion welding. *Mater Sci Forum*, 546-549, 667–670.
- [15] Heng, S.Y., Muhamad, N., Sulong, A.B., Fayyaz, A., Amin, S.M. (2013). Effect of sintering temperature on the mechanical and physical properties of WC–10%Co through micro-powder injection molding ( $\mu$ PIM). *Ceramics International*, 39, 4457-4464.