

## **Nano TiO<sub>2</sub> dolgululu polimer esaslı hidrofobik kaplamannın yüzey özelliklerinin incelenmesi**

Cem Mehmetlioğlu<sup>1</sup>, Arzu Özüyağlı<sup>2</sup>, Ebru Akcan<sup>3</sup>, Şaduman Şen<sup>4</sup>, Uğursoy Olgun<sup>5</sup>,  
Uğur Şen<sup>6</sup> ve Akın Akıncı<sup>7</sup>

*21.06.2015 Geliş/Received, 08.02.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296793

### **ÖZ**

Bu çalışmada ETİAL 171 numaralı alüminyum alaşımlı yüzeylere Trimetoxymethylsilane (MTMS), TetraethylorthoSilicate (TEOS), asetik asit ve saf suyun mol oranları sırasıyla 1:0,04:0,34:1,59 olacak şekilde sol-gel yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kaplamalar titanyumdioksit (TiO<sub>2</sub>) nano toz katkısı kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kaplamaların yüzey analizleri optik mikroskop, ıslatma açısı, kalınlık ölçümü cihazları kullanılarak ve cross-cut test kiti ile yapışma adezyonu belirlenmiştir. Islatma açısı 145,5° olan hidrofobik özelliklere sahip kaplama üretilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** TiO<sub>2</sub>, Yapışmazlık, Yüzey.

## **Investigation of surface properties of nano TiO<sub>2</sub> filled polymer based hydrophobic coating**

### **ABSTRACT**

In this study ETİAL 171 to aluminum alloy surfaces were coated using the sol-gel process the molar ratio of Trimetoxymethylsilane (MTMS), TetraethylorthoSilicate (TEOS), acetic acid and pure water 1: 0.04: 0.34: 1.59. Coatings are manufactured using nano-additive powders titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). Optical microscope, contact angle, thickness measurement, cross cut test kit devices were used for tests. Coatings produced with hydrophobic properties.

**Keywords:** TiO<sub>2</sub>, Non-stick, Surface.

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - cemmalioglu@gmail.com

<sup>2</sup> Asaş Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. İstiklal Mah. Kışla Alanı Mevkii Küçücek Beldesi Akyazı-Sakarya, Türkiye - arzu.ozuyagli@asasalu.com.tr

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - ebru\_6781@hotmail.com

<sup>4</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - sdmnsen@sakarya.edu.tr

<sup>5</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - uolgun@sakarya.edu.tr

<sup>6</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - ugursen@sakarya.edu.tr

<sup>7</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya - akinci@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı amaçlar için kullanılan malzemelerin çeşitli dış etkenlerden korunması veya dekoratif amaçlı yüzeylerinin kaplanması uzun zamandan bu yana çalışılmakta olan ve sürekli geliştirilmekte olan teknolojik bir konudur. 1960'lı yıllarda sol-jel kaplamaların kullanılması, kaplama endüstrisinde yeni teknolojik gelişmelere yol açmıştır [1]. Bu metot medikal alandan, otomotiv sektörüne kadar farklı kullanım alanlarına sahiptir [2,3]. Çalışmada kullanılan MTMS sol gel yöntemi ile kapama ve ince film üretim yöntemlerinde kullanılır. MTMS'nin bu yöntemlerde şeffaf yapısı ve düşük yüzey enerjisine sahip olduğu bilinmektedir [2].

Floropolimer ve silikon olmak üzere, yapışmaz kaplamalar genellikle polimerik esaslı kaplamalardır ve iki temel bileşenden meydana gelirler. Bu bileşenler kaplamaya yapışmazlık özelliğini sağlayan temel bileşenlerdir. Başka hiçbir kaplama malzemesinin bir arada sahip olmadığı kimyasal direnç, nem ve ortam şartlarından etkilenmeme, esneklik, geniş çalışma sıcaklık aralığı, düşük sürtünme katsayısı, yapışmayan yüzey ve üstün dielektrik kararlılığı özelliklerine sahip olan yapışmaz kaplamalar uzay araçlarından insan vücuduna kadar birçok alanda kullanılmaktadır. En yaygın yönleri ise abrasif çalışma koşullarında düşük aşınma dirençleridir. Bu durum yapışmaz kaplamaların kullanım ömrünü sınırlamaktadır [3].

Bu çalışmada yapılan kaplamanın amacı yapışmaz özelliği ile sanayide kullanılan alüminyum kalıplarda kalıp ayırıcı kullanımına gerek bırakmayacak bir yapışmaz kaplama üretmektir.

## 2. DENEYSEL (EXPERIMENTAL)

Yapılan çalışmada Sigma-aldrich firmasından temin edilen nano boyutlu polytetrafluoroethylene, 1-methoxy-2-propanol, tetraethyl orthosilicate, trimethoxymethylsilane, Alfa Aesar firmasından temin edilen nano boyutlu titanium (IV) oxide, Merch Kimya firmasından temin edilmiş %100 saflıkta asedik asit kullanıldı.

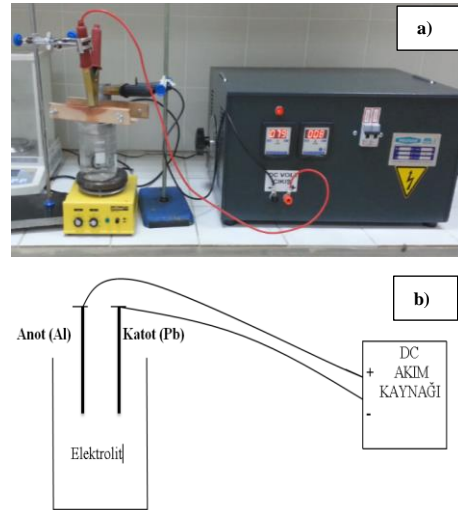
### 2.1. Alüminyum Altlıkların Hazırlanması (Preparation of Aluminum Substrates)

Alüminyum altlıklar 100mmx100mmx4mm boyutlarında ETİAL 171 alaşımlı alüminyum olup kumlanmış ve eloksallanmış olmak üzere iki çeşit olarak belirlenmiştir. Kaplama yapılacak altlıklardan

kumlanmış numunenin yüzey pürüzlülüğü 6,55 µm, eloksallanmış numunenin ise 7,11 µm olarak ölçülmüştür. Eloksallama işlem parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen işlem parametrelerinde doğru akım güç kaynağı kullanılmış, alüminyum numune % 20'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisine anot olarak, katotta ise kurşun levha asılmıştır. Kullanılan eloksal düzeneği ve şematik gösterimi şekil 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Eloksallama işlem parametreleri (Process parameters of anodizing)

Elektrolit	% 20 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi
Sıcaklık	18-22 °C
Voltaj	12-25 V
Amper	1-2 (1,6 A/dm <sup>2</sup> )
Süre	20-30 dk



Şekil 1. a. Eloksallama düzeneği fotoğrafı, b. Anodizasyon hücresi şematik gösterimi (a.anodizing apparatus, b. Schematic representation of the cell anodization)

### 2.2. Kaplamanın Hazırlanması (Preparation of The Coating)

Kaplama iki ayrı çözelti halinde üretilmiştir. Birinci çözelti Asetik asit, saf su, teflon tozu ve 1-Metoksi-2-propanol(MP) içermektedir. Teflon tozu, saf su, %3,5 TiO<sub>2</sub> nano toz, asedik asit ve MP, ultrasonik karıştırıcıda 6 saat homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.

İkinci bir kaptaki ise MTMS ve TEOS manyetik balık ile 30 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan ikinci karışım birinci karışıma ilave edilmiştir. Karışımlarda MTMS,

TEOS, asetik asit ve saf su kullanılarak jel çözelti hazırlanmıştır.

### 2.3 Kaplamaların Uygulanması (Applying of the Coating)

Kumlanmış ve eloksallanmış alüminyum altlık üzerine, %3,5 TiO<sub>2</sub> nano toz katkılı polimer esaslı kaplamalar uygulanmıştır. Kaplama çözeltisi püskürtülmeden önce altlıklar, ultrasonik banyoda etil alkol çözeltisi içerisinde 5 dakika boyunca 50°C’ de yüzey temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Alüminyum altlıklara spreyci kaplama yöntemiyle hazırlanan çözelti püskürtülmüştür. Kaplama yöntemi 0,8 mm nozula sahip basınçlı hava ile çalışan bir boya püskürtme (sprey) tabancasının, hava kompresörü sistemine bağlanarak gerçekleştirilmiştir.

Kaplanmış olan bu altlıklar; ilk olarak 100°C sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir daha sonra sıcaklık 350°C’ye çıkarılarak 15 dakika bekletilmiştir.

### 2.4. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

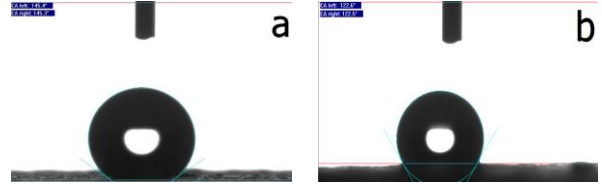
Temas açısı ölçümleri Dataphysics marka ısıtma açısı cihazında saf su ile 2 µl/s hız ile 5 µl damlatılmıştır. Optik mikroskop görüntüleri Huwiz marka dijital mikroskop kullanılarak çekilmiştir. Cross cut testi ISO2409 – ASTM D3359 de belirlenen 2 mm. açıklıktaki bıçak kullanılarak yapılmıştır. Seçilen bıçak ile kaplama yüzeyi çizilmiş yapılan çizgiye göre bıçak 90 derece çevrilip çizilip bir kare oluşturulmuştur. Standart test bandı çizilen kaplama yüzeyine yapıştırıp 5 dakika beklenmiş ve 60 derece açı ile tutularak bant çekilmiştir. Kaplama kalınlığı ölçümü ISO 2808 numaralı standarda göre ultrasonik uç ile ölçülmüş ayrıca Huwiz marka dijital mikroskopta ölçümler teyit edilmiştir.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 3.1. Temas Açısı Sonuçları (Results of Contact Angle)

Üretilen kaplamalar; kumlanmış ve eloksallama işlemi görmüş alüminyum altlık yüzeylerine uygulanmıştır. Kumlanmış alüminyum altlıklara uygulanmış olan %3,5 TiO<sub>2</sub> nano toz katkılı 2.bileşime sahip kaplamanın temas açısı ölçümü Şekil 1a ve b’de verilmektedir. Kumlanmış alüminyum altlık yüzeyine uygulanmış olan kaplamanın temas açısı 145,4° olarak bulunmuştur. Bu değer 150° olan süper hidrofobik yüzeylere çok yakın bir değerdir [4-6]. Eloksallanmış alüminyum altlık yüzeylerine uygulanmış olan kaplamanın temas açısı 122,6° olarak bulunmuştur. Temas açısının aynı kaplama uygulanmasına rağmen farklı çıkması yüzey özellikleri

ile ilgilidir. Şekil 1a’da 1b’ ye göre damla altındaki yüzeyin daha fazla pürüzlü olduğu tepeliklerin fazlalığı ile görülmektedir. Düzgün yüzeyde daha yüksek temas açısı değerine ulaşılmıştır.



Şekil 1. Kaplamaların temas açısı ölçümü a) Kumlanmış, b) Eloksallanmış (The contact angle measurements of coatings a) sandblasted, b) anodised)

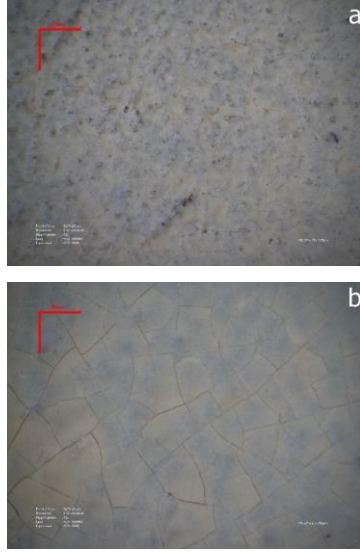
### 3.2. Mikroyapı (Microstructure)

Kaplamalarda seçilen uygun olmayan şartlar sebebiyle yüzeyde çatlak, akma, homojen olmayan kaplama görünümleri elde edilebilir [4]. İstenmeyen bu durumları saptamak amacıyla Şekil 2’de optik mikroskop ile 90X büyütmede yüzey görüntüleri alınmıştır. Şekil 2a’da görünen kumlanmış altlık üzerine uygulanan işlemde kaplamanın homojen olarak yüzeyde dağıldığı görülmektedir. Şekil 2b’de ise görülen eloksallanmış altlık üzerine yapılan kaplama çok yoğun olmasa da homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Eloksallanmış altlık yüzeyi üzerine yapılmış kaplama uygulama esnasında yüzeyi iyi tutunamamıştır. Kurutma esnasında yüzeyde tutunmama kaynaklı kaplamanın hareketlenmesi çatlaklara neden olmuş olabilir. Ayrıca farklı yüzeylerde çatlak görülmesi termal genişleme katsayılarının farklı olmasından da kaynaklandığını göstermektedir. Şekil 2’a da kumlanmış yüzey üzerine yapılmış kaplama daha iyi uyum göstermiş ve homojen bir kaplama elde edilmiştir.

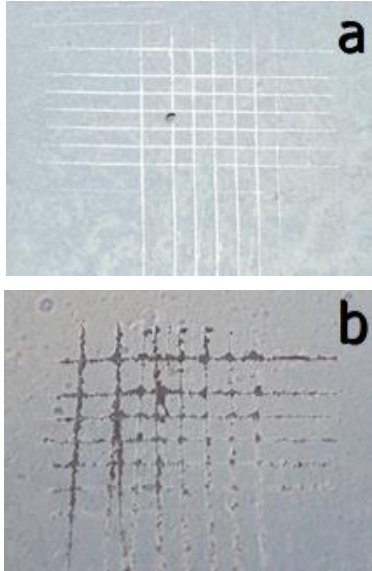
### 3.3. Cross-Cut Sonuçları (Results of Cross-Cut)

Şekil 3a’da kumlanmış numunede test sonrası kaplamada şekülme oluşmamıştır. Standart da belirlene 5B tipine benzer davranış görülmüştür. Şekil 3b’de görüldüğü üzere eloksallanmış altlık üzerine yapılan test çizgilerinin kenar ve kesişme noktalarında dökülme görülmüştür. ASTM D3359 numaralı standarda göre 3B tipine benzer dökülme görülmüştür. Kumlanmış numuneye uygulanan şartlardaki kaplamada yapışmanın daha iyi olduğu belirlenmiştir. Şekil 2b’de kaplamanın eloksallanmış yüzey üzerinde kurutma sonrası çatladığı görülmektedir. Yüzey ile uyum sağlamayan kaplamanın

iyi yapışma özellikleri gösterememiş Şekil 3b’de görüldüğü gibi yüzeyden kolaylıkla kalkmıştır.



Şekil 2. Optik mikroyapılar a) kumlanmış, b) eloksallanmış (Optical microstructures a)sandblasted, b)anodized)

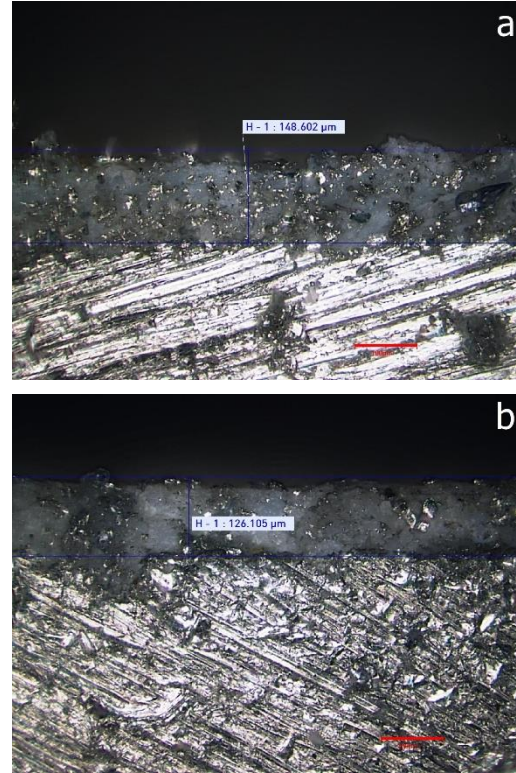


Şekil 3. Cross-cut sonuçları a) kumlanmış b) eloksallanmış (Results of cross-cut a) sandblasted b) anodized)

### 3.4. Kaplama Kalınlığı Ölçümü (Measurement Of Coating Thickness)

Kaplama kalınlığı kalınlık ultrasonik ölçüm kiti kullanılarak ölçülmüştür ayrıca optik mikroskop

görüntüleri ile teyit edilmiştir. Kumlanmış alüminyum altlık numunedeki ortalama kaplama kalınlığı 150 µm olarak ölçülmüştür, eloksallanmış numundeki kaplama kalınlığı ise 126 µm olarak ölçülmüştür. Ayrıca optik mikroskop ölçümleri ile de doğrulanmıştır. Optik mikroskop ölçümlerinde Şekil 4a’da görüldüğü gibi kumlanmış altlık 148 µm, Şekil 4b’de görüldüğü gibi eloksallanmış altlık ise 126 µm bulunmuştur. Kaplama kalınlığının farklı olması uygulama yapan kişinin yüzeye uyguladığı kaplama miktarı, uygulama süresi, uygulama açısı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir. Uygulama elle yapıldığından kaplama kalınlıklarının farklı olması kaçınılmazdır. Kaplama kalınlığındaki değişimin bu makalede sunulan mekanik özelliklere olumlu ya da olumsuz yönde bir katkısının olduğu düşünülmemektedir.



Şekil 4. Optik mikroskop ile kalınlık ölçümleri a)kumlanmış, b)eloksallanmış (Measurements of thickness with optical microscope a) sanded, b)anodized)

### 3.5. Kaplamanın Taramalı Mikroskop Görüntüsü (Scanning Microscope Image of The Coating)

Görüntülerin eldesinde JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 5’de nano TiO<sub>2</sub> tozu içeren kaplamaya ait 1000X büyütmede



alınmış SEM görüntüsü ve elementel dağılım analizi görülmektedir. Elementel analiz dağılımda C, F, O, Si ve Ti elementlerinin kaplama içerisindeki dağılımı görülmektedir. C ve F elementlerinin kaplama içerisine ilave edilen PTFE'den geldiği düşünülmektedir. Si elementinin de kaplama çözeltisinin hazırlanılmasında kullanılan TEOS ve MTMS bazlı inorganik bileşikten geldiği düşünülmektedir. Ti elementi ise kaplamanın içerisine ilave edilen nano TiO<sub>2</sub> tozundan gelmiştir. Sperhidrofobikliği sağlayan maddelerin Teflon ve nano TiO<sub>2</sub> tozunun kaplama içerisinde homojen dağılımı şekil 5'de verilen elementel haritalamada görülmektedir.

#### 4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Nano toz içerikli kaplama kumlanmış yzeye başarılı şekilde uygulanmıştır. Elokosal işlemi uygulanmış yzeyde ise homojen kaplama elde edilememiş kaplama yzeyinde çatlaklar grlmştir.

Kumlanmış yzeye uygulanmış kaplamada daha yüksek temas açısı elde edilmiştir.

Kumlanmış yzeye uygulanmış kaplamanın tutunma mukavemeti daha yüksektir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar aldıkları destekten ötürü Sanayi Tezleri Programı (SAN-TEZ) 0312.STZ.2013-2 numaralı proje kapsamında Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı' na ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2014-50-01-007) teşekkür ederler.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J.C. Brinker, W. Scherer, Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing, United Kingdom, MA: Academic press, 2013.
- [2] Rao, A. V., Lathe, S. S., Nadargi, D. Y., Hirashima, H., & Ganesan, V, "Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method" Journal of colloid and interface science, cilt 2, no. 332, pp. 484-490, 2009.
- [3] N. Rivier, "Non-stick quasicrystalline coatings," Journal of Non-Crystalline Solids, no. 153, pp. 458-462, 1993.
- [4] A. Frank ve W. Scholz, "Defoamers in the coatings industry," CHIMIA International Journal for Chemistry, cilt 5, no. 56, pp. 177-183, 2002.
- [5] Neri, G., Bonavita, A., Micali, G., Rizzo, G., Callone, E., "Resistive CO gas sensors based on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and InSnO<sub>x</sub> nanopowders synthesized via starch-aided sol-gel process for automotive applications," Sensors and Actuators B, vol. 1, no. 132, pp. 224-233, 2008.
- [6] Piveteau, L. D., Girona, M. I., Schlapbach, L., Barboux, P., Boilot, J. P., & Gasser, B., "Thin films of calcium phosphate and titanium dioxide by a sol-gel route: a new method for coating medical implants," Journal of Materials Science: Materials in Medicine, cilt 3, no. 10, pp. 161-167, 1999.
- [7] Kiyoharu T., Junichi M., Atsunori M., Tsutomu M., "Superhydrophobic-Superhydrophilic Micropatterning on Flowerlike Alumina Coating Film by the Sol-Gel Method," Chemistry of materials, cilt 3, no. 12, pp. 590-592, 2000.



## **A numerical method for solution of integro-differential equations of fractional order**

Sertan Alkan\*

*07.05.2016 Geliş/Received, 10.06.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296796

### **ABSTRACT**

In this study, sinc-collocation method is introduced for solving Volterra integro-differential equations of fractional order. Fractional derivative is described in the Caputo sense often used in fractional calculus. Obtained results are given to literature as two new theorems. Some numerical examples are presented to demonstrate the theoretical results.

**Keywords:** Integro-differential equation, sinc-collocation method, Caputo fractional derivative.

## **Kesirli mertebeden integro-diferansiyel denklemlerin çözümü için sayısal bir yöntem**

### **ÖZ**

Bu çalışmada, sinc sıralama yöntemi kesirli mertebeden Volterra integro-diferansiyel denklemleri yaklaşık olarak çözmek için geliştirilmiştir. Kesirli türev, kesirli analizde sıkça kullanılan Caputo anlamında tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar iki yeni teorem ile verilmiştir. Bazı sayısal örnekleri teorik sonuçları göstermek için sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Integro-diferansiyel denklem, sinc-sıralama yöntemi, Caputo kesirli türevi.

---

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Hatay, sertan.alkan@iste.edu.tr

## 1. INTRODUCTION

Many problems, in science and engineering such as earthquake engineering, biomedical engineering, fluid mechanics can be modeled by fractional integro-differential equations [34, 35, 36]. In order to better analyze these systems, it is required to obtain the solution of these equations. But, achieving the analytical solution of these equations can not be possible. Therefore, finding more accurate solutions using numerical schemes can be helpful. Some numerical algorithm for solving integro-differential equation of fractional order can be summarized as follows, but not limited to; Adomian decomposition method [1, 2, 23], Taylor expansion method [3], differential transform method [4, 5] and homotopy perturbation method [6, 7], Spectral collocation method [14], Legendre wavelets method [13], Chebyshev wavelets method [15, 29], piecewise collocation methods [20, 21], Chebyshev pseudo-spectral method [24, 28], homotopy analysis method [25, 26], variational iteration method [27].

According to best knowledge of the authors, there is no study dealing with the solution of fractional linear Volterra integro-differential equation by means of sinc-collocation method. The main advantage of the sinc-collocation method than other methods is that sinc-collocation method provides a much better rate of convergence and more efficient results in the presence of singularity [37]. For more details about the sinc-collocation method see [8, 9, 10, 12].

Particularly, in the present paper, as an original contribution to literature, sinc-collocation method is introduced for solving linear Volterra integro-differential equations of fractional order. Examined integro-differential equations in the present paper have singularities at some points. Obtained results are given in the form of two new theorems. Some numerical examples in the form of graphics and tables are given to illustrate the theoretical results.

In this study, Volterra integro-differential equations of fractional order are considered as follows:

$$\begin{aligned} &\mu_2(x)y'' + \mu_1(x)y' + \mu_\alpha(x)D_x^\alpha y + \mu_0(x)y \\ &= f(x) + \lambda \int_\alpha^x K(x,t)y(t)dt \quad , 0 < \alpha < 1 \end{aligned} \quad (1)$$

in which  $D_x^\alpha$  is the Caputo sense fractional derivative. Eq.1 is subject to following nonhomogeneous boundary conditions

$$y(a) = y_0, \quad y(b) = y_1, \quad a < x < b.$$

The structure of this paper is organized as follows; In section 2, some preliminaries and basic definitions related to fractional calculus and sinc functions are recalled. In the next section, sinc-collocation method is constructed for solving integro-differential equations of fractional order. In section 4, numerical examples are presented. Finally, conclusions and remarks are given in the section 5.

## 2. PRELIMINARIES AND NOTATIONS

In this section, some preliminaries and notations related to fractional calculus and sinc basis functions are given. For more details see [16, 17, 18, 19, 30, 31, 32, 33].

**Definition 1.** Let  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  be a function,  $\alpha$  a positive real number,  $n$  the integer satisfying  $n - 1 \leq \alpha < n$ , and  $\Gamma$  the Euler gamma function. Then, the left Caputo fractional derivative of order of  $f(x)$  is given as follows:

$$D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_\alpha^x (x - t)^{n-\alpha-1} f^{(n)}(t) dt. \quad (2)$$

**Definition 2.** The Sinc function is defined on the whole real line  $-\infty < x < \infty$  by

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} & x \neq 0 \\ 1 & x = 0. \end{cases}$$

**Definition 3.** For  $h > 0$  and  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  the translated sinc function with space node are given by:

$$S(k, h)(x) = \text{sinc}\left(\frac{x - kh}{h}\right) = \begin{cases} \frac{\sin\left(\pi \frac{x - kh}{h}\right)}{\pi \frac{x - kh}{h}} & x \neq kh \\ 1 & x = kh. \end{cases}$$

To construct approximation on the interval  $(a, b)$  the conformal map

$$\phi(z) = \ln\left(\frac{z - a}{b - z}\right).$$

is employed. The basis functions on the interval  $(a, b)$  are derived from the composite translated sinc functions

$$S_k(z) = S(k, h)(z) \circ \phi(z) = \text{sinc}\left(\frac{\phi(z) - kh}{h}\right).$$

The inverse map of  $\omega = \phi(z)$  is

$$z = \phi^{-1}(\omega) = \frac{a + be^\omega}{1 + e^\omega}.$$

The sinc grid points  $z_k \in (a, b)$  will be denoted by  $x_k$  because they are real. For the evenly spaced nodes  $\{kh\}_{k=-\infty}^{\infty}$  on the real line, the image which corresponds to these nodes is denoted by

$$x_k = \phi^{-1}(kh) = \frac{a + be^{kh}}{1 + e^{kh}}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

### 3. THE SINC-COLLOCATION METHOD

Let us assume an approximate solution for  $y(x)$  in Eq.(1) by finite expansion of sinc basis functions for as follows;

$$y_n(x) = \sum_{k=-M}^N c_k S_k(x), \quad n = M + N + 1 \quad (3)$$

where  $S_k(x)$  is the function  $S(k, h) \circ \phi(x)$ . Here, the unknown coefficients  $c_k$  in (3) are determined by sinc-collocation method via the following theorems.

**Theorem 1.** The first and second derivatives of  $y_n(x)$  are given by

$$\frac{d}{dx} y_n(x) = \sum_{k=-M}^N c_k \phi'(x) \frac{d}{d\phi} S_k(x) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} y_n(x) = \sum_{k=-M}^N c_k \left( \phi''(x) \frac{d}{d\phi} S_k(x) \right. \\ \left. + (\phi')^2 \frac{d^2}{d\phi^2} S_k(x) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

respectively.

**Theorem 2.** If  $\xi$  is a conformal map for the interval  $[a, x]$ , then  $\alpha$  order derivative of  $y_n(x)$  for  $0 < \alpha < 1$  is given by

$$D_x^\alpha (y_n(x)) = \sum_{k=-M}^N c_k D_x^\alpha (S_k(x)) \quad (6)$$

where

$$D_x^\alpha (S_k(x)) \approx \frac{h_L}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{r=-L}^L \frac{(x-x_r) S'_k(x_r)}{\xi'(x_r)}$$

Proof. If we use the definition of Caputo fractional derivative given in (2), it is written that

$$D_x^\alpha (y_n(x)) = \sum_{k=-M}^N c_k D_x^\alpha (S_k(x))$$

where

$$D_x^\alpha (S_k(x)) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_a^x (x-t)^{-\alpha} S'_k(t) dt.$$

Now we use quadrature rule given by (2.13) in [11] to compute the above integral which is divergent on the interval  $[a, x]$ . For this purpose, a conformal map and its inverse image that denotes the sinc grid points are given by

$$\xi(t) = \ln \left( \frac{t-\alpha}{x-t} \right)$$

and

$$x_r = \xi^{-1}(rh_L) = \frac{a + xe^{rh_L}}{1 + e^{rh_L}}$$

where  $h_L = \pi/\sqrt{L}$ . Then, according to equality (2.13) in [11], we can write

$$D_x^\alpha (S_k(x)) \approx \frac{h_L}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{r=-L}^L \frac{(x-x_r) S'_k(x_r)}{\xi'(x_r)}$$

This completes the proof.

**Lemma 1.** The following relation holds

$$\int_a^{x_j} K(x, t) y(t) dt \approx h \sum_{k=-M}^N \delta_{jk}^{(-1)} \frac{K(x_j, t_k)}{\phi'(t_k)} y_k \quad (7)$$

where

$$\sigma_{jk} = \int_0^{j-k} \frac{\sin \pi t}{\pi t} dt$$

$$\delta_{jk}^{(-1)} = \frac{1}{2} + \sigma_{jk}$$

and  $y_k$  denotes an approximate value of  $y(t_k)$ .

Proof. See [12]

Replacing each term of (1) with the approximation given in (3)-(7), multiplying the resulting equation by  $\{(1/\phi)^2\}$ , we obtain the following system



$$\sum_{k=-M}^N \left[ c_k \left\{ \sum_{i=0}^2 g_i(x) \frac{d^i}{d\phi^i} S_k + g_3(x) D_x^\alpha (S_k(x)) \right. \right. \\ \left. \left. + g_4(x) \delta_{jk}^{(-1)} \frac{K(x, t_k)}{\phi'(t_k)} \right\} \right] \\ = \left( f(x) \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right)^2 \right)$$

where

$$g_0(x) = \mu_0(x) \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right)^2$$

$$g_1(x) = \left[ \mu_1(x) \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right) - \mu_2(x) \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right)' \right]$$

$$g_2(x) = \mu_2(x)$$

$$g_3(x) = \mu_\alpha(x) \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right)^2$$

$$g_4(x) = -\lambda h \left( \frac{1}{\phi'(x)} \right)^2.$$

We know from [12] that

$$\delta_{jk}^{(0)} = \delta_{kj}^{(0)}, \quad \delta_{jk}^{(1)} = -\delta_{kj}^{(1)}, \quad \delta_{jk}^{(2)} = \delta_{kj}^{(2)}$$

then setting  $x = x_j$ , we obtain the following theorem.

**Theorem 3.** If the assumed approximate solution of boundary value problem (1) is (3), then the discrete sinc-collocation system for the determination of the unknown coefficients  $\{c_k\}_{k=-M}^N$  is given by

$$\sum_{k=-M}^N \left[ c_k \left\{ \sum_{i=0}^2 \frac{g_i(x_j)}{h^i} \delta_{jk}^{(i)} + g_3(x_j) D_x^\alpha (S_k(x_j)) \right. \right. \\ \left. \left. + g_4(x_j) \delta_{jk}^{(-1)} \frac{K(x_j, t_k)}{\phi'(t_k)} \right\} \right] \\ = \left( f(x_j) \left( \frac{1}{\phi'(x_j)} \right)^2 \right), \quad j = -M, \dots, N \quad (8)$$

We now introduce some notations to rewrite in the matrix form for system (8). Let  $\mathbf{D}(y)$  denotes a diagonal matrix whose diagonal elements are  $y(x_{-M}), y(x_{-M+1}), \dots, y(x_N)$  and non-diagonal elements are zero, let

$$\mathbf{G} = D_x^\alpha (S_k(x_j))$$

and

$$\mathbf{E} = \frac{K(x_j, t_k)}{(\phi'(x_j))^2 \phi'(t_k)}$$

denote a matrix and also let  $\mathbf{I}^{(i)}$  denote the matrices

$$\mathbf{I}^{(i)} = [\delta_{jk}^{(i)}], \quad i = -1, 0, 1, 2$$

where  $\mathbf{D}, \mathbf{G}, \mathbf{E}, \mathbf{I}^{(-1)}, \mathbf{I}^{(0)}, \mathbf{I}^{(1)}$  and  $\mathbf{I}^{(2)}$  are square matrices of order  $n \times n$ . In order to calculate unknown coefficients  $c_k$  in linear system (8), we rewrite this system by using the above notations in matrix form as

$$\mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{B} \quad (9)$$

where

$$\mathbf{A} = \sum_{i=0}^2 \frac{1}{h^i} \mathbf{D}(g_i) \mathbf{I}^{(i)} + \mathbf{D}(g_3) \mathbf{G} + \mathbf{D}(g_4) (\mathbf{E} \circ \mathbf{I}^{(-1)})$$

$\mathbf{B} =$

$$\left( \left( f(x_{-M}) \left( \frac{1}{\phi'(x_{-M})} \right)^2 \right), \left( f(x_{-M+1}) \left( \frac{1}{\phi'(x_{-M+1})} \right)^2 \right) \right)^T \\ \left( \dots, \left( f(x_N) \left( \frac{1}{\phi'(x_N)} \right)^2 \right) \right)$$

$$\mathbf{c} = (c_{-M}, c_{-M+1}, \dots, c_N)^T$$

The notation " $\circ$ " denotes the Hadamard matrix multiplication. Now we have linear system of  $n$  equations in the  $n$  unknown coefficients given by (9). We can find the unknown coefficients  $c_k$  by solving this system.

#### 4. COMPUTATIONAL EXAMPLES

In this section, some numerical examples whose exact solutions are known are presented to show the accuracy of the introduced method by **MATHEMATICA 10**. In all examples,  $d = \pi/2$ ,  $\alpha = \beta = 1/2$ ,  $N = M$  are taken into account  $\mathbf{E}_{M,L}$  shows the error between the exact solution and numerical solution by sinc-collocation method. Also,  $\mathbf{R}_{M,L}$  in example 2 indicates the experimental rate of convergence that calculates the following formula like [22]

$$\mathbf{R}_{M,L} = \frac{\log[\mathbf{E}_{M/2,L/2}/\mathbf{E}_{M,L}]}{\log 2}$$

**Example 1.** Consider linear fractional Volterra integro-differential equation in the following form

$$y''(x) + D_x^{0.5}y(x) + y(x) = f(x) - 2 \int_0^x K(x,t)y(t)dt \quad (10)$$

subject to the nonhomogeneous boundary conditions

$$y(0) = 2, \quad y(1) = 3$$

where  $f(x) = \frac{1}{3}(-x^7 + x^6 - 4x^4 + 7x^3 + 18x + 6) + \frac{6}{\Gamma(3.5)}x^{2.5}$  and  $K(x,t) = t^2(x-1)$ . The exact solution of Eq.10 is  $y(x) = x^2 + 2$ . In this problem, firstly, let us convert nonhomogeneous boundary conditions to homogeneous ones by following transformation

$$u(x) = y(x) - x - 2$$

Obtained numerical results are presented in the table 1 after applying the sinc-collocation method. Also,

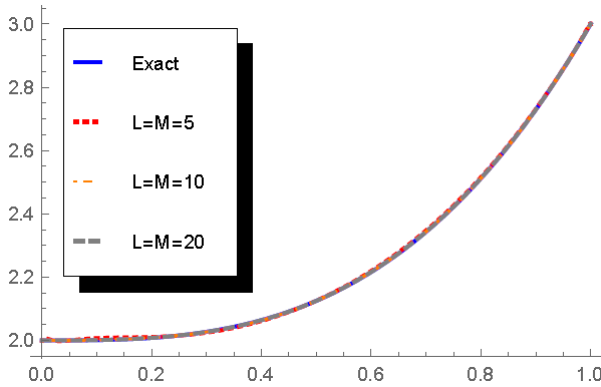


Figure 1 The graphics of the exact and approximate solutions for Example 1

the graphics of the exact and approximate solutions for different values of  $L$  and  $M$  are given in Figure 1.

Table 1 Numerical results for Example 1

$x$	Exact s	$E_{20,20}$	$E_{10,10}$	$E_{5,5}$
0	2	0	0	0
0.1	2.001	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.89 \times 10^{-4}$	$6.16 \times 10^{-3}$
0.2	2.008	$8.13 \times 10^{-6}$	$4.35 \times 10^{-4}$	$2.88 \times 10^{-3}$
0.3	2.027	$1.57 \times 10^{-5}$	$1.43 \times 10^{-4}$	$2.36 \times 10^{-3}$
0.4	2.064	$8.38 \times 10^{-6}$	$4.54 \times 10^{-4}$	$2.59 \times 10^{-3}$
0.5	2.125	$4.39 \times 10^{-6}$	$1.40 \times 10^{-4}$	$3.38 \times 10^{-4}$
0.6	2.216	$8.39 \times 10^{-7}$	$1.80 \times 10^{-4}$	$3.28 \times 10^{-3}$
0.7	2.343	$2.18 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-5}$	$4.24 \times 10^{-3}$
0.8	2.512	$2.21 \times 10^{-5}$	$2.65 \times 10^{-4}$	$3.40 \times 10^{-3}$
0.9	2.729	$1.62 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-3}$
1	3	0	0	0

**Example 2.** Now, let us consider following singular Volterra integro-differential equation of fractional order

$$y''(x) + \frac{1}{x}D_x^{0.3}y(x) + \frac{1}{x-1}y(x) = f(x) + \int_0^x K(x,t)y(t)dt$$

subject to the boundary conditions

$$y(0) = 0, \quad y(1) = 0$$

where  $f(x) = x^{11} - \frac{1}{30}x^6 + \frac{1}{20}x^5 + x^3 + \frac{24}{\Gamma(4.7)}x^{2.7} + 12x^2 - \frac{6}{\Gamma(3.7)}x^{1.7} - 6x$  and  $K(x,t) = x - t$ . The exact solution of this problem is  $y(x) = x^3(x-1)$ . For this problem, numerical solutions are presented in Table 2 and Table 3, and plotting of the numerical solutions are given in Figure 2.

Table 2 Numerical results for Example 2

$x$	Exact so	$E_{20,20}$	$E_{10,10}$	$E_{5,5}$
0	2	0	0	0
0.1	-0.0009	$5.82 \times 10^{-7}$	$1.41 \times 10^{-4}$	$5.46 \times 10^{-4}$
0.2	-0.0064	$5.28 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-3}$
0.3	-0.0189	$2.71 \times 10^{-6}$	$8.35 \times 10^{-5}$	$2.23 \times 10^{-3}$
0.4	-0.0384	$5.40 \times 10^{-6}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$8.78 \times 10^{-4}$
0.5	-0.0625	$6.95 \times 10^{-6}$	$2.70 \times 10^{-4}$	$2.39 \times 10^{-3}$
0.6	-0.0864	$1.61 \times 10^{-6}$	$6.05 \times 10^{-4}$	$5.46 \times 10^{-3}$
0.7	-0.1029	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.39 \times 10^{-4}$	$5.21 \times 10^{-3}$
0.8	-0.1024	$2.84 \times 10^{-6}$	$4.35 \times 10^{-4}$	$1.83 \times 10^{-6}$
0.9	-0.0729	$6.72 \times 10^{-6}$	$3.88 \times 10^{-4}$	$3.73 \times 10^{-3}$
1	0	0	0	0

Table 3 Maximum absolute errors and rate of convergence for Example 2

$M, L$	Maximum absolute errors $E_{M,L}$	Rate of convergence $R_{M,L}$
5	$5.46 \times 10^{-2}$	
10	$6.05 \times 10^{-4}$	3.17
20	$1.61 \times 10^{-5}$	5.23
40	$1.24 \times 10^{-7}$	7.02

**Example 3.** Finally, consider the problem

$$y''(x) + x^2D_x^{0.7}y(x) + xy(x) = f(x) - \int_0^x K(x,t)y(t)dt$$

subject to the boundary conditions

$$y(0) = 0, \quad y(1) = 0$$

where  $f(x) = \frac{1}{7}x^7 - \frac{2}{5}x^6 + \frac{24}{\Gamma(4.3)}x^{5.3} - \frac{6}{5}x^5 + \frac{2}{3}x^4 - \frac{2}{\Gamma(2.3)}x^{3.3} + x^3 - 12x^2 + 2$  and  $K(x,t) = 2x - t^2$ . The exact solution of this problem  $y(x) = x^2(1 - x^2)$ . The

numerical solutions and graphs of the solutions are presented in Table 4 and Figure 3.

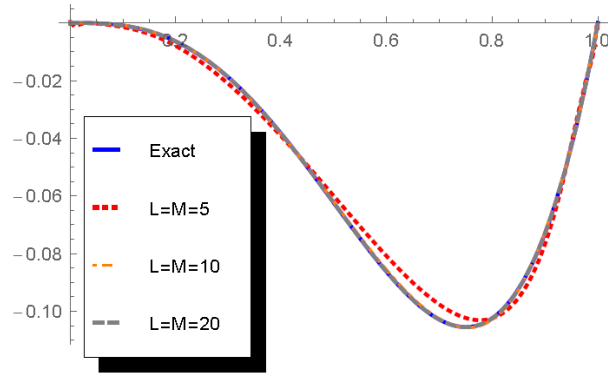


Figure 2 The graphics of the exact and approximate solutions for Example 2

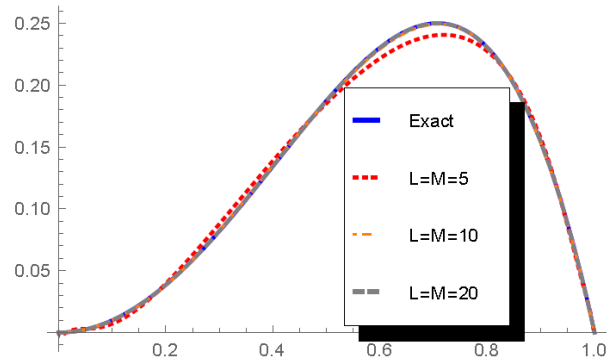


Figure 3 The graphics of the exact and approximate solutions for Example 3

Table 4 Numerical results for Example 3

$x$	Exact sol.	$E_{20,20}$	$E_{10,10}$	$E_{5,5}$
0	0	0	0	0
0.1	0.0099	$1.26 \times 10^{-7}$	$9.85 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-3}$
0.2	0.0384	$1.38 \times 10^{-6}$	$3.69 \times 10^{-4}$	$1.02 \times 10^{-3}$
0.3	0.0819	$5.58 \times 10^{-6}$	$3.12 \times 10^{-4}$	$5.81 \times 10^{-3}$
0.4	0.1344	$1.63 \times 10^{-5}$	$5.58 \times 10^{-4}$	$4.36 \times 10^{-3}$
0.5	0.1875	$2.17 \times 10^{-5}$	$2.41 \times 10^{-4}$	$2.10 \times 10^{-3}$
0.6	0.2304	$7.28 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-3}$	$8.70 \times 10^{-3}$
0.7	0.2499	$7.51 \times 10^{-5}$	$7.36 \times 10^{-4}$	$9.82 \times 10^{-3}$
0.8	0.2304	$1.36 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$	$3.05 \times 10^{-3}$
0.9	0.1539	$1.28 \times 10^{-4}$	$9.20 \times 10^{-4}$	$2.65 \times 10^{-3}$
1	0	0	0	0

## 5. CONCLUSION (SONUÇLAR)

In recent years several numerical methods have been applied to integro-differential equations of fractional order. In this study, we have applied sinc-collocation method to a class of Volterra integro-differential

equation of fractional order to obtain the approximate solutions. In order to illustrate the accuracy of the present method, we have compared the obtained results with the exact ones. With respect to comparisons it has seen that sinc-collocation method provides a good approximate solution. Additionally, according to comparison results one may say that proposed method promises for solving many other types of integro differential equations.

## REFERENCES

- [1] Momani, S., Noor, M. A. (2006). Numerical methods for fourth-order fractional integro-differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, 182(1), 754-760.
- [2] Momani, S., Qaralleh, R. (2006). An efficient method for solving systems of fractional integro-differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 52(3), 459-470.
- [3] Huang, L., Li, X. F., Zhao, Y., Duan, X. Y. (2011). Approximate solution of fractional integro-differential equations by Taylor expansion method. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(3), 1127-1134.
- [4] Nazari, D., Shahmorad, S. (2010). Application of the fractional differential transform method to fractional-order integro-differential equations with nonlocal boundary conditions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(3), 883-891.
- [5] Arikoglu, A., Ozkol, I. (2009). Solution of fractional integro-differential equations by using fractional differential transform method. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(2), 521-529.
- [6] Saeed, R. K., Sdeq, H. M., (2010). Solving a system of linear fredholm fractional integro-differential equations using homotopy perturbation method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(4), 633-638.
- [7] Nawaz, Y. (2011). Variational iteration method and homotopy perturbation method for fourth-order fractional integro-differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(8), 2330-2341.
- [8] Alkan, S., (2015). A new solution method for nonlinear fractional integro-differential equations, *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*, 8(6), 1065-1077.
- [9] Alkan, S., Yildirim, K., Secer, A. (2016). An efficient algorithm for solving fractional differential equations with boundary conditions, *Open Physics*, 14(1), 6-14.
- [10] Alkan, S., Secer, A. (2015). Solution of nonlinear fractional boundary value problems with nonhomogeneous boundary conditions, *Applied and Computational Mathematics*, 14(3), 284-295.

- [11] Secer, A., Alkan, S., Akinlar, M. A., Bayram, M. (2013). Sinc-Galerkin method for approximate solutions of fractional order boundary value problems. *Boundary Value Problems*, 2013(1), 281.
- [12] Zarebnia, M., Nikpour, Z. (2009). Solution of linear Volterra integro-differential equations via Sinc functions. *International Journal of Applied Mathematics and Computation*, 2(1), 001-010.
- [13] Rawashdeh, E. A. (2011). Legendre wavelets method for fractional integro-differential equations. *Applied Mathematical Sciences*, 5(2), 2467-2474.
- [14] Ma, X., Huang, C. (2014). Spectral collocation method for linear fractional integro-differential equations. *Applied Mathematical Modelling*, 38(4), 1434-1448.
- [15] Zhu, L., Fan, Q. (2012). Solving fractional nonlinear Fredholm integro-differential equations by the second kind Chebyshev wavelet. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(6), 2333-2341.
- [16] Podlubny, I., *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*. Vol. 198. Academic press, 1998.
- [17] Lund, J., Bowers, K. L., *Sinc methods for quadrature and differential equations*, SIAM, 1992.
- [18] Samko, S. G., Kilbas, A. A., Marichev, O. I., *Fractional integrals and derivatives. Theory and Applications*, Gordon and Breach, Yverdon, 1993.
- [19] Stenger, F., *Handbook of Sinc numerical methods*, CRC Press, 2010.
- [20] Zhao, J., Xiao, J., Ford, N. J. (2014). Collocation methods for fractional integro-differential equations with weakly singular kernels. *Numerical Algorithms*, 65(4), 723-743.
- [21] Rawashdeh, E. A. (2006). Numerical solution of fractional integro-differential equations by collocation method. *Applied Mathematics and Computation*, 176(1), 1-6.
- [22] Aziz, I., Fayyaz, M. (2013). A new approach for numerical solution of integro-differential equations via Haar wavelets. *International Journal of Computer Mathematics*, 90(9), 1971-1989.
- [23] Mittal, R. C., Nigam, R. (2008). Solution of fractional integro-differential equations by Adomian decomposition method. *The International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 4(2), 87-94.
- [24] Sweilam, N. H., Khader, M. M. (2010). A Chebyshev pseudo-spectral method for solving fractional-order integro-differential equations. *The ANZIAM Journal*, 51(04), 464-475.
- [25] Abbasbandy, S., Hashemi, M. S., Hashim, I. (2013). On convergence of homotopy analysis method and its application to fractional integro-differential equations. *Quaestiones Mathematicae*, 36(1), 93-105.
- [26] Zhang, X., Tang, B., He, Y. (2011). Homotopy analysis method for higher-order fractional integro-differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(8), 3194-3203.
- [27] Nawaz, Y. (2011). Variational iteration method and homotopy perturbation method for fourth-order fractional integro-differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(8), 2330-2341.
- [28] Khader, M. M., Sweilam, N. H. (2013). On the approximate solutions for system of fractional integro-differential equations using Chebyshev pseudo-spectral method. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 9819-9828.
- [29] Yuanlu, L. (2010). Solving a nonlinear fractional differential equation using Chebyshev wavelets. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(9), 2284-2292.
- [30] Atangana, A., Koca, I. (2016). On the new fractional derivative and application to nonlinear Baggs and Freedman model. *J. Nonlinear Sci. Appl.*, 9(2016), 2467-2480.
- [31] Koca, I., Atangana, A. (2016). Analysis of a nonlinear model of interpersonal relationships with time fractional derivative. *Journal of Mathematical Analysis*, 7(2), 1-11.
- [32] Atangana, A. (2016). On the new fractional derivative and application to nonlinear Fishers reaction-diffusion equation. *Applied Mathematics and Computation*, 273, 948-956.
- [33] Atangana, A., Koca, I. (2016). Chaos in a simple nonlinear system with Atangana Baleanu derivatives with fractional order. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1-8.
- [34] Carpinteri, A., Cornetti, P., Sapora, A. (2014). Nonlocal elasticity: an approach based on fractional calculus. *Meccanica*, 49(11), 2551-2569.
- [35] Tejado, I., Valrio, D., Valrio, N. (2015). Fractional Calculus in Economic Growth Modelling: The Spanish Case. In *CONTROL2014 Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control*, Springer International Publishing, 449-458.
- [36] Meilanov, R. P., Magomedov, R. A. (2014). Thermodynamics in Fractional Calculus. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(6), 1521-1531.



- [37] Mohsen, A., El-Gamel, M. (2008). On the Galerkin and collocation methods for two-point boundary value problems using sinc bases. *Computers & Mathematics with Applications*, 56(4), 930-941.



## **S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi**

Ali Yürük<sup>1</sup>, Batuhan Bozkurt<sup>2</sup>, Nizamettin Kahraman<sup>2</sup>

*14.07.2016 Geliş/Received, 02.08.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296811

### **ÖZET**

Bu çalışmada farklı kimyasal bileşime ve mekanik özelliklere sahip, düşük karbonlu çelik (S235JR) ile ferritik paslanmaz (AISI 430) çelik malzemeler MIG kaynak yöntemi ile farklı tel ilerleme hızlarında (kaynak akımı) birleştirilmişlerdir. Kaynak uygulaması gerçekleştirilmiş kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini belirlemek için kaynaklı bağlantılara çekme deneyi yapılmış, ayrıca kaynak bölgesinde sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak kaynak metalinde meydana gelen oluşumlar ve ITAB'daki değişimleri belirlemek içinde mikroyapı çalışmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** S235JR karbon çeliği, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik, MIG kaynak yöntemi.

## **An investigation on the weldability of S235JR carbon steels and aisi 430 ferritic stainless steels with gas metal arc welding**

### **ABSTRACT**

In this study, a different chemical composition and mechanical properties, low carbon steel (S235JR) and ferritic stainless (AISI 430) steel materials with different wire feed speed in MIG welding (welding current) are joined. Welding application made to the tensile test to determine the mechanical properties of welded joints welded joints were carried out, also hardness measurements were carried out in the the welding zone. Finally studies of microstructure formation welding to determine the weld metal and the HAZ changes are made.

**Key Words:** S235JR carbon steel, AISI 430 ferritic stainless steel, gas metal arc welding.

<sup>1</sup> Bursa İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Düzce, Turkey - [aliyuruk@hotmail.com](mailto:aliyuruk@hotmail.com)

<sup>2</sup> Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Turkey - [nizamettinkahraman@gmail.com](mailto:nizamettinkahraman@gmail.com)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ferritik paslanmaz çelikler % 15-30 oranlarında Cr içeren çeliklerdir. Ferritik paslanmaz çelikler klorlu ortamlarda mükemmel bir korozyon çatlağı ve oyulma direncine sahiptir [1-3]. Bu nedenle ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere oranla daha yüksek akma dayanımına sahip olmasına rağmen, çekme uygulamalarında düşük uzama sergilerler. Kaynaklarda tane irileşmesi sebebiyle tokluk, süneklik ve korozyon direncinde azalmalar görülür [2]. Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşiminde nikel bulunmaması sebebiyle östenitik çeliklerden daha ucuzdur [4]. Bu nedenle de endüstride özellikle mutfak eşyalarının yapımı başta olmak üzere yoğun bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca ferritik paslanmaz çelikler günümüzde otobüs gövde panellerinin yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [5].

Günümüzde hızla gelişen teknoloji beraberinde farklı parçaların da kaynaklı birleştirme yöntemleri ile birleştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bunun için de kullanılan çok çeşitli kaynak yöntemleri mevcuttur. Bu kaynak yöntemlerinden biri de MIG-MAG kaynak yöntemidir. MIG-MAG kaynak yöntemi demir esaslı ve demir dışı metallerin kaynağında en çok kullanılan kaynak yöntemidir [6]. MIG kaynak yöntemi birçok avantajlarından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Yüksek kaynak hızı, otomatik olarak uygulanabilmesi, yüksek metal biriktirme oranı, curuf olmayışı ve bütün pozisyonlarda kolaylıkla kaynak yapılabilmesi MIG kaynak yönteminin önemli avantajlarından [8].

Öte yandan MIG-MAG kaynak yöntemi yapı çeliklerinin yanında süper marteolitik paslanmaz çeliklerin, alüminyum ve alaşımlarının kaynaklı birleşmesinde başarıyla uygulanabilmektedir [7]. MIG-MAG kaynak yöntemi ile demir dışı metallerinde birleştirilebilmesi de mümkündür [9].

Ayrıca gelişmekte olan çelik ve inşaat sektörleri farklı özelliklere sahip çeliklerin birbirine kaynak ile birleştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Özellikle nükleer reaktörlerde, buhar santrallerinin ana boru hatlarında, petrokimya tesislerinde farklı metal ve metal alaşımlarının birleştirilmeleri yapılmaktadır. Bunun yanı sıra farklı metallerin birleştirilmesi endüstriyel uygulamalarda kap ve eşanşör yapımında da kullanılmaktadır [10].

Farklı özelliklere sahip metallerin kaynaklı birleştirme uygulamalarından biri de paslanmaz çeliklerle düşük

alaşımli veya alaşımsız yapı çeliklerinin kaynak ile birleştirilmesidir. Paslanmaz çeliklerle düşük alaşımli çeliklerin kaynağı çoğunlukla basınç kaplarının, kazan, elektrik üretim sistemlerinin ısı değıştiricilerinde ve petrokimya endüstrisinde kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada, S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemeler farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme işlemleri sonrasında kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneyisel çalışmada kullanılan S235JR karbon çeliğinin ve AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimleri Tablo 1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Kaynak işleminde 1 mm çapında 309 L Si ilave doğu metali kullanılmış olup kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

Deney numuneleri 200x120x2 mm ölçülerinde, aralarında 1 mm kaynak boşluğu kalacak şekilde hazırlanarak Tablo 4’deki kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemi Lincoln Powertec 365 S gazaltı kaynak makinesinde gerçekleştirilmiş olup kaynak esnasında koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanılmıştır. Kaynak işleminden sonra deney numuneleri hava ortamında kendi halinde soğumaya bırakılmıştır.

Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyi, sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ayrıca mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Çekme deneyi için numuneler TS EN ISO 4136 standardına göre hazırlanmış ve ardından da 100 kN kapasiteli INSTON model çekme test cihazında 1mm/dak hızında çekilerek çekme uzama diyagramları elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri, Shimadzu HVM marka cihaz ile 0,5 kg yük altında 15 sn bekletilip izler oluşturularak yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler parlatma işleminden sonra AISI 430 ferritik paslanmaz çelik % 10 oksalik asit ile elektrolitik olarak, 13,8 V, 3 A akımda 12 saniye süre dağlanırken, S235JR karbon çeliği 2 ml HNO<sub>3</sub> 100 ml % 98 etil alkol ile dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numuneler bilgisayara görüntü aktarabilen NIKON Epiphot 200 model optik mikroskop ile incelenmiştir.

A.Yürükve diğ. / S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi

Tablo 1. Deneide kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri. (The chemical compositions of materials used in the experiment)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	Fe
S235JR	0,17	0,3	0,3	0,05	0,05	-	-	-	-	-	Kalan
AISI 430	0,046	0,6	0,586	0,022	0,001	17,13	0,132	0,019	0,121	0,044	Kalan

Tablo 2. Deneide kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri. (The mechanical properties of materials used in the experiment)

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
S235JR	235	340-470	25
AISI 430	205	450	22

Tablo 3. Deneide kullanılan dolgu metalinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri. (The chemical composition and mechanical properties of filler metal used in the test).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
0,03	0,80	1,80	23,5	13,0	Min 320	Min 520	Min 30

Tablo 4. Kaynak esnasında kullanılan kaynak parametreleri. (Welding parameters used during welding)

Kaynak parçaları	Kaynak akımı (A)	Tel hızı (mm/sn)	Kaynak hızı (mm/sn)	Kaynak gerilimi (V)	Gaz debisi (Lt/dak)	Isı girdisi (J/mm)
1.	100	3,5	4	19	12	380
2.	110	4	4	19	12	418
3.	120	5	4	19	12	456

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR (RESULT AND DISCUSSIONS)

#### 3.1 Çekme deneyi (Tensile Test)

Kaynaklı numulere, tel ilerleme hızının, dolayısıyla kaynak akımının birleştirmelerin mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme testi yapılan numunelerin her bir parametresinden gerçekleştirilen deney numyelerinin kopma resimleri Şekil 1'de verilmiştir. Tablo 5'de çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler, Şekil 2'de ise her bir numune için yapılan üç çekme test ortalamasının çekme diyagramları verilmiştir.

Elde edilen veriler ana malzemelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırıldığında, her üç deney numunesinin çekme dayanımlarının S235JR karbon çeliğininin çekme dayanımı için verilen değerler arasında olduğu tespit edilirken, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin çekme dayanımından düşük olduğu görülmüştür. Aynı şekilde % uzama değeri üzerinde yapılan karşılaştırmada ise elde

edilen sonuçların S235JR karbon çeliğininin % uzama değerinden düşük, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin % uzama değerinden büyük olduğu saptanmıştır. Ancak her üç deney numunesinin de akma dayanımlarının her iki ana metalden de yüksek olduğu görülmüştür.

Şekil 2'de verilen çekme deneyi sonuçlarında en düşük çekme dayanımı 110 A kaynak akımında 343,54 MPa olarak ölçülürken, en yüksek çekme dayanımı 100 A kaynak akımında 346,74 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek akma dayanımı 120 A kaynak akımında 258,50 MPa ölçülürken, en düşük akma dayanımı 110 A kaynak akımında 250,78 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan çekme deneyleri sonucunda artan kaynak parametreleri ile çekme dayanımının arttığı ve/veya azaldığına dair bir bulguya rastlanamamıştır. Tüm kaynaklı numunelerde kopma, kaynak metali ve ITAB dışında, ana malzemelerin S235JR karbon çeliği tarafından (Şekil 1) meydana geldiği için, kaynaklı bağlantılardan elde edilen max çekme dayanımı değerleri ile max % uzama değerleri birbirlerine yakın değerlerde bulunmuştur. Farklı malzemelerin kaynaklı bağlantılarında kaynak metali ve ITAB'ın mukavemetinin ana malzemelerden



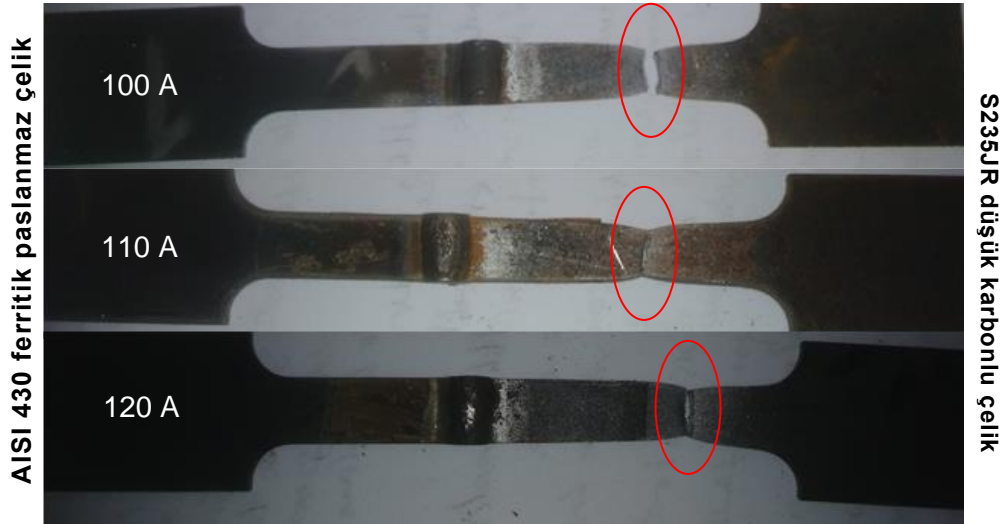
mukavemeti düşük olandan yüksek bulunması, kaynaklı bağlantının kendisinden beklenen şartları sağladığı olarak değerlendirilebilir. Bu durumda, çalışma dahilinde kullanılan her üç proses değişkenin de uygun olduğu bir gerçektir. Tabii ki bu durumda en az ısı girdisi ile yapılan birleştirmenin kullanılması, kaynak bölgesinde meydana gelecek çarpılma ve distorsiyonları azaltma bakımından bir tercih sebebi olacaktır.

Son olarak çekme deneyi sonucunda kopmanın S235JR ana malzemeden olmasının sebebi, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin akma ve çekme dayanımının, S235JR karbon çeliğinin akma ve çekme dayanımından daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır [12]. S235JR ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile yaptıkları bir

çalışmada çekme deneyi sonucunda kopmaların S235JR ana metalinde meydana geldiğini belirtmişlerdir.

### 3.2 Sertlik sonuçları (Hardness Results)

Kaynak tel hızının (kaynak akımının) ve kaynak ısı girdisinin kaynaklı parçaların sertliği üzerindeki etkilerini tespit etmek için sertlik ölçümleri yapılmış olup Şekil 3'te sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen grafik verilmiştir.

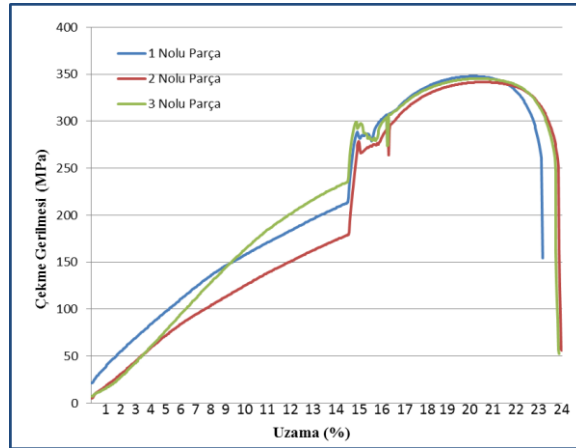


Şekil 1. Çekme numunelerine ait kopma bölgeleri. (Tensile specimens of the fracture zones)

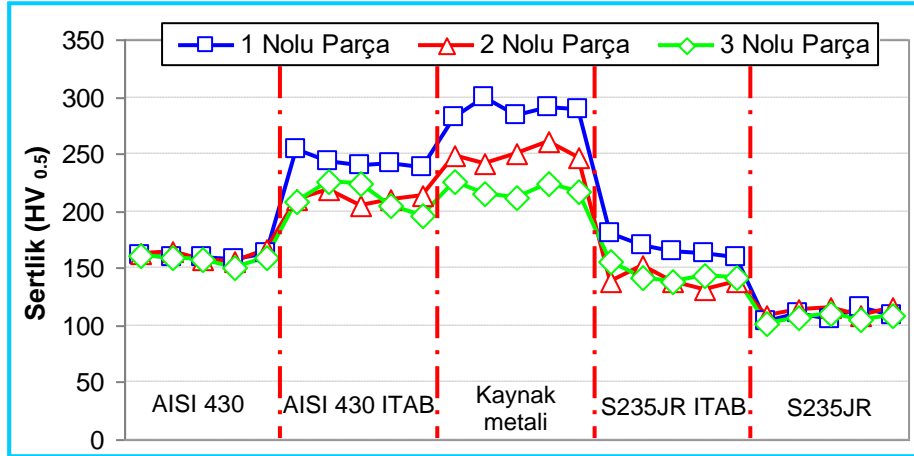
Tablo 5. Çekme deney sonuçları. ( Tensile test results)

Deney numunesi	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1.	252,19	346,74	22
2.	250,78	343,54	23
3.	258,50	345,26	23

A.Yürükve diğ. / S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi



Şekil 2. Çekme deneyi sonucunda elde edilen diyagramlar. (The diagrams are obtained as a result of tensile test)



Şekil 3. Sertlik ölçüm sonuçları. (Hardness measurement results).

Şekil 3'deki sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde, kaynaklı bağlantıdaki her iki ITAB ve kaynak metali sertliklerinin her iki ana metalden de yüksek olduğu görülmektedir. Grafik bir başka açıdan değerlendirildiğinde her üç deney numunesinde de en yüksek sertlik değeri kaynak metalinden elde edilmiştir. Kaynak metalinde en yüksek sertlik 100 A kaynak akımı ve 3,5 m/sn tel hızında 313 HV ölçülürken en düşük sertlik ise 120 A kaynak akımı ve 5 m/sn tel hızında 211 HV olarak ölçülmüştür [1]. Ferritik paslanmaz çelikler üzerine yaptıkları bir çalışmada kaynak işleminde ısı girdisinin birleşme bölgesindeki termal ısıl çevrimini değiştirmesinin mikroyapı özelliklerini değiştirdiğini ve bunun da sertlik özelliklerinin de değişmesine neden olduğunu söyleyerek, kaynak bölgesinin sertliğinin hem ITAB'dan hem de ana metalden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Kaynaklı bağlantılardaki her iki ITAB bölgesinin sertliği incelendiğinde, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ITAB

sertliğinin, S235JR karbon çeliğinin ITAB sertliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca birleştirmelerdeki her iki ITAB'da ana metallerle karşılaştırıldığında, her iki ITAB'ında ana metallerden daha yüksek sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki ITAB'daki bu sertlik artışının, kaynak esnasındaki ısı girdisinin, dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızının kaynaklanmaktadır [8]. Kılınçer ve Kahraman 409 ferritik paslanmaz çelik ve Ç1010 çeliği ile yaptıkları bir çalışmada kaynak ile hızının sabit kalıp tel ilerleme hızının artması ile kaynak bölgesine verilen ısı girdisinin arttığını, bu ısı girdisinde sertliği düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Sertlik sonuçları ile mikroyapı çalışmaları ortak olarak değerlendirildiğinde 430 ferritik paslanmaz çelik ITAB'ında tane sınırlarında dentritik oluşumların meydana geldiği görülmüştür. Bunun da ITAB'da sertlik artışına neden olduğu düşünülmektedir.

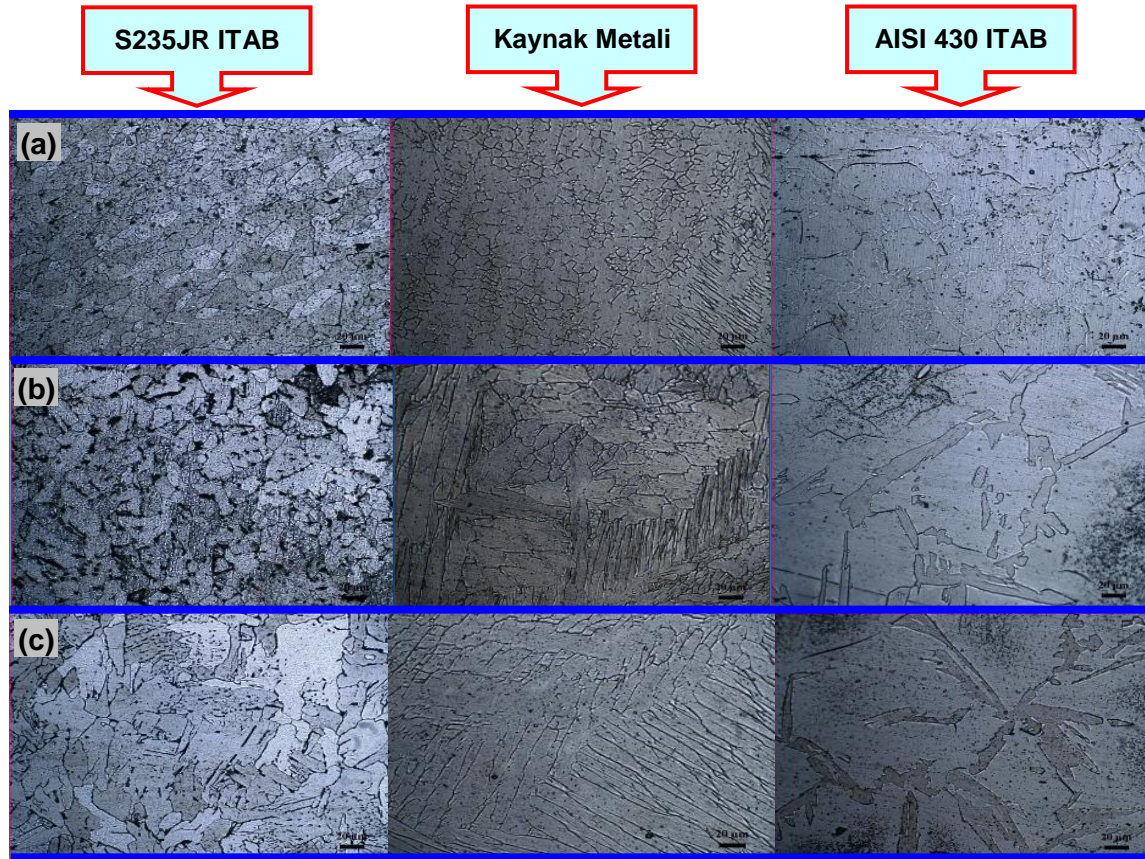
Sonuç olarak; yapılan çalışmada artan kaynak parametreleri ile sertlik değerinin düştüğü görülmüştür. Buna ise artan kaynak parametreleri ile artan ısı girişinin kaynak metalinin soğuma hızını düşürmesi neden olmuştur.

### 3.3 Mikroyapı incelemeleri (Investigations of Microstructure)

Değişen kaynak parametrelerinin birleştirmelerin mikroyapısı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, kaynaklı numuneler üzerinde mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4’de mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilen optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde kaynak metalinde kaba ve sütümsal tanelerin oluştuğu görülmektedir. Literatürde MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen 430 ferritik paslanmaz çeliğin kaynak metalinde ısı girişine bağlı olarak kaba ve sütümsal tanelerin oluştuğu bildirilmiştir [13]. Ayrıca artan kaynak akımına (tel ilerleme hızına) paralel olarak

kaynak bölgesine giren ısı girdisinin de artması sonucunda kaynak metalindeki sütümsal tanelerde uzamaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tanelerde meydana gelen bu değişimlerin kaynak metalinin sertliğinin artmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca kaynak akımının (tel ilerleme hızının) artması, tanelerde büyümelere neden olmuştur. Tane büyümesine kaynak akımına paralel olarak artan ısı girdisi neden olmuştur. Literatürde düşük karbonlu çelikle ferritik paslanmaz çelik MIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve yapılan çalışmada ferritik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin ITAB’larında tane irileşmelerinin görüldüğünü buna ise artan ısı girdisinin soğuma hızını ve katılaşmayı yavaşlatmasının sebep olduğu rapor edilmiştir [8]. Benzer şekilde Taban, Deleu, Dhooge ve Kaluç MIG kaynak yönetmi ile ferritik paslanmaz çelikleri kaynatmışlar ve ITAB’daki tane irileşmesinin ısı girdisine bağlı olarak değiştiğini rapor etmişlerdir [15].



Şekil 4. Farklı kaynak akımlarında birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri a) 100 A, b) 110 A ve c) 120 A. (Microstructural images of the joined sample at different welding current).

Birleştirmenin AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğinin ITAB görüntüleri incelendiğinde, tanelerin belirgin bir şekilde kabalaştığı ve büyümüş tane sınırlarında dentirik kolların oluştuğu görülmüştür. Oluşan dentirik kollarının tane sınırı karbürü olduğu düşünülmektedir. Eker 430 ferritik paslanmaz çeliğini MIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve ferritik paslanmaz çeliğin iri tanelerinin sınırlarında ve içerisinde krom karbür çöketilerinin oluştuğunu bildirmiştir [13]. Meydana gelen bu krom kabür çöketileri de 430 ferritik paslanmaz çeliğin ITAB'nın sertliğin artmasında etkili olmuştur. Aynı şekilde literatürde ITAB'ın ferritik fazından meydana geldiği ve iri taneli bölgede tane içinde ve tane sınırında çita şeklinde krom karbülerin oluştuğu rapor edilmiştir [14].

S235JR karbon çeliğinin ITAB görüntüleri incelendiğinde artan tel ilerleme hızına (kaynak akımına) paralel olarak tanelerde büyümeler görülmüştür. Literatürde S235JR karbon çeliğinin ITAB'ında iri ve ince taneli bir yapı meydana geldiği bildirilmiştir [16]. Tanelerde meydana gelen bu değişime, artan tel ilerleme hızına paralel olarak artan ısı girdisi sebep olmuştur. Yine başka bir çalışmada Bendikiene, Janusas ve Zizys S235JR karbon çeliğini MIG/MAG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve yaptıkları çalışmada kaynak sıcaklığına ve soğuma hızına bağlı olarak tanelerde kabalaşmaların meydana geldiğini bildirmişlerdir [17].

Öteyandan kaynak metalinde ve her iki taraftaki ITAB'ın tanelerinde meydana gelen değişime kaynak sırasında kullanılan ilave telinde katısı olduğu düşünülmektedir. Literatürde sade karbonlu çelik ve AISI 430 paslanmaz çelikle yapılan bir çalışmada AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin ITAB'ında çökelti miktarına ve tane büyümesine, ilave dolgu metali kullanılmasının da katkısı olduğundan bahsedilerek, buna ise ısı girdisinin neden olabileceği bildirilmiştir [2].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çekme testleri sonucunda, farklı proses değişkenleriyle yapılan birleştirmelerin tümünde kopma, birleştirmenin S235JR karbonlu çelik malzeme tarafında meydana gelmiştir. Bu sonuç, kaynak işlemi esnasında seçilen proses değişkenlerinin ve ilave metalin doğru seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

- ✓ Çekme testleri sonucunda, farklı parametrelerde birleştirilen kaynaklı bağlantıların çekme mukaveti ile % uzama değerleri birbirlerine yakın bulunmuştur. Bunun sebebi kopmanın tüm testlerde ana malzemede gerçekleşmiş olmasıdır.

- ✓ Sertlik ölçümleri sonucunda birleştirmenin her iki taraftaki ITAB ile kaynak metalinin sertliklerinin her iki ana malzemeden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- ✓ Birleştirmenin AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ITAB'ının sertliğinin artmasına mikroyapıda meydana gelen tane sınırında çöken krom karbürün sebep olduğu düşünülmektedir.
- ✓ Kaynaklı bağlantılarda kaynak akımının artmasıyla ısı girdisi artmış, ısı girdisinin artışı dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızı azaldığından sertliğin düştüğü görülmüştür.

#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleşmesindeki katkı ve yardımlarından dolayı Düzce "TEKNOROT Otomotiv Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve sarf malzeme teminindeki yardımlarından dolayıda Gedik Kaynak A.Ş teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. K. Lakshminarayanan, K. Shanmugam and V. Balasubramanian, "Effect of antogenous arc welding processes on tensile and impact properties of ferritic stainless steel joints.", *Journal of Iron and Steel Research, International*: vol.16, no.1, pp. 62-68, 2009.
- [2] S. M. Khorrami, M. A. Mostafaei, H. Pouraliakbar and H. A. Kokabi, "Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferric stainless steel joints.", *Materials Science&Engineering A*, vol. 608, pp. 35-45, 2014.
- [3] J. C. Lipold and D. J. Kotecki, "Welding metallurgy and weldability of stainless steels.", *Wiley- Interscience*, pp 111-112, 2005.
- [4] D. K. Ramkumar, A. Chandrasekhar, A. K. Singh, S. Ahuja, A. Agarwal, N. Arivazhagan and A. M. Rabel, "Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties or outgeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and withot flux.", *Journal of Manufacturing Processes*: vol. 20, no.1, pp. 54-69, 2015.
- [5] M Alizadeh, S.P.H. Marashi and M Pouranvari, "Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties." *Materials & Design*: vol. 56, pp. 258-263, 2014.



- [6] B. S. Ünlü, “Ark, TIG, MIG/MAG kaynakları yapılmış TS Fe 37-2 çeliğinin kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması” 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Serisi. Ankara, pp. 539-546, 23-25 Mayıs 2012.
- [7] S. S. Yılmaz, B. S. Ünlü, M. Uzkut and C. Çivi, “MIG/MAG kaynağı ile farklı akımlarda birleştirilmiş Fe 37 çeliğinin kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özellikleri.” 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Serisi. Ankara, pp. 383-391, 23-25 Mayıs 2012.
- [8] E. Kılıç and N. Kahraman, “AISI 409 ve Ç 1010 çeliğinin östenitik elektrod kullanarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması.” Gazi Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Dergisi: vol. 24, no. 1, pp. 23-31, 2009.
- [9] N. Kahraman and B. Gülenç, Modern Kaynak Teknolojisi. Epa-Mat Basım Yayın, 100–101, 2013.
- [10] A. Çelik and A. Alsaran, “Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints.” Materials Characterization: vol. 43, pp. 311–318, 1999.
- [11] T. Mert, N. Gultekin and A. Karaaslan, “Mechanical and microstructural evaluation of DMAG welding of structural steel.” Advances in Mechanical Engineering: vol. 7, pp. 1-9, 2015.
- [12] M. Jafarzaghan, A. Abdollah-zadeh, A. H. Feng, T. Saeid, J. Shen and H. Assadi, “Microstructure and mechanical properties of a dissimilar friction stir weld between austenitic stainless steel and low carbon steel.” J. Mater. Sci. Technol.: vol. 29, no. 4, pp. 367-372, 2013.
- [13] T. Eker, “Effect of synergic controlled pulsed and manual gas metal arc welding processes on mechanical and metallurgical properties of aisi 430 ferritic stainless steel.” Metallurgy and Materials: vol. 58, no. 4, pp. 1029-1035, 2013.
- [14] T. Eker, “AISI 430/ AISI 1040 çelik çiftinin anahtar deliği plazma kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, mikroyapı ve mekanik özelliklerin araştırılması.” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [15] E. Taban, E. Deleu, A. Dhooge and E. Kaluç, “Gas metal arc welding of modified X2CrNi12 ferritic stainless steel.” Kovove Mater: vol. 45, pp. 67-74, 2007.
- [16] O. Çelik, “Gazaltı (MAG) kaynağında kullanılan rutil, bazik ve metal özlü tellerin kaynak metali özelliklerine etkisinin araştırılması” ,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 2013.
- [17] R. Bendikienė, G. Janušas and D. Žižys, “Comparative analysis of microstructure and quality of gas metal arc welded and shielded metal arc welded joints.” Mechanika: vol. 21, no.4, pp. 323-328, 2015.



## **Pulse plazma yöntemi modifiye edilmiş sıcak iş takım çeliklerinin yüzey özellikleri**

Yıldız Yaralı Özbek<sup>1</sup>

*03.08.2016 Geliş/Received, 20.10.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296813

### **ÖZ**

Pulse plazma prosesi bir modifikasyon yöntemidir. Bu çalışmada; sıcak iş takım olan W360 ISOBLOC çeliğinin yüzeyleri pulse plazma sistemi ile modifiye edilmiş ve bu yüzeylerin mekaniksel ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda üç farklı nozul mesafesi (30mm, 40mm, 50mm) ve pulse sayısı (15, 10, 5) kullanılmıştır. Modifiye edilen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları çekilmiş ve modifikasyon tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Pulse plazma prosesinin uygulandığı parametrelerin değişiminin modifikasyon tabaka kalınlığını ve yapısını etkilediği belirlenmiştir. Modifikasyon tabakasından alınan x-ışını analizlerinde FeN, Fe<sub>2</sub>N,  $\gamma$ - Fe piklerine rastlanmıştır. Çelik yüzeylerine SEM ve EDS analizleri uygulanmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde mesafeye ve pulse plazma parametrelerine göre değişen sertlik değerleri elde edilmiştir. Modifikasyon işlemi uygulanmadan çeliğin sertlik değeri 4-6 kat artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Pulse plazma, Sıcak iş takım çeliği, Modifikasyon, Sertlik

## **The surface properties of hot work steel modified with pulse plasma treatment**

### **ABSTRACT**

In this study, the surface properties of a W360 ISOBLOC as hot work steel was investigated in respect to mechanical and microstructural aspects. Three were three different sample-plasma gun nozzle distances (30, 40 and 50 mm) and three different pulse number (5,10 and 15) were chosen for the surface modification at a constant battery capacity of 800 mf. After pulse plasma surface treatment, the modified surface layers were examined using an optical microscope. The SEM and EDS analyses were applied to surface on samples. It was observed that surface treatment affects the formation of a new structure. XRD analyses was done. The new phases were formed such as FeN, Fe<sub>2</sub>N,  $\gamma$ - Fe, W<sub>3</sub>O which is located in the modification layer. The samples were also subjected to micro-hardness measurements. It was found that the hardness values of modified surfaces are 4-6 times higher than that of the untreated samples.

**Keywords:** Pulse plazma, Hot work steel, Modification, Hardness

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü – yyarali@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel alanlarda, kesici, delici ve şekil verici olarak kullanılan metal çalışma parçalarının (öğütücü parçalar, matkaplar, kalıplar, pres, haddeler v.s.) çalışma yüzeyleri yüksek ısı dayanımına ve sertliğe sahip olması gerekmektedir. Ayrıca teknolojideki gelişmeler ile iş parçalarının korozyon, aşınma ve yorulma dayanımlarının da sürekli artırılmasını beklenmektedir. Bu beklentilerle beraber, geliştirilecek proseslerin hem ekonomik hem ekolojik dengeye zarar vermeyen teknolojiler olması da arzu edilmektedir [1-3].

Bu sebeplerle konsantre enerji kaynaklarının kullanıldığı (lazer, elektron demeti, plazma v.s gibi) yüzey işlemleri sıklıkla araç gereçlerin sertleştirilmesi için kullanılmaktadır [4]. Konsantre enerji kaynakları metalin yüzey tabakasının hızlı ısıtılmasına (ısıtma süresi  $1 \times 10^{-3}$ - $1 \times 10^{-6}$ sn.), peşinden de ısının hem yapıdan hem de çevreden atılması için yoğun soğutulmasına neden olmaktadır. Bu yüksek oranlarda ki ısıtma ve soğutmalar metalin yüzey katmanlarında dağılmış bir kristal yapıya, yüksek dislokasyon yoğunluğuna, karbon ve azot içeriklerinde dalgalanmalara sebebiyet vermektedir [5,6]. Hızlı ısınma ve soğuma sonucunda dengede olmayan amorf nanokristalin yada metastabil fazlar oluşmakta ve bu fazlar yüzey özellikleri geliştirmektedir. Sertlik artmaktadır [7]. Hızlı ısınma ve soğuma çeliklerin yalnızca yüzey tabakalarında ostenit oluşumuna imkan tanır [4].

Pulse plazma teknolojisi parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir [4-6]. Esas olarak yoğun enerjili pulse kullanımı malzemenin işlem yüzeyinde morfolojinin değişimine yol açarak modifikasyona sebep olmaktadır [4,5]. Pulse, yoğun elektron ışını malzemelerin mikroyapısının ve faz kompozisyonunu değiştirerek yüzey özelliklerini geliştirmektedir. Bu teknoloji yüzeyde homojen bir tabaka oluşumuna sebep olmaktadır [6]. Yüzey teknolojileri için sadece pahalılık, verimsiz sonuçlar ve yüksek üretim maliyetleri değil ayrıca, enerji, malzeme, üretim kapasitesi diğer sorun teşkil eden konulardır. Pulse plazma teknolojisi ile bahsi geçen dezavantajlar ortadan kaldırılarak malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmaya konu olan sıcak iş takım çelikleri yüksek sıcaklıkta metalik malzemelerin talaşsız şekillendirilmesinde kullanılan malzemelerdir [7]. W360 ISOBLOC standart sıcak iş takım çeliğidir. 360 ISOBLOC ılık ve sıcak dövme kalıpları ve zımbaları için geliştirilmiş bir takım çeliğidir. Sıcak iş takım

çeliklerinin çok iyi tokluğu ile birlikte, yüksek hız çeliklerinin yüksek sertliğinin avantajlarına sahiptir. Sertlik ve tokluğun istendiği çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Bu çalışmada endüstride yoğun kullanımı olan W360 ISOBLOC sıcak iş takım çeliklerinin yüzeyleri pulse plazma yöntemi ile modifiye edilmiştir. Yüzey işlemi uygulanmış parçaların mikroyapısal ve mekaniksel özellikleri araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Kimyasal içeriği Tablo 1’de verilen çubuk halinde W360 ISOBLOC sıcak iş takım çeliği CNC tezgahında silindirik olarak 20mm çapında 10mm yüksekliğinde kesilmiştir. Kesim işlemi sonrası numuneler 60, 120, 240, 400 ve 600 mesh’lik zımparalardan geçirilmiştir. Zımpara işlemi sonrası numunelerin yüzeyleri alkolle temizlenmiş ve pulse plazma işlemi için hazır hale getirilmiştir. Pulse plazma sistemi için hazırlanan numunelerin Tablo 2’de verilmekte olan deney şartlarına göre yüzeyleri modifiye edilmiştir. Pulse plazma öncesi numunelere herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır (karbürizasyon vb. gibi). Bu çalışmada tükenen elektrod olarak W kullanılmıştır. Pulse plazma işleminin uygulandığı sistemin resimleri Şekil 1’de verilmektedir.



a)



b)

Şekil 1. a)Pulse plazma uygulama sistemi (plazmatron), b) kontrol paneli ve güç üniteleri (pulse plasma system, b)control unit and power unit)

Tablo 1. W360 ISOBLOC sıcak iş takım çeliğinin kimyasal içeriği ( the chemical analyses of W360 ISOBLOC hot work steel)

W360 ISOBL	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	0,597	0,301	0,271	0,0122	0,0014	3,88	0,505	4,77	0,0179
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,567	0,136	0,0101	0,0017	1,59	~ 6,30	0,0017	0,0109	0,0027	81

Tablo 2. Pulse plazma işleminin uygulama şartları (the process parameters of pulse plasma treatment)

Numune No	h (mm)	Numune- nozul mesafesi(mm)	Pulse sayısı	Pil Kapasitesi, (ml)	Elektrod	Modifikasyon Tabaka Kalınlığı, µm
1	10	30	5	800	W	13
2	10	30	10	800	W	12
3	10	30	15	800	W	15
4	10	40	5	800	W	10
5	10	40	10	800	W	13
6	10	40	15	800	W	18
7	10	50	5	800	W	9
8	10	50	10	800	W	12
9	10	50	15	800	W	20
10	10	60	5	800	W	8
11	10	60	10	800	W	18
12	10	60	15	800	W	19

Pulse plazma işlemi uygulanmış numuneler öncelikle modifiye olan yüzeylerinde meydana gelmiş spot merkezlerini ortalayacak biçimde kesme cihazı (Discotom 6) ile hassas biçimde kesilmiş ve kesit incelemesi yapılmak amacıyla bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800,1000, 2400, 4000 meshlik zımparalama kademelerinden geçirilmiştir. İyice yıkanarak zımparalama kademesinden gelecek aşındırıcılardan temizlenen numuneler, 3 µ'luk elmas pasta ile parlatılmışlardır. Metalografik olarak hazırlanan numuneler %3'lük nital dağlayıcısı ile dağlanmış ve Zeiss marka optik mikroskopla numunelerin değişik

büyütmelerde fotoğrafları çekilmiştir. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin Future Tech marka mikrosertlik cihazında 5 gr yük altında 15 sn. süre ile sertlik değerleri alınmıştır. Sertlik değerleri, numune üzerinde 3 farklı bölgede sertlik deneyi uygulanarak elde edilmiş üç değerlerin ortalaması alınarak bulunmuştur. Üretilen numuneler kesme işlemine tabi tutulmadan önce X-ışını analiz çalışmaları yapılmıştır. Rigaku 6600 model X-ışını cihazı ile 2° açıyla ölçümler alınmıştır. Kesit görüntü için hazırlanan numunelerden bazıları iletken bakalite alınarak SEM analizleri için hazırlanmıştır. SEM ve EDS çalışmaları Jeol-6600 marka cihazla yapılmıştır.

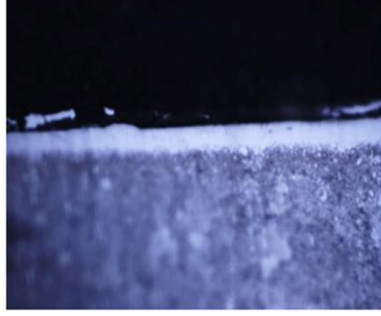
Farklı mesafe ve farklı pulse atışlarında üretilen kaplamaların yüzeyleri, optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Şekil 3a,b,c,d,e,f,g, h'de 30mm, 40mm ve 50mm mesafede 5 ve 10 pulse için numune gruplarının kesit mikroyapıları verilmektedir. Optik yapı görüntülerinde kontrast farklılığından bileşik tabaka ve difüzyon tabakasından oluşan modifikasyon tabakası net bir biçimde görülmektedir. Yüzeyden içeri doğru önce bileşik zone sonra difüzyon zone oluşmuştur. Yüzeylerde görülen beyaz zone bileşik zone olarak adlandırılmaktadır [6,8].

Değişik parametrelerin modifikasyon tabakası üzerine etkisi optik yapılardan görülebilmektedir. Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabakası kalınlaşmış ve daha homojen bir hale gelmiştir [4]. Bunun nedeni pulse sayısının artışıyla yüzeye gelen iyonize ürün miktarının artışıyla açıklanabilir [6,8]. Tablo 2'de verilmekte olan modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinden bu oluşum rahatlıkla görülebilmektedir.

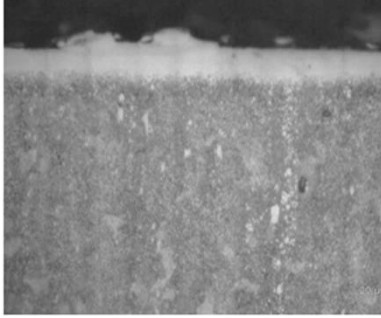
Mesafe 30mm'den 40mm ve 50mm'ye yükselmiştir. 30mm yüzeyde aşırı ısınmadan dolayı gördüğümüz ergime olayları mesafe artışıyla azalmıştır. Mesafenin artması sonuçlardan da görüleceği üzere modifikasyon tabaka kalınlıklarının düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün nedeni nozul ve numune mesafesi arttığında pulse plazma etkisinin azalmasıdır. İyonize ürünlerin numune yüzeyine düzgün ve doğru şekilde gelememesi yani nozuldan yüksek hızda çıkan iyonlaşmış gazların yüzeye tam erişememesi olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [6]. Ayrıca yukarıda da belirtildiği üzere pulse sayısının artması yine 4 no'lu ve 6 no'lu numuneler arasında modifikasyon tabaka kalınlıklarında farklılık oluşumuna sebebiyet vermiştir.

Pulse sayısının artması ile optik görüntülerden de anlaşılacağı üzere daha homojen ve düzgün yapıda bir tabakanın oluşumu gözlenmiştir [8].

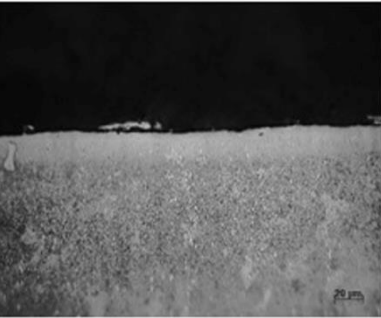
10, 11 ve 12 nolu numune gruplarında nozul numune arası mesafenin en yüksek değerde olması itibariyle kaplama tabaka kalınlıkları azalmıştır.



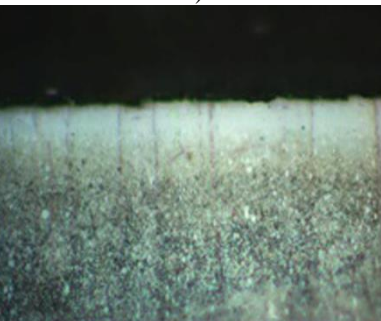
a)



b)



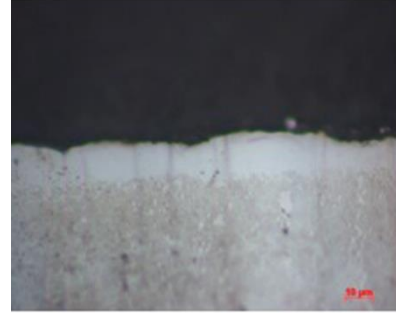
c)



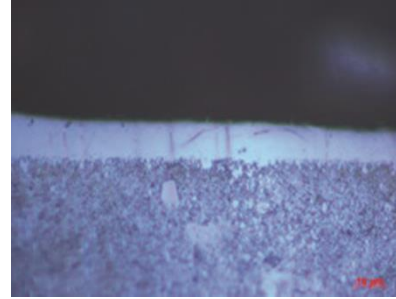
d)



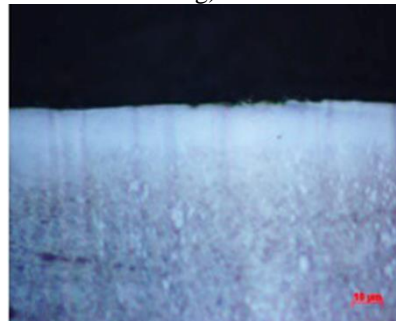
e)



f)



g)

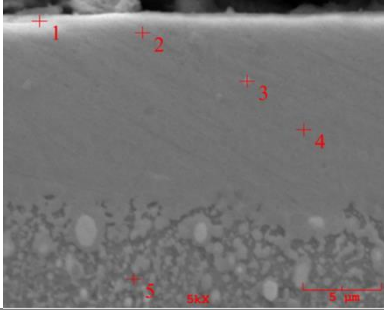


h)

Şekil 2 Pulse plazma işlemi sonrası numunelerin kesitlerinden alınan optik mikroyapı görüntüleri a) 1 ,b)2, c)4, d)5, e)7,f)8, g)10, h)11, ( the optic micrograph of samples a)1, b)2, c)4, d)5, e)7, f)8, g)10, h)11)

Şekil 3'de 6 no'lu numunenin kesit yapısından alınmış SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Modifikasyon tabakası net bir biçimde görülmektedir. Tabaka üzerinden alınan EDS nokta analizlerinde değişik oranlarda wolfram olduğu görülmüştür.

Pulse plazma işlemi esnasında tükenen elektrod olarak kullanılan wolframın tabaka içindeki varlığı elektrodun başarılı bir biçimde çalışma parçası içine difüze olabildiğini göstermektedir. Şekil 4’de ise 9 no’lu numunenin (50 mm mesafe 15 pulse) SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Yine bileşik zon ve difüzyon zonu gözükmemektedir. Ayrıca EDS analizlerinde görülmüştür ki bu numune grubunda mesafenin artışıyla birlikte yüzeyde wolfram bulunma yüzdelinde bir azalma olmuştur. Bu azalma mesafenin artışıyla odaklanmanın zorlaşmasından kaynaklanmış olabilir.



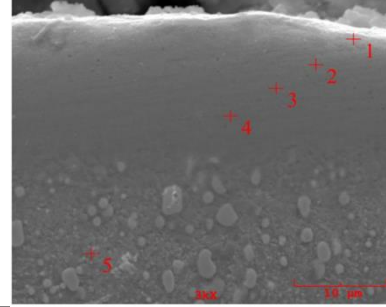
Numune No	Nokta	W (%)	N (%)
6	1	5,31	0,9
	2	7,97	0,5
	3	7,94	0,6
	4	7,58	0,2
	5	0	0

Şekil 3 a) 6 no’lu numuneye (40 mm mesafe 15 pulse )ait SEM görüntüsü ve EDS analizi ( the SEM and EDS analyses of sample 6)

Şekil 5a’de işlem uygulanmamış saf W360 ISOBLOC çeliğinin XRD sonuçları görülmektedir. Görüldüğü üzere yapı içerisinde sadece  $\alpha$ -Fe piki vardır. Şekil 5b’de ise pulse plazma işlemi uygulanmış 8 no’lu numunenin XRD sonuçları görülmektedir. Pulse plazma işlemi sonrası yüzeyde nitrür ve wolfram esaslı yeni fazlar meydana gelmiştir [1,2,6].

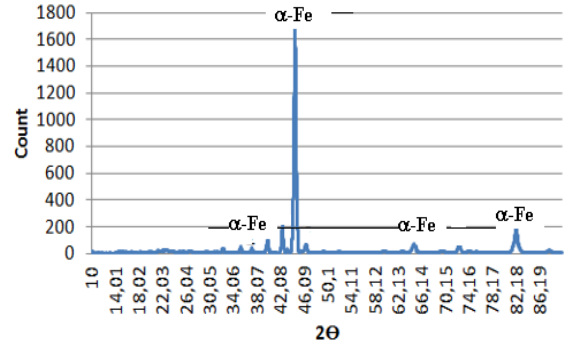
X-ışını analiz sonuçlarında; kaplama kalınlık değerlerinin değişimlerinde etken olduğunu açıkladığımız numune nozul arası mesafenin ve pulse sayısının pik genişlemelerinde ve pik şiddetlerinde değerlerinde değişikliğe yol açmış olduğu görülmüştür. Bu değişim yüzeye gelen iyonize ürün miktarı ile açıklanabilir. Yapıda görülen FeN, Fe<sub>2</sub>-<sub>3</sub>N, W<sub>3</sub>O,  $\gamma$ -Fe fazları malzeme yüzey özellikleri etkileyen önemli fazlardır. Özellikle nitrür esaslı fazlar, wolfram ve wolframoksit bileşikler sertlik ve aşınma

dayanımlarının artmasında etkili fazlardır [6,9,10]. Tyurin ve arkadaşları da yaptıkları çalışmalarda aynı fazların varlıklarını tespit etmişlerdir [4].

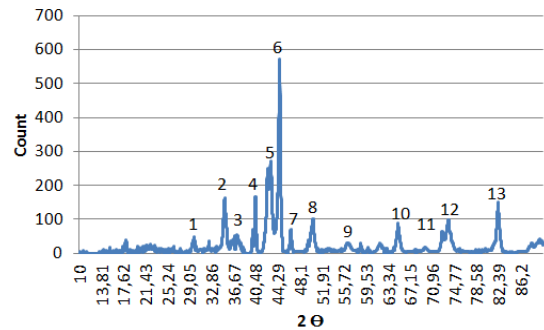


Numune No	Nokta	W (%)	N (%)
9	1	4,44	0
	2	5,56	0,7
	3	4,68	0
	4	7,3	0
	5	8,93	1,43

Şekil 4 a) 7 no’lu numuneye (50 mm mesafe 15 pulse )ait SEM görüntüsü ve EDS analizi ( the SEM and EDS analyses of sample 7)



a)

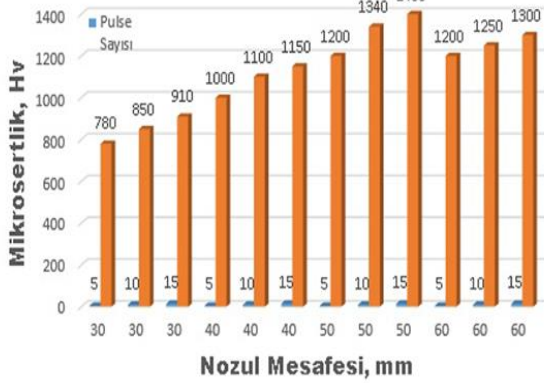


b)



No	Fazlar	No	Fazlar
1	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	7	W
2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , W <sub>3</sub> O	8	Fe <sub>γ</sub> , FeN
3	Fe <sub>2</sub> N	9	Fe <sub>2</sub> N
4	W	10	Fe
5	Fe <sub>2</sub> N, Fe <sub>γ</sub> , FeN	11	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
6	FeN	12	Fe <sub>γ</sub> , FeN
		13	Fe, Fe <sub>2</sub> N

Şekil 5 XRD analiz sonuçları a) pulse plazma uygulanmamış numune, b) pulse plazma işlemi uygulanmış 8 no'lu numune (50 mm-10 pulse), the Results of XRD for a) untreatment sample, b) pulse plasma treated samples)



Şekil 6 Pulse plazma uygulanmış çelik gruplarının mikrosertlik değerleri (HV) ( the hardness values of steel samples produced by pulse plazma process)

İşlem uygulanmadan önce 250 HV olan numunelerin sertlikleri pulse plazma işlemi uygulanmasıyla parametrelere göre değişiklik arz ederek artmıştır. Pulse plazma uygulanmış numunelerin sertlik diyagramları Şekil 6'da verilmektedir. Yüzeylerde işlem sonrası 4-5 kat sertlik artışı görülmüştür. Özellikle işlem etkisiyle yüzeydeki tane boyutların azalması (hızlı ısınma ve soğuma etkisiyle) ve yüzeyde varlığı XRD sonuçları ile belirlenmiş FeN, Fe<sub>2</sub>N gibi yeni fazlar yüzeylerin mekanik özelliklerin gelişmesinde çok etkili olmuştur [10]. Faz miktarlarını etkileyen proses parametreleri aynı şekilde sertlik değerlerini de etkilemiştir. En yüksek sertlik değerleri 50 mm mesafede ve 15 pulse sayısı ile elde edilmiştir. Sertlik değeri 1500 HV'ye kadar çıkmıştır. Mesafenin değişimi ve pulse sayısı sertlik değerlerini de değiştirmiştir. Mesafenin azalmasıyla yüzeyde aşırı ısınma etkisiyle sertlikte bir miktar düşme

oluşmaktadır. Mesafenin artışı ile odaklanma problemi sebebiyle oluşan sert faz miktarlarındaki azalma sebebiyle sertlik de düşüş meydana gelmiştir. Pulse sayısı arttıkça yüzeye difüze olacak iyonize gaz ürün miktarı artacağından sertlik değeri artmaktadır [4,6,8]. Uglov ve Podgornik arkadaşları ile yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçları elde etmişlerdir.

Isınma ve soğuma hızının artması sertleşmiş malzemenin boyutunu ve sertleşme derinliğini azaltır. Çok hızlı ısınmadan dolayı, ostenit oluşumu ve karbonun difüzyonu sınırlıdır. Isınma ve soğumanın yüksek hızı genellikle ostenitin büyümesini engeller [11-12].

Pulse plazma işlemi uygulanmış numune gruplarının yüzeylerinde hızlı katılaşmadan dolayı amorf fazlar oluşmaktadır. Pulse plazma sisteminde kullanılan yüksek enerji difüzyonu artırmıştır. Hızlı ısınma ve katılaşma plastik deformasyona, dislokasyon hücrelerine artmasına sebep olarak, yüzey özelliklerinin gelişimine yol açmıştır [8,12].

#### 4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- 1) Pulse plazma işlemi ile iş parçalarının yüzeyinde bir modifikasyon tabakası meydana gelmiştir. Bu tabaka bileşik ve difüzyon zonlardan oluşmaktadır.
- 2) Modifikasyon tabakasının kalınlıkları ölçülmüş ve tabaka kalınlıklarının pulse plazma proses parametrelerine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabaka kalınlığı artmakta ve daha homojen ve düzgün bir hal almaktadır.
- 3) Modifikasyon tabaka kalınlığında nozul mesafesi de etkilidir. Bu çalışmada en yüksek değer görüldüğü mesafe 50 mm'dir
- 4) İşlem sonrası yüzeyde FeN, Fe<sub>2</sub>N, W<sub>3</sub>O<sub>7</sub> ostenit gibi yeni ve sert fazların oluşumları görülmüştür.
- 5) İşlem öncesi 250 HV olan sertlik değerlerinde 5-6 katlık bir değer artışı mevcuttur. En yüksek sertlik değeri 9 nolu (50mm mesafe 15 pulse) numune grubunda görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Quercia, G., Grigorescu, I., Contreras, H., Di Rauso, C., Gutierrez-Campos, D., "Friction And Wear Behaviour Of Several Hard Materials", PP. 359-369, 2001



- [2] Kessler, O.H., Hoffmann, F.T., Mayr, P., “Combinations Of Coating And Heat Treating Processes: Establishing A System For Combined Processes And Examples”, Surface And Coatings Technology, Vol.108–109, Pp.211–216, 1998,
- [3] Kwok, C.T., Lk, H., Cheng, F.T., Man, H.C., “Effect Of Processing Conditions On The Corrosion Performance Of Laser Surface-Melted A1s1 440c Martensitic Stainless Steel”, Surface And Coatings Technology, Vol.166, Pp.221–230, 2003
- [4] Tyurin, N., Kolismichehk, O.V, Ve Tsygankov, N.G., “Pulse Plasma Hardening Of Tolls”, The Paton Welding Journal, Vol.1, Pp. 38-43, 2001
- [5] Zdunek, K., Baszkiewicz, J., Boldok, Z., Jelenkowski, J., Psoda, M., Smolik, J., “Dublex Antiabrasive Coating Produced By Impulse Plasma Deposition”, Surface And Coatings Tech., Vol. 98, Pp.1444-1447, 1998
- [6] Yaralı, Y., “Pulse Plazma Teknolojisi İle Çeliklerde Yüzey Modifikasyonları” Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.,Yüksek Lisans Tezi, 2003
- [7] Uglov, V.V., Amishchik, V.M., Stashynski, V.V., Sveshnikov, Y.V., Rumiancev, I.N., Kostyukevich, E.A., “Structure And Phase Transformation Of Iron Surface Layer Treated By Compression Nitrogen Plasma Flows”, Surface And Coatings Technology, Vol.180 – 181, Pp.633–636, 2004
- [8] Proskurovsky, D.I, Rotshtein, V.P, Ozur, G.E. Ivanov Yu.F., Markov, A.B., “Physical Foundations For Surface Treatment Of Materials With Low Energy, High Current Electron Beams”, Surface And Coatings Technology, Vol.125, Pp.49–56, 2000
- [9] Uglov, V.V., Amishchik, V.M., Astashynski, V.V., Sveshnikov, Y.V., Rumiancev, I.N., Kostyukevich, E.A., “Structure And Phase Transformation Of Iron Surface Layer Treated By Compression Nitrogen Plasma Flows”, Surface And Coatings Technology, L.180 – 181, Pp.633–636, 2004
- [10] Langner, J., Piekoszewski, J., Werner, Z., Tereshin, V.I., Chebotarev, V.V., Garkusha, I., Wali, L., Sartowska, B., Starosta, W., Szymczyk, W., Kopcewicz, M., Grabias, A., “Surface Modification Of Constructional Steels By Irradiation With High Intensity Pulsed Nitrogen Plasma Beams”, Surface And Coatings Technology, Vol. 128-129, Pp.105-111, 2008
- [11] Podgornik, B., Vizintin, J., “Wear Resistance Of Pulse Plasma Nitrided A1s1 4140 And A355 Steels”, Materials Science And Engineering , Vol. A315, Pp.28–34, 2001
- [12] Y.Y. Ozbek, C. Sarioglu, M.Durman, 2014, “Surface Properties Of M2 Steel Treated By Pulse Plasma Technique”, Vacuum, Vol.106, 2015

## **Ağva ilçe merkezine ait taşkın yayılım haritalarının ve mevcut binaların taşkın su seviyelerinin tespiti**

Osman Sönmez<sup>1\*</sup>, Fatma Demir<sup>2</sup>

*16.05.2016 Geliş/Received, 26.10.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296826

### **ÖZ**

Taşkınlar, genel olarak yeryüzünün değişik bölgelerinde yağış dengesinin değişmesi, küresel ısınmanın getirdiği iklim değişikliği ve doğal bitki örtüsündeki değişimler sonucunda ani olarak ve belirli periyotlarda meydana gelen, her yıl milyonlarca insanı etkileyen, çevre tahribinin yanı sıra can ve mal kaybına sebep olan ve ekonomiyi olumsuz yönde etkileyen doğal afetlerdir. Dünyada, taşkınların etkilerinden korunmak ve zararlarını azaltmak amacıyla pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul'un turistik yerleşimi ve iki derenin arasında bulunması sebebiyle de taşkın afeti açısından kritik bir bölgesi olan Ağva için farklı senaryo debileriyle taşkın analizleri yapılmıştır. Taşkın analizleri sonucunda taşkına maruz kalan her bir konut için su seviyeleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** taşkın, risk, konut, Ağva,

## **Determination of flood inundation maps and water levels of buildings in Agva town centre**

### **ABSTRACT**

The floods are generally natural disasters that occur at once or at specific periods due to the change of precipitation balance in various regions of the world, the climate change brought by the global warming and the changes on natural vegetation and that affect millions of people every year and lead to loss of life and property as well as environmental damage and adversely affect the economy. So many studies have been carried out with the aim of being protected from effects of the floods and decreasing their damages. In this paper, different scenarios flood discharges were analyzed for Agva which is the touristic peripheral settlement of Istanbul and a critical area in terms of flood disaster due to its location between two streams. According to the results of flood analyses, water levels were determined for every dwelling under the effect of flood.

**Keywords:** flood, risk, building, Agva

---

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya - [osonmez@sakarya.edu.tr](mailto:osonmez@sakarya.edu.tr)

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya - [fsagin@sakarya.edu.tr](mailto:fsagin@sakarya.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Taşkın felaketi büyüklüğü, sıklığı, oluşumu, can ve mal kaybı ile sosyo-ekonomik aktivitelere verdiği zararlarla en büyük küresel tehlike olarak kabul edilmektedir [1]. Doğal afetler hakkında yapılan trend analizleri, taşkın felaketleri ve kayıplarının son yıllarda büyük oranda arttığını ortaya koymaktadır [2]. Son otuz-kırk yıllık zaman diliminde, taşkın olaylarının sıklığı ve şiddetinin artmasına bağlı olarak, can ve mal kayıpları da büyük oranda artmıştır [3-4]. Sadece geçtiğimiz son on yılda, dünyada yaşanan taşkın felaket zararlarının telafisi için 250 milyar doların üzerinde maddi kaynak harcanmıştır [5].

Küresel ölçekte 2005-2015 yılları ortalamasına göre her yıl 183 milyondan fazla insan (sel, taşkın, deprem vb) doğal afetlerden etkilenmiştir. Yine aynı verilere göre ortalama 83 bin insan hayatını bu afetlerden dolayı kaybetmiştir [6].

Yılda ortalama 250 bin kişi, yeryüzünün değişik bölgelerinde, yağış dengesinin değişmesi, küresel ısınmanın getirdiği iklim değişikliği ve doğal bitki örtüsündeki değişimin lokal iklim üzerinde yaptığı etkiler gibi meteorolojik karakterli doğal afetlerden etkilenmektedir [7]. Taşkınların meydana getirdiği kayıp ise ülke ekonomisinde büyük yaralar açmaktadır. Türkiye’de ise 2002 -2013 yılları arasındaki taşkınlarla yaşanan toplam maddi kayıpların 867 milyon US Dolar olduğu görülmektedir [6]. Geliştirilmiş hidrolik modeller ile elde edilmiş taşkın yayılım haritaları kullanılarak taşkınlar yaşanmadan risk altındaki alanları tespit etmek ve bu doğrultuda çalışmalar yaparak olası zararları azaltıcı tedbirler almak gerekmektedir. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanımıyla hidrolik modellemelerde taşkın esnasında oluşacak su yüzü profillerinin tespit edilebilmesi için hidrolojik analizleri yapan programlar geliştirilmiştir. Bu programlar CBS programına entegre edilmiş ve bu şekilde birçok çalışma yapılmıştır.

Oliveri ve Santano Palermo’da iki derenin drenaj kanalları arasında kalan yoğun kentsel yerleşim bölgesinde selin yapısal hasar tespitini sel suyu yüksekliği ve bina tiplerine bağlı olarak hesaplamışlardır [8].

Amini, İran’ın kuzeybatısındaki bir nehir için yaptığı çalışmada taşkın altında kalacak alanları IKONOS uydu görüntülerini ve Sayısal Yükseklik Modelini (SYM) kullanarak belirlemiş ve bu modelin taşkın yönetiminde kullanılabileceğini söylemiştir [9].

Kubal vd. Leipzig kentsel alanında nüfus, farklı arazi yerleşim kullanımları, yeşil alanlar gibi çok ölçütlü yaklaşımla ekonomik sosyal ve ekolojik sel risk ölçütü kullanarak hasar risk haritalarının hazırlanması yöntemi üzerinde çalışmışlardır [10].

Demirkesen, Hatay ili ve bölgesi için farklı kriterleri ele alarak çoklu risk değerlendirmesi yapmıştır. Taşkın riskinin belirlenmesinde DEM verileri ve Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) kullanarak taşkın risk haritalaması yapmıştır [11].

Angelidis ve diğ Arda Nehri Havzasında barajların taşkınları kontrol altına alabilmesi amacıyla farklı taşkın senaryoları geliştirmişlerdir. Mansap bölgesinde taşkın engellenmesini ve enerji kayıplarının da minimuma düşürülmesini hedeflemişlerdir [12].

Taşkınlar meydana gelmeden risk altında kalan alanları ve taşkınların olası zararlarını engellemek için risk haritalarının oluşturulması gerekmektedir. Bu doğrultuda yapmış olduğumuz çalışmada İstanbul’un kuzeyinde, turistik bir yerleşim alanı olan Ağva ilçe merkezi ele alınmıştır. Bölge için farklı senaryo debilerine ait taşkın yayılımları ve maksimum su seviyeleri, 1D HEC-RAS Hidrolik modeli kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut yapılaşmayı gösteren sayısal veriler ile karşılaştırılarak her bir binaya ait maksimum taşkın su seviyesi belirlenmiştir.

## 2. ÇALIŞMA SAHASI (STUDY AREA)

Çalışma sahası olan Ağva, iki dere arasına kurulmuş "Köy" ve "Su" anlamına gelmektedir. Göksu ve Yeşilçay derelerinin ortasında, İstanbul İli’nin Anadolu yakasında yer alan ve Güneybatı Karadeniz’le kıyısı olan bir sahil kasabasıdır. Konumu ve doğası itibarıyla turistik bir bölge olan Ağva’da birçok otel bulunmaktadır. Ağva yerleşimi, deniz seviyesinden 1 m ile 120 m arasında değişen taşkın düzlükleri ile tepelik alanlar arasında konumlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma sahası (Study area)

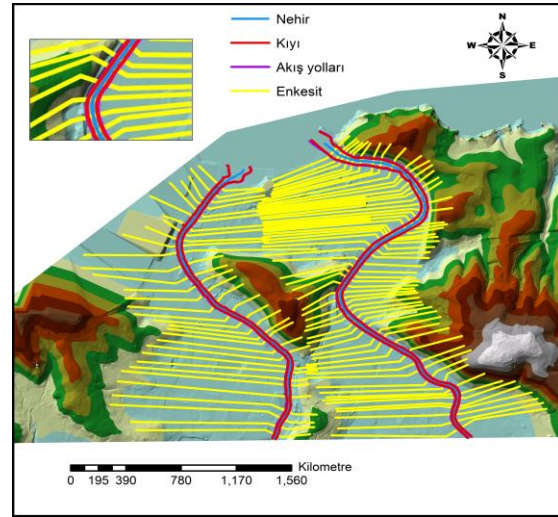
Göksu ve Yeşilçay derelerinin yatak gradyanları oldukça eğimlidir. Derelerin Karadeniz'e döküldüğü kesimde oluşturdukları alüvyal taban düzlüğü üzerinde 3 km uzunluğunda bir alçak kıyı oluşmuştur. Her iki derenin de alüvyal dolgu sahalarının eğimi  $1^0$ 'yi geçmemekte ve derelerin yatak eğimleri Karadeniz'e doğru gittikçe azalmaktadır [13]. Çalışma sahası sık ormanlarla kaplı olup, bitki örtüsü litolojiye bağlı olarak değişmektedir. Bölge en fazla yağışı sonbahar ve ilkbahar mevsimlerinde alır ve yıllık ortalama yağış miktarı 890 mm dir [14]. 28 - 29 Ekim 2010 tarihleri arasında düşen 103.4 mm yağışın sebep olduğu taşkın felaketi sonucunda bölgede birçok ev ve iş yeri kullanılamaz hale gelmiştir.

Anılan taşkında maddi zararların en fazla olduğu, Ağva yerleşim alanının doğusundaki Yeşilçay deresinin mansaptan membaya doğru 3.8 km'lik kısmı ile batısındaki Göksu deresinin mansaptan membaya doğru 3.0 km lik bir kısmı çalışma sahası olarak belirlenmiştir.

### 3. MODEL VE UYGULAMA (MODEL and APPLICATION)

Taşkınları anlamak ve etkilerini ortaya koymak için dünyada birçok farklı hidrolik model kullanılmaktadır. Bunlardan 1D hidrolik modeli, çalışma sahasında meydana gelmesi muhtemel taşkınların modellenmesi amacıyla kullanılmıştır. Yeşilçay ve Göksu derelerine ait nehir en kesit, talveg ve kıyı çizgilerinin sayısallaştırılmasında, Devlet Su İşleri'nden temin edilen 1:5000 ölçekli topografik verilerden elde edilmiş sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır (Şekil 2). ArcGIS yazılımı ile sayısallaştırılan hidrolik veriler HEC-

GeoRAS arayüzü kullanılarak HEC-RAS programına aktarılmıştır.



Şekil 2. Geometrik verilerin sayısallaştırılması (Digitalization of geometric data)

HEC-RAS'ta enkesitlerde düzenleme işlemleri yapılmış ve manning pürüzlülük katsayısı Chow'un (1959) esas alınarak, nehir içinde 0.03, nehir kenarında ise 0.075 seçilerek modele girilmiştir.

Taşkın sıklık analizleriyle, tarihsel akım verileri kullanılarak, farklı tekerrürlere ait taşkın debilerinin hesaplanması yapılabilmektedir. Bu analizler için akım kayıtları ne kadar uzun bir periyodu kapsarsa, hesaplanacak olan tekerrürlü taşkın debileri o kadar gerçekçi olacaktır. Tekerrürlü taşkın debisinin doğru bir

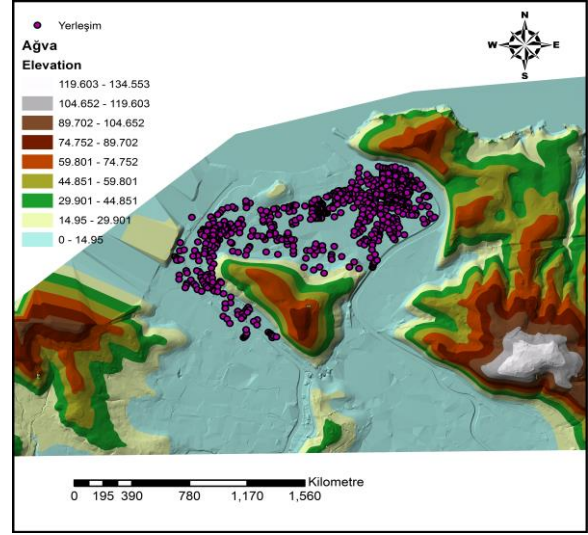
şekilde tespiti de, elde edilecek sonucun doğruluğu açısından büyük önem arz etmektedir [15-34]

Bu çalışmada Marmara havzası Akım Gözlem İstasyonlarına ait verilerin havzayı tam olarak temsil edememesi üzerine hidrolik modellemede senaryo debileri dikkate alınmıştır. Yeşilçay ve Göksu derelerinin taşkın yayılım haritalarının elde edilmesinde senaryo debileriyle oluşturulmuş hidrolik model kullanılmıştır. (Tablo 1).

Tablo 1. Senaryo debileri (scenarios discharges)

Senaryolar	Yeşilçay (m <sup>3</sup> /s)	Göksu (m <sup>3</sup> /s)
Senaryo 1	115	295
Senaryo 2	145	385
Senaryo 3	190	520
Senaryo 4	230	640
Senaryo 5	275	760
Senaryo 6	380	1000

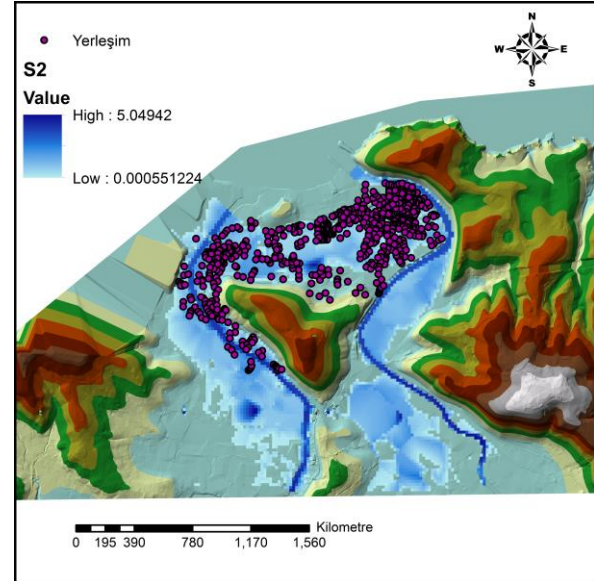
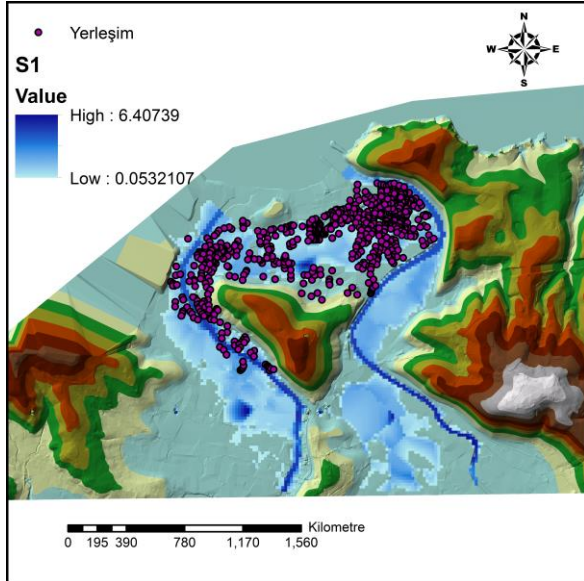
Senaryo debileri ile sayısallaştırılmış geometrik veriler, hidrolik modele aktarılmış ve taşkın analizine tabi tutulmuştur. Hidrolik analiz sonucu senaryo debilerine ait taşkın yayılımları ve maksimum su seviyesini gösteren sayısal haritalar üretilmiştir. Elde edilen sayısal haritalar ArcGIS programında görselleştirilmiştir. Mevcut binalar da sayısallaştırılarak (Şekil 3), taşkın yayılımları ve maksimum su seviyelerini gösteren sayısal haritalar ile karşılaştırılmış ve her bir bina için maksimum su seviyesi elde edilmiştir.



Şekil 3. Ağva şehir merkezinde yer alan mesken amaçlı kullanılan binaların dağılımı (Distribution of dwellings which are located in Ağva centrum)

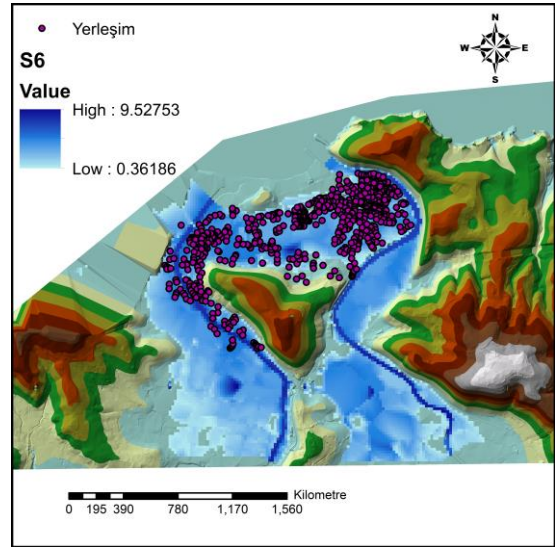
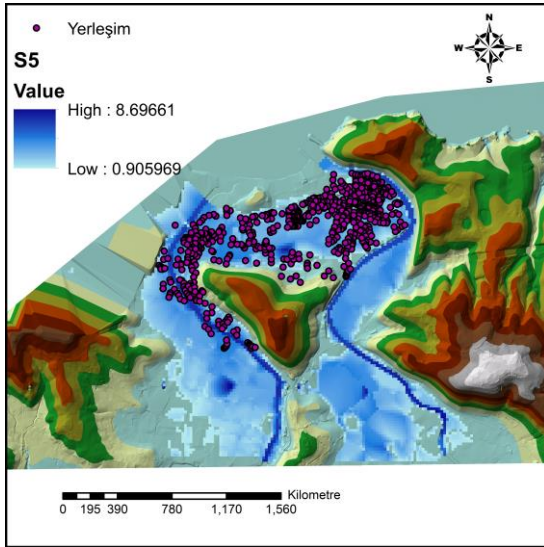
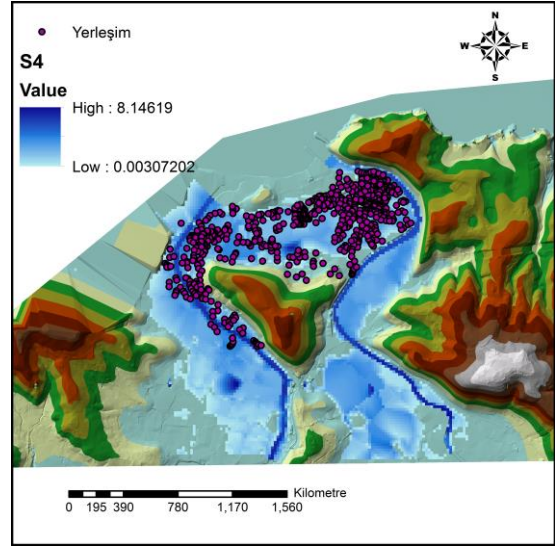
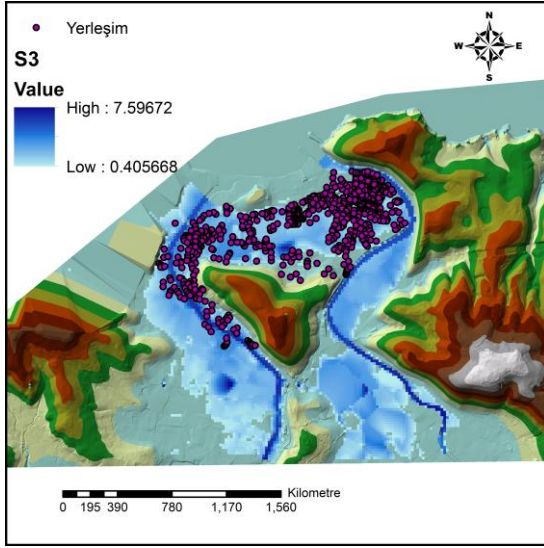
### 3.1. Taşkın Derinlikleri ve Taşkın Altında Kalan Binalar (Flood Depth and Under Flood Property)

Hidrolik model analizleri sonucu elde edilen senaryo debilerine ait taşkın yayılım haritaları ile su altında kalan toplam alanlar ve bu alanlardaki taşkın derinliklerinin değişimi tespit edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Senaryo debilerine ait taşkın yayılımları ve derinlik değişimleri (Flood inundations and depths for scenario discharges)





Şekil 4. (Devamı) Senaryo debilerine ait taşkın yayımları ve derinlik değişimleri (Flood innadation and depth for scenario discharges)

Taşkın derinlikleri topografyaya bağlı olarak değişmektedir. Kıyılarda ve yükseltinin az olduğu yerlerde derinlik oldukça fazladır.

Analiz sonucu Yeşilçay ve Göksu derelerinde senaryo 4 debilerine göre sırasıyla 1.29 km<sup>2</sup> ve 1.34 km<sup>2</sup> lik alanların sular altında kaldığı ve taşkın derinliğinin 0.003 m ilâ 8.15 m arasında değiştiği; Senaryo 5 için 1.37 km<sup>2</sup> ve 1.41 km<sup>2</sup> lik alanların sular altında kaldığı ve taşkın derinliğinin 0.90 m ilâ 8.69 m arasında değiştiği; son olarak, Senaryo 6 için 1.48 km<sup>2</sup> ve 1.58 km<sup>2</sup> lik alanların sular altında kaldığı ve taşkın derinliğinin 0.36 m ilâ 9.52 m arasında değiştiği görülmektedir. Buna bağlı olarak Yeşilçay ve Göksu derelerinin Ağva şehir merkezine bakan kıyılarında taşkın derinlikleri maksimum düzeydedir.

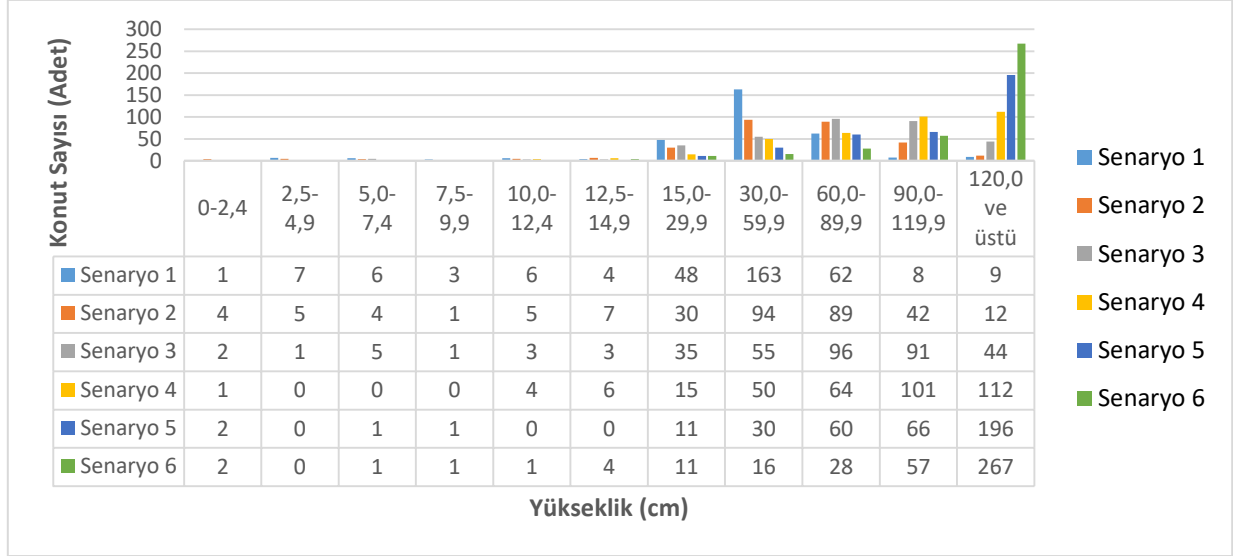
Ağva'nın her iki tarafında bulunan derelere ait taşkın yayılım haritaları kullanılarak farklı senaryolar için hesaplanan risk altındaki toplam alanlar, Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Yeşilçay ve Göksu derelerine ait farklı senaryolar için taşkın risk alanları (Flood risk areas of different scenarios for Yesilcay and Goksu streams)

Senaryolar	Yeşilçay (km <sup>2</sup> )	Göksu (km <sup>2</sup> )
Senaryo 1	0.998	0.952
Senaryo 2	1.097	1.115
Senaryo 3	1.213	1.259
Senaryo 4	1.292	1.341
Senaryo 5	1.374	1.418
Senaryo 6	1.484	1.538

Bu debiler ve hesaplanan alanlar ile Ağva merkezinde yer alan birçok yerleşimin risk altında olduğu bulgusu edinilmiştir. Ayrıca çalışma alanında bulunan, CBS yardımıyla belirlenmiş dairelerin sayısı ve taşkın tekrerrüne bağlı olarak taşkın su seviyeleri tespit

edilmiştir. Şekil 5'te farklı senaryolardaki taşkınlardan etkilenen bina sayılarını ve su seviyelerini gösteren bar grafik verilmiştir.



Şekil 5. Farklı senaryolar için etkilenen bina sayıları ve su seviyeleri (Number of buildings and water levels for different scenarios)

120cm ve üstü su yüksekliğinden etkilenen bina sayısının, taşkınlardan etkilenen diğer binalara nazaran fazla olmasının temel nedeni, çalışma sahasının turistik bir bölge olması ve yerleşimin büyük kısmının nehir kıyı çizgisi ile hemen hemen eş yükseltiliye sahip alüvyal düzlüklerde konumlanmış olmasıdır.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Bu çalışmada Ağva ilçesinin doğu ve batısında yer alan Yeşilçay ve Göksu derelerine ait taşkın risk analizleri yapılmıştır. Çalışma sahasına ait taşkın su yayılım alanları ve bunun sonucunda meydana gelen zarar analizleri gerçekleştirilmiştir. 1 boyutlu hidrolik model taşkın analizinde kullanılmış, elde edilen sonuçlar kent bilgi sistemi ile karşılaştırılarak her bir bina için taşkın su seviyeleri belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Ağva merkezinde yer alan binaların hem düşük hem de yüksek düzeyde risk altında oldukları tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni, iki derenin arasında kalan yerleşim alanı tarafındaki kıyı kotlarının diğer yöndeki kıyılara nazaran düşük olması ve yerleşim alanının geniş bir taşkın düzlüğünde bulunmasıdır. Ayrıca çalışma alanının turistik bir bölge oluşu nedeniyle de binaların büyük bir bölümünün kıyılara yakın bölgelerde konumlanmış olması, taşkınlardan etkilenme düzeylerinin yüksek olmasına

neden olmaktadır. Farklı senaryo debileriyle meydana gelen taşkınlardan etkilenen bina sayısı topografik ve demografik özelliklere bağlı olarak fazla değişmemekle birlikte maksimum su seviyeleri değişim göstermektedir.

Taşkın sonrasında meydana gelecek zararın her bir yapı için ayrı ayrı tespiti gerekli tedbirlerin alınması açısından önem arz etmektedir. Üretilen bölgesel taşkın risk haritaları, kentsel dönüşüm ve imara açılacak alanların tespiti için belirleyici bir veri olacaktır. Aynı zamanda sigortacılık faaliyetlerinde, mesken, ticari ve tarım alanlarında oluşabilecek zararların ön görülerek gerekli risk primlerinin belirlenmesi içinde kullanılabilir. Elde edilen haritaları Seviye-Zarar diyagramları ile birlikte ele alınması ise taşkın meydana getireceği zarar maliyetlerinin de öngörülmesini sağlayacaktır.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] D. N. Jeb, and P. Aggarwal, "Flood Inundation Hazard Modelling of the River Kaduna Using Remote Sensing and Geographic Information Systems", Journal of Applied Sciences Research, Vol. 4, No.12, pp.1822-1833, 2008.
- [2] G. Berz, "Flood Disasters: Lessons from the Past – Worries for The Future", Geosciences Research Group, Munich Reinsurance Company, D-80791, Germany,1999.



- [3] H. Shamaoma, "Extraction of Flood Risk-related Base-Data from Multi-Source Remote Sensing Imagery", Master's Thesis, Internatinnal Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Hollanda,2005.
- [4] T. Katayama, "International Decade for Natural Disaster Reduction: Working Against Time", UNU University Lectures (Tokyo: The United Nations University), 1994
- [5] M. Pelling, , et al., "Reducing Disaster Risk, A Challenge for Development", United Nations Development Programme, New York, USA, 2004.
- [6] International Disaster Database (EM-DAT), 2016. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). <http://www.emdat.be/database>, (Last accessed 10/04/2016).
- [7] I. Akar, , D. Maktav, , K. Kalkan, , Y. Ozdemir, "Determination of Land Use Effects on Flood Risk by Using Integration of GIS and Remote Sensing",: Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances In Space Technologies, pp.23-26, RAST 2009.
- [8] E. Oliveri, and M. Santoro "Estimation of Urban Structural Flood Damages: The Case Study of Palermo", Urban Water, 2, pp.223-234. , 2000.
- [9] J. Amini, "A Method for Generating Foodplain Maps Using IKONOS Images and DEMs" International Journal Remote Sensing, 31(9), pp. 2441-2456. 2010.
- [10] C. Kubal, , D. Haase, V. Meyer and S. Scheuer "Integrated urban flood risk assessment-transplanting a multicriteria approach developed for a river basin to a city", Nat Hazards Earth Syst Sci 9: pp.1881–1895. 2009.
- [11] A. C. Demirkesen, "Multi-risk interpretation of natural hazards for settlements of the Hatay province in the East Mediterranean region, Turkey using SRTM DEM", Environmental Earth Sciences, 65, pp.1895-1907. 2012
- [12] P. Angelidis, M. Kotsikas, N. Kotsovinos, "Management of Upstream Dams and Flood Protection of the Transboundary River Evros/Maritza,"Water Resources Management, 24, pp.2467-2484. 2010.
- [13] Ç. Coşkun "Ağva Plajı'nin Kiyi Süreçleri Açısından Jeolojik Evrimi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi. , 2006.
- [14] F. Ketenci, "Zeolitization of Volcanics in The Northeastern Istanbul (Sile-Agva Region)", Master's Thesis, Istanbul Technical University, Turkey. 2007.
- [15] J. Zhu, C. Tang, "Urban Flood Damage Estimation Using GIS and Remote Sensing, A Case Study in the Wenshan City China", 3rd International Confrence on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). 2010.
- [16] C. A. Doswell, H. E. Brooks, R. A. Maddox, "Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology", Weather and Forecasting, 11, pp.560-581, 1996.
- [17] B. Hankin, S. Waller, G. Astle, R. Kellagher, "Mapping Space For Water: Screening For Urban Flash Flooding", J. Flood Risk Manage., 1, pp.13–22, 2008.
- [18] J. T. Moore, , S.M. Nolan, F.H. Glass, D.L. Ferry and S.M. Rochette, "Flash Flood-Producing High-Precipitation Supercells in Missouri". Preprints, 14th Conf. Wea. Analysis and Forecasting Amer. Meteor. Soc., (J4)7-12, 1995.
- [19] S. G. Mclin, , E. P.Springer, L. J. Lane, "Predicting Floodplain Boundary Changes Following the Cerro Grande Wildfire", Hydrological Processes, Vol.15, pp. 2967–2980, 2001.
- [20] E. C. Tate, D. R. Maidment, F. Olivera, D. J. Anderson, "Creating a Terrain Model for Floodplain Mapping", Journal of Hydrologic Engineering, Vol.7, pp.100-108, 2002.
- [21] G.R. Aggett, , Wilson, J.P., Creating and Coupling a High-Resolution DTM with a 1-D Hydraulic Model in a GIS for Scenario-Based Assessment of Avulsion Hazard in a Gravel-Bed River, Geomorphology, 113: 21-34, 2009.
- [22] Baga, İ., Usul, N., Sorman, Ü., Application of MIKE 11 Model on Çayboğazı Basin in Turkey, DHI Third User Conference, Denmark, 1999.
- [23] N. Usul ve B. Turan, "Flood Forecasting and Analysis within the Ulus Basin, Turkey, Using Geographic Information Systems", Natural Hazards, Vol.39, pp.213-229, 2006.
- [24] I. Akar, D. Maktav, K. Kalkan, Y. Ozdemir, "Determination of Land Use Effects on Flood Risk by Using Integration of GIS and Remote Sensing", RAST 2009: Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances In Space Technologies, pp.23-26, 2009.
- [25] K. Solamanı, "Flood Forecasting Based on Geographical Information System", African Journal of Agricultural Research, Vol.4 No.10, pp. 950-956, 2009.
- [26] P.D. Bates, , A. P. J. De Roo., "A Simple Raster-Based Model For Flood Inundation Simulation", Journal of Hydrology, Vol. 236 No. 1-2, pp. 54-77, 2000.
- [27] J. A. Cunge, , F. M.Holly, A. Verwey, "Practical Aspects of Computational River Hydraulics", London: Pitman Publishing Limited, 1980.

- [28] D. L. Fread, "Numerical properties of implicit fourpoint finite difference equations of unsteady flow: Silver Spring, MD, National Weather Service", NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO18, 38, 1974.
- [29] N. M. Hunter, P. D. Bates, M. S. Horritt, M. D. Wilson, "Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review", *Geomorphology*, Vol.90 No.3-4, pp.208-225, 2007.
- [30] A. Cook, V. Merwade, "Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping", *Journal of Hydrology*, Vol. 377, pp.131-142, 2009.
- [31] W. J. Syme, , M. G. Pinnell, J. M. Wicks, "Modelling Flood Inundation of Urban Area in the UK Using 2D / 1D Hydraulic Models", *Proceedings of the 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering*, The Institution of Engineers, Australia, 2004.
- [32] M. S. Horritt, , P. D. Bates, "Effects of Spatial Resolution on A Raster Based Model of Flood Flow", *Journal of Hydrology*, Vol.253 No.1-4, pp.239-249, 2001.
- [33] E. A. Frank, , A. Ostan, , M. Coccato, G. S. Stelling, "Use Of An Integrated One-Dimensional/ Two-Dimensional Hydraulic Modeling Approach For Flood Hazard and Risk Mapping. In River Basin Management", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol.50, pp.99-108, 2001.
- [34] S. Patro, , C. Chatterjee, , S. Mohanty, , R. Singh, , N. S. Raghuvanshi, "Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Volume 37, Issue 1, pp.107-118, 2009.



## Farklı ısıların kiremit mekanik dayanımına etkileri

Ferhat Aydın<sup>1</sup>

*05.08.2016 Geliş/Received, 26.10.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296829

### ÖZ

Çatı kaplama malzemeleri devamlı güneş, yağmur, kar, rüzgar, donma ve çözülme gibi atmosferik etkiler altındadır. Bu faktörlerin etkisiyle kısa zamanda deforme olabilmektedir. Bu malzemelerinin özellikle farklı sıcaklıkların etkisiyle mekanik dayanımlarında oluşan değişimlerin bilinmesi önemlidir. Çok kullanılan kiremit kaplamaların düşük ve yüksek sıcaklıklardaki dayanım kayıpları kullanıcılar açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada kiremitlerin -50, +25, +50, +100, +200, +300, +400 °C derecelerde mekanik dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Standartlara uygun şekilde hazırlanan numunelere, belirtilen ısılarda eğilme testleri yapılarak analiz edilmiştir. Artan sıcaklıkla beraber kiremitlerin dayanımının azaldığı, 400 °C’de dayanımı tamamen kaybettiği sonucuna ulaşılmıştır. Su emen ve donan kiremitlerin ise dayanımının arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kiremit, Isı, Donma, Dayanım

## Effects on roof tile mechanical strength of different heats

### ABSTRACT

Roofing materials continuously are under constant atmospheric effects such as sun, rain, snow, wind, freezing and thawing. It is very important to be known that strength loses at low and high temperatures that the roof tiles are preferred by many users. In this study, changes in the mechanical strength of the roof tiles in -50, +25, +50, +100, +200, +300, +400 °C were investigated. Flexural tests carried out on samples prepared and analysed. Strength of the roof tiles has been found to completely lose at +400 °C. It was also determined to increase the strength of water-absorbing and frozen roof tiles.

**Keywords:** Roof Tiles, Heat, Freeze, Strength

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, M8 Binası - ferhata@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çatı sistemleri yapıları yağmur, kar gibi kötü hava koşullarının etkisiyle birlikte ısınma amaçlı ısı kayıplarına karşı korumaktadırlar. Çatıların bu özelliklerini sağlayabilmesi için kaliteli konstrüksiyon, su ve nem yalıtımı malzemeler kullanılmalıdır. Çatılarda tercih edilen çok sayıda ürün ve sistem mevcuttur. Dünyada ve ülkemizde en çok tercih edilen çatı örtü malzemesi birçok avantaja sahip kilden üretilen kiremitlerdir. Kilden üretilen yapı malzemeleri insanlık tarihi ile yakın bir geçmişe sahip en eski yapı malzemeleri arasındadır. Günümüze gelinceye kadar bazı değişimler geçiren bu malzemeler üretim teknolojisinin geliştirilmesi ve üretim esnasında takviye malzemeleri ile dayanımları artırılmıştır. Kilden üretilen malzemelerin yapılar kazandırdığı doğallık ve estetik görünüm kullanım oranını artırmaktadır. Kiremitlerin en önemli fiziksel özellikleri sayılabilecek su emme ve eğilme mukavemetleri sınıflandırma açısından önemlidir. Suyu geçirmemesi ve üzerine yüklenen ağırlıklara dayanabilmesi için bu özelliklerin istenen standartlarda olması gerekmektedir [1].

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de artan nüfus ve hızlı kentleşme sonucunda inşaat sektörü hızla gelişmektedir. Her geçen gün eski yapılar yıkılıp yerine yüksek bina, metro, kanal, yol ve köprü gibi birçok yeni yapılar yapılmaktadır. Ayrıca birçok yapıda deprem gibi çeşitli doğal felaketlerde yıkılmakta veya kullanılamaz hale gelmektedir. Bu yıkılan binalara ait molozlar çevre kirliliği yapacak şekilde doğaya atılmakta veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte 2006 verilerine göre her yıl yaklaşık olarak 100 milyon adet kiremit eşdeğeri olarak çatı yenileme-aktarma maksatlı 250.000 ton kiremit çatılardan indirilmektedir [2-3]. Üretilen konutlarla birlikte ülkemizde her yıl yaklaşık 100 milyon m<sup>2</sup> kaplama malzemesi gerekirken ve bu miktarın yaklaşık yarısı yenileme ve tamir için kullanılmaktadır. Bu nedenle nitelikli malzeme ve işçilik kullanılarak çatıların imal edilmesi gerekmektedir.

Konutlarda kullanılan çatı örtü malzemelerinin yaklaşık %80'e yakın miktarında kilden üretilen kiremitler kullanılmaktadır. Kilden üretilen kiremitler doğal bir malzeme olmaları ve birçok avantaja sahip olmaları sebebiyle yoğun yağış alan bölgelerde çok kullanılmaktadır [4]. TSE 1304'ye [5] göre kiremitler görünüşü düzgün yüzeyli, çatlaklar, renk farklılıkları, köşe ve kenarlarda kırıklar olmamalıdır. Biçimleri düzgün ve dona karşı dayanıklı olmalı, kırılma yükleri 120 kg'dan büyük olmalı ve kütlece su emme oranı %13'ten fazla olmamalıdır.

Birçok kiremit çeşidi arasından Akdeniz, Granada, Alaturka ve Marsilya kiremiti en çok bilinenleridir.

Akdeniz kiremiti üretim teknolojisi ve kenetlenme kısmının farklı olması nedeniyle diğer kiremit tiplerine göre birçok yalıtım avantajlarına sahiptir [6]. Ayrıca Akdeniz tipi kiremitler kendi sınıfında ilk TS EN 1304 [5] Avrupa Standartına sahip kiremit çeşitidir. Akdeniz kiremiti bindirme kanalları sayesinde kolayca suyu tahliye edebilmekle ve su yalıtımına katkı sağlamaktadır. Akdeniz kiremiti (Şekil 1) 240x410 mm boyutlarına, yaklaşık 2950 gr ağırlığa sahip ve kenetlenme mekanizması vasıtasıyla montaj açısından çatılarda uygun bir çözüm sunmaktadır [6].

Geçmişte kiremitler üzerinde yapılan donma çözülme çalışmalarında [7-8] kiremit numunelerin gösterdikleri kırılma yükleri tespit edilmiştir. Farklı soğutma sıcaklığı ile test edilen kiremitlerin donma-çözünme sırasında tespit edilen eğilme etkisi altındaki kırılma yükleri incelendiğinde, kiremitlerinin donma-çözünme devirleri sonrasında eğilme yükü dayanımlarının düşmediği, beklenen aksine eğilme yüklerinin arttığı belirlenmiştir [7]. Kiremitler üzerinde genellikle donma çözülme etkileri üzerinde çalışmalar yapılmıştır [9-12]. Ayrıca killi malzemelerin pişirme sıcaklığı arttıkça mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştiğini bazı çalışmalar [13] göstermektedir.



Şekil 1. Akdeniz kiremiti (Mediterranean roof tile)

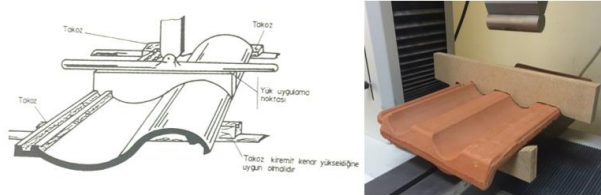
Bu çalışmada belirtilen çalışmaların dışında hem su emen ve donan kiremitlerin eğilme performansı hem de hava şartlarına bağlı yüksek sıcaklıklarda veya yangın gibi durumlarda kiremitlerin davranışı deneysel belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kiremitin sıcaklık değişikliklerinden nasıl etkilendiği deneylerle gözlenmiştir. Günlük hayatta kiremitin maruz kalabileceği en uç şartlar düşünülerek çatı kaplama malzemesi olan kiremitlerin farklı ısılardaki dayanımını incelemiştir. İlgili testler kiremitlerle ilgili hazırlanan TS EN 1304, TSE EN 538 ve TS EN 539-2'ye [5,14.15] göre yapılmıştır.

## 2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Akdeniz tipi kiremitin mevcut nem, su emme oranı, özgül ağırlık ve farklı ısılarda eğilme performansı tespit edilmiştir.

### 2.1. Metot (Method)

Kiremitlerin mevcut nem ve su emme testlerinde hassas terazi, etüv ve gerekli ekipmanlar kullanılarak hesaplanmıştır. Özgül ağırlık değerleri Arşimet prensibi kullanılarak bulunmuş, farklı ısılardaki eğilme davranışı ise 3 noktalı bilgisayar donanımlı test düzeneğine özel mesnetler imal edilerek yapılmıştır. Eğilme testlerinde her ısı için 5'er adet kiremit kullanılmıştır. Derin dondurucuda  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  derecede bekletilen kiremitler, oda sıcaklığında test edilen kiremitler ve fırında farklı sıcaklarda bekletilen ( $+50$ ,  $+100$ ,  $+200$ ,  $+300$  ve  $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kiremitler ile eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Eğilme testleri için alt mesnetler üzerinde kiremitin durabilmesi ve sabit pozisyonda kalabilmesi için üst takoz ile aynı genişlikte ahşap takozlar kullanılarak standartlara (TS EN 538) uygun şekilde yapılmıştır (Şekil 2). Oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklar için fırında bekletilen ve düşük ısılar için su emdirilmiş derin dondurucuda donmuş kiremit testi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 2. Eğilme deney düzeneği (flexural test system)



Şekil 3. Kiremitlerin ısıtılması ve donmuş kiremitlerin eğilme testi ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Heating of roof tiles and flexural test of frozen roof tile)

### 2.2. Deneysel Sonuçları (Test Results)

Test edilen akdeniz tipi kiremitlerin eğilme testleri öncesinde özgül ağırlıkları, mevcut nem durumları ve su emme oranları deneysel yöntemlerle belirlenmiştir. Kiremitlerin özgül ağırlıkları Tablo 1'de ve Su emme ve mevcut nem oranları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kiremit özgül ağırlıkları (Tile specific gravity)

Numune	Özgül Ağırlık (gr/ cm <sup>3</sup> )
1	2,19
2	2,23
3	2,21
4	2,22
5	2,22
<b>Ortalama</b>	<b>2,21</b>

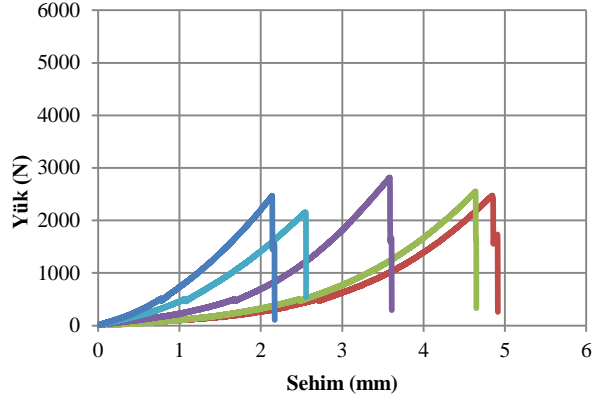
Arşimet deney düzeneğinde 5 adet kiremit parçası üzerinde yapılan testler neticesinde kiremitlerin özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. Buna göre Kiremitlerin ortalama özgül ağırlığı 2,21 bulunmuştur.

Tablo 2. Su emme ve mevcut nem oranları (Water absorption and available moisture rates)

Numune No	Su Emme Miktarı (%)	Mevcut Nem (%)
1	10,29	0,14
2	10,44	0,16
3	10,26	0,14
4	10,69	0,14
5	10,17	0,16
<b>Ortalama</b>	<b>10,37</b>	<b>0,15</b>

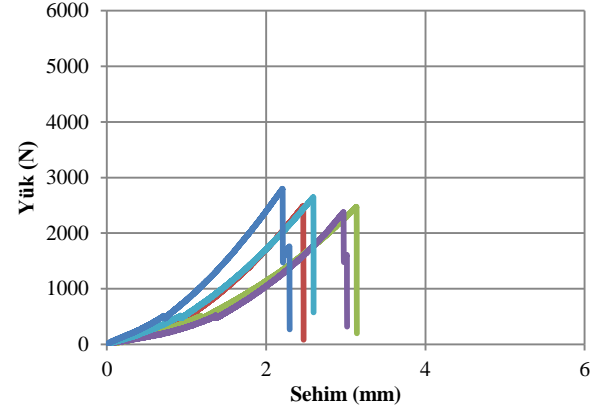
Kiremitlerin ortalama mevcut nem oranı % 0,15 ve su emme oranı ise % 10,37 olarak hesaplanmıştır. TS EN 1304'ye [kaynak] göre kiremitlerin maksimum su emme oranı %13 olarak sınırlandırılmıştır. Deneysel sonuç ortalama su emme oranı standarda uygun olduğu belirlenmiştir.

Yapılan testler sonucunda farklı ısılarda her numune türünden 5 'er adet olmak üzere eğilme testleri yapılan kiremitlerin kırılma yükleri tespit edilmiş, yük-sehim grafikleri çizilmiş ve kırılma durumları incelenmiştir.  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oda sıcaklığı ( $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda kiremitlerin üç noktalı eğilme davranışı tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında yaklaşık  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de test edilen numunelerin grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.

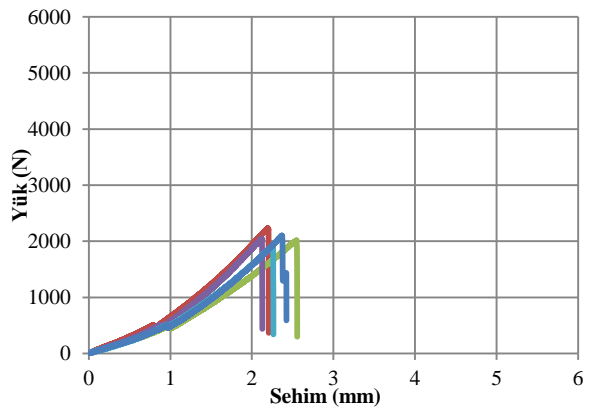


Şekil 4. Yük-Sehim grafikleri (Oda sıcaklığı) Load-deflection charts (room temperature)

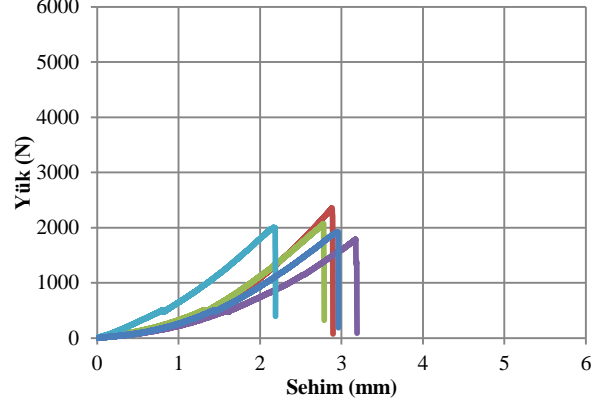
Kiremitlerin farklı sıcaklıklarda etüv ve fırında bekletilmesi sonucunda test edilen numunelerin eğilme grafikleri Şekil 4-9'da verilmiştir.



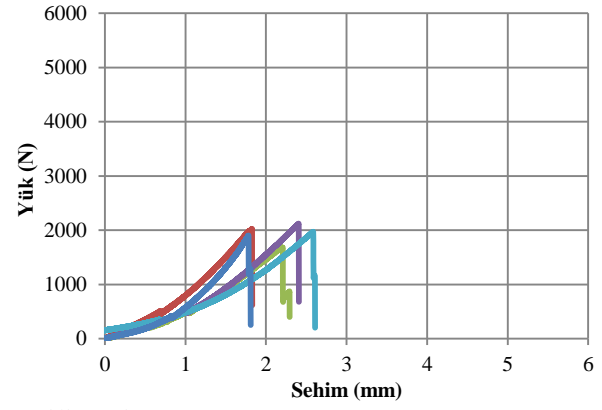
Şekil 5. Yük-Sehim grafikleri (+50 °C) (Load-deflection charts)



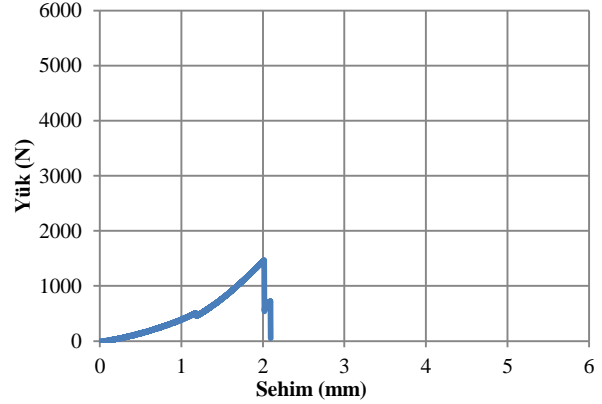
Şekil 6. Yük-Sehim grafikleri (+100 °C) (Load-deflection charts)



Şekil 7. Yük-Sehim grafikleri (+200 °C) (Load-deflection charts)



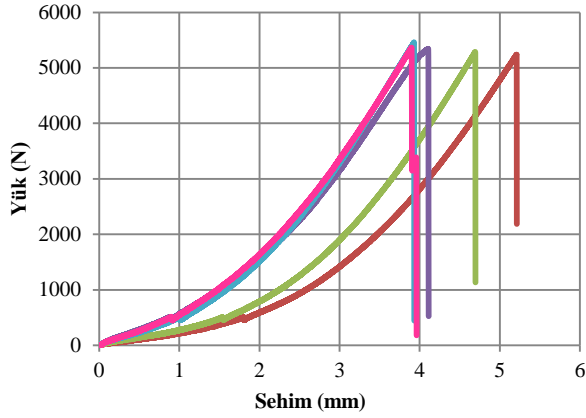
Şekil 8. Yük-Sehim grafikleri (+300 °C) (Load-deflection charts)



Şekil 9. Yük-Sehim grafikleri (+400 °C) (Load-deflection charts)

Oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda bekletilen kiremitler ile yapılan testlerde +400 C°'de 5 adet numuneden sadece biri fırından kırılmadan çıkmış, diğerleri +400 C°'lik sıcaklıkta kendiliğinden kırılmıştır. Dolayısıyla bu sıcaklıkta sadece bir numunenin grafiği elde edilebilmiştir. Tüm grafiklerde görülebilen düşük eğilme yüklerindeki grafik eğrisinde oluşan küçük kırılma üst mesnetin deney numunesi üzerine tam manasıyla oturduğu anda olmakta, gerçekte bir kırılma olmamıştır. Kiremitlerin düşük sıcaklıkta derin

dondurucuda bekletilmesi ile elde edilen donmuş kiremitler ile yapılan testlerin sonucunda çizilen eğilme grafikleri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Yük-Sehim grafikleri (-50 °C) (Load-deflection charts)

Her sıcaklık türünde 5'er adet numune ile yapılan tüm testler sonucunda ortalama eğilme yük ve sehim değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

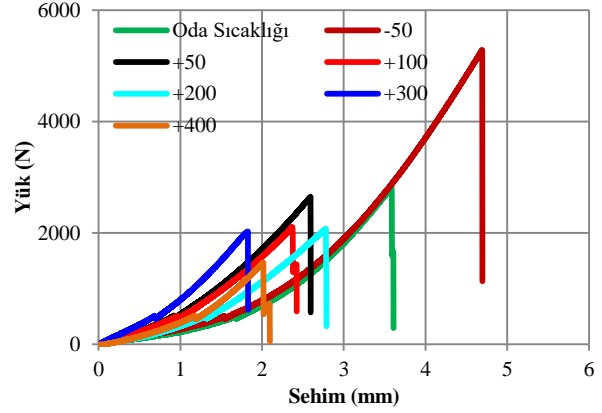
Tablo 3. Eğilme test sonuçları (Flexural test results)

Numune	Yük (N)	Sehim (mm)
-50	5339,68	4,38
+25	2493,12	3,62
+50	2557,19	2,77
+100	2065,31	3,62
+200	2030,94	2,87
+300	1939,28	2,18
+400	-	-

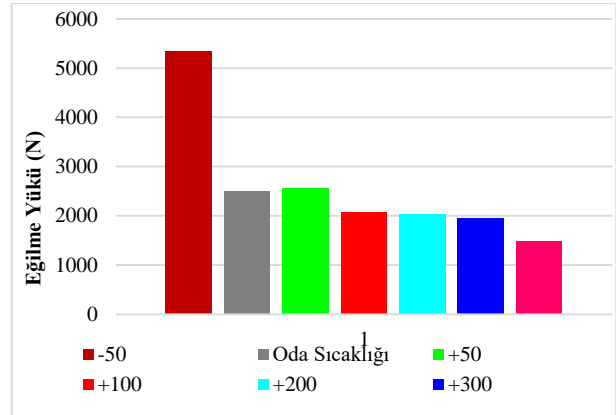
Elde edilen sonuçlara göre oda sıcaklığında kiremitler ortalama 2493,12 N eğilme yüküne sahiptir. Oda sıcaklığı referans alındığında +50 C<sup>0</sup>'de oda sıcaklığı ile çok yakın eğilme yüküne sahip olduğu belirlenmiştir. Oda sıcaklığına göre artan sıcaklıkla birlikte +100, +200 +300 C<sup>0</sup> derecelerde eğilme yükü giderek azalmıştır. +100 C<sup>0</sup>'de %17, +200 C<sup>0</sup>'de %18,5, +300 C<sup>0</sup>'de %22 oranında eğilme yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Düşük ısıda su emdirildikten sonra dondurulan kiremitlerin eğilme test sonuçlarında ise oda sıcaklığına göre yaklaşık %114 oranında eğilme yükünün arttığı belirlenmiştir. Kiremitin su emmesiyle birlikte donan suyun kiremit içerisinde kompasitesi yüksek bir malzeme gibi davranmış ve eğilme performansı büyük oranda artmıştır. Tekrarlı donma çözülme olmadığından oluşacak iç basınç etkisi gözlenmemiş ve eğilme performansına yansımamıştır. Kiremitlerin sehim değerleri incelendiğinde en yüksek sehim değerinde en

yüksek dayanımın ortaya çıktığı -50 C<sup>0</sup>'de ulaşılmış, genellikle dayanımın düşmesiyle birlikte sehim miktarı da azalmaktadır.

Tüm ısı türlerinde grubu temsil eden eğilme grafikleri seçilerek tek grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 11). Su emdirilen kiremitin dondurulmasıyla kompasitesi artan ve eğilme performansı da artarak en yüksek eğilme yüküne ulaşılmıştır. Ortalama eğilme yükleri kullanılarak karşılaştırma sütun grafiği Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 11. Farklı sıcaklıklardaki numunelerin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırması (Comparison of load-deflection charts of the samples at different temperatures)



Şekil 12. Farklı sıcaklıklardaki numunelerin eğilme yükü karşılaştırması (Flexural load comparison of samples at different temperatures)

Farklı ısılarda test edilen kiremitlerin kırılma biçimleri Şekil 13-14'te görülmektedir. Genellikle +300 C<sup>0</sup>'ye kadar uzun eksende ortadan ikiye kırılan kiremitler artan sıcaklıkla birlikte diğer eksenlerden de kırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda kiremitlerde renk değişimi yaşanmış, +400 C<sup>0</sup>'de bekletilen kiremit ve +300 C<sup>0</sup>'de bekletilen kiremit arasındaki renk değişimi Şekil 15'te görülmektedir.





Şekil 13. Donmuş kiremitlerin kırılma halleri (-50 °C) (Fracture states of frozen roof tiles)



Şekil 14. Kiremitin kırılma halleri (Fracture states of roof tiles)



Şekil 15. Yüksek sıcaklıklarda kiremitlerde renk değişimi (Color change of roof tile at high temperatures)

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Akdeniz tipi kiremitler ile farklı ısılardaki dayanımının incelemeleri çalışma sonucunda aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Akdeniz tipi kiremitlerin özgül ağırlıkları özgül ağırlığı 2,21 bulunmuştur.
- Kiremitlerin mevcut nem oranı % 0,15 ve su emme oranı % 10,37 olarak hesaplanmıştır. İlgili standartta belirtilen (TS 562) maksimum su emme oranı yani %13 değerinin altında olduğu tespit edilmiştir.

- Eğilme testleri neticesinde oda sıcaklığında kiremitler yaklaşık 2493 N eğilme yüküne sahiptir.
- Oda sıcaklığına göre +50 C<sup>0</sup>'de yakın eğilme yüküne sahip olduğu, +100 C<sup>0</sup>'de %17, +200 C<sup>0</sup>'de %18,5, +300 C<sup>0</sup>'de % 22 oranında eğilme yükü sıcaklık etkisiyle azalmıştır. +400 C<sup>0</sup>'de kiremitlerin dayanımlarını tamamen kaybettiği belirlenmiştir.
- Oda sıcaklığına göre su emdirildikten sonra dondurulan kiremitlerin eğilme yükü %114 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç su emen ve donan kiremitlerin malzeme kompozitesinin artmasıyla birlikte daha dolu bir malzeme gibi davranmasının sonucu olarak yorumlanmıştır. Bu testlerde tekrarlı donma çözülme olmadığı unutulmamalıdır. Ayrıca genellikle dayanımın düşmesiyle birlikte sehim miktarının da azaldığı gözlenmiştir.
- Farklı ısılarda test edilen kiremitlerde testler sonrasında kırılma biçimlerinin de değiştiği belirlenmiş ve +300 C<sup>0</sup>'ye kadar uzun eksende ortadan ikiye kırılan kiremitler artan sıcaklıkla birlikte diğer eksenlerden de kırılmıştır.
- Fırında bekletilen kiremitlerin yüksek sıcaklıklarda renk değiştirdiği ve yüksek sıcaklıklarda renklerinin koyulaştığı tespit edilmiştir.

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Yarar, İ.K. "Kiremitlerin Fiziksel Özelliklerinin İyileştirilmesinin araştırılması", Seramik mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2006.
- [2] Topçu, İ.B., "Yapı malzemeleri ve beton", 2006.
- [3] Demir, A " Kiremit Kırığı Agregalı Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ağustos 2008.
- [4] catikaplama.info (2016)
- [5] TS EN 1304, Çatı kiremitleri ve bağlantı parçaları - Kilden imal edilmiş - tarifler ve özellikler, 2007.
- [6] kiremitcesitleri.blogspot.com.tr (2016)
- [7] Turanlı L., "ODTÜ Erzincan Mollaköy Kiremitlerin Donma çözülme deneylerinin yapılması", Kod:2006-03-03-1-00.102, Ankara 2006.
- [8] Güreş, B. "Kiremitlerin Diğer Kaplama Malzemeleri İle Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [9] V. Cárdenes , C. Monterroso , A. Rubio , F.J. Mateos, L. Calleja (2012). Effect of freeze-thaw

- cycles on the bending strength of roofing slate tiles”, *Engineering Geology*. 129-130 91–97.
- [10] Ducman, V. Andrijana Sever Skapin, Miroslava Radeka, Jonjaua Ranogajec (2011). Frost resistance of clay roofing tiles: Case study, *Ceramics International* 37 85–91.
- [11] Iba, C, Ueda A, and Hokoia S. (2015). Frost Damage of Roof Tiles: A Study on Moisture Boundary Ind. Eng., vol. 43, no. 1, pp. 331–349, 2002. Conditions, *Energy Procedia* 78 2530-2535.
- [12] Ueda, A, Iba C and Hokoi S.:(2015). Frost damage to roof tiles: Ice distribution in freeze-thaw Experiment, *Energy Procedia* 78 2542-2547.
- [13] Esmeray, A. “Tokat Erbaa Bölgesi Yeni Kil Yataklarının Tuğla Kiremit Hammaddesi Olarak İncelenmesi” Yüksek Lisan Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1987.
- [14] TS EN 538, Çatı kiremitleri kilden yapılmış sürekli olmayan (bindirmeli)eğilme dayanımı deneyi 2000.
- [15] TS EN 539-2, Çatı kiremitleri - Kilden yapılmış - Fiziksel özelliklerinin tayini - Bölüm 2: Dona dayanıklılık, 2006.



## Delik delme prosesi: bir araştırma

Şenol Bayraktar<sup>1</sup>, Yusuf Siyambaş<sup>2</sup>, Yakup Turgut<sup>3</sup>

25.01.2016 Geliş/Received, 26.10.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.296833

### ÖZ

Delik delme işlemi, talaşlı imalat işlemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Delme işlemi esnasında, aşırı yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu, dairesellik, aksel kaçıklık ve hızlı takım aşınması gibi istenmeyen sonuçlarla karşılaşmaktadır. Bu sonuçlar, ürün kalitesinin ve üretim maliyetlerinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Buna göre, makine parçalarının birbirleri arasında hassas çalışabilmeleri ve üretimde verimliliğin artırılabilmesi için istenmeyen bu sonuçların en aza indirgenmesi gerekmektedir. Kesme esnasında oluşan ilerleme kuvveti, moment, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ile kontrol edilebilmektedir. Böylelikle, optimum kesme parametreleri belirlenerek, üretimde verimliliğin ve hassasiyetin artırılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada, farklı malzemeler üzerinde delik delme işlemi ile ilgili yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen sonuçlar bir arada sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Delik delme, İlerleme kuvveti, Çapak oluşumu, Yüzey pürüzlülüğü, Takım aşınması

## Drilling process: a review

### ABSTRACT

Drilling has important role among all machining operations. In during drilling process such as excessive surface roughness, burr formation, ovality and axial deviation with adverse results have been encountered. These results have a significant influence in determining product quality and manufacturing costs. Hence, It is necessary to minimize these adverse results in order to work on each machine part precisely and to get an increased efficiency in production. Thrust force, torque, tool wear and surface roughness can be controlled by determining the optimum cutting parameters. Thereby, using these parameters increased efficiency and accuracy in production are provided. The investigated studies which are about drilling process on different materials are presented in this study.

**Keywords:** Drilling, Thrust force, Burr formation, Surface roughness, Tool wear

<sup>1</sup> Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği - senol.bayraktar@erdogan.edu.tr

<sup>2</sup> Erzincan Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü - yusuf.siyambas@erzincan.edu.tr

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği - yurgut@gazi.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Makine parçalarının istenen verimde çalışabilmesi için, yüzey kalitesi önemli bir etkidir. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde kullanılan faktör ise yüzey pürüzlülüğüdür. Bu faktör, aşınma, sürtünme ve yağlamanın yanı sıra sızdırmazlık, hidrodinamik, elektrik, ısı iletimi gibi farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi parametreler yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilemektedir [1]. Kesme parametreleri iyi belirlenmediği durumda, yüzey kalitesinin azalmasına ve çentik etkisine sebep olarak çatlak oluşumuna, yorulma ve korozyon dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı yüzey kalitesi açısından talaşlı imalat işlemlerinin optimizasyonu önem taşımaktadır [2].

Delik delme işlemi, imalat işlemleri arasında en çok kullanılan işlemlerden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık % 33'ünü içermektedir [3,4]. Bunun yanı sıra, harcanan zamanın %25'ini delik delme işlemi oluşturmaktadır [5]. Delik delme işlemi, çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonucusudur. Mekanik üretimde, ekonomiklik açısından büyük öneme sahiptir [6]. Tornalama ve frezeleme işlemleri ile karşılaştırıldığında, kinematik ve dinamik yapısının benzer olup kesme anında talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımı aynı şekilde gerçekleşir. Ancak, delme işleminde talaş oluşumunun kapalı alanda gerçekleşmesi, talaş kontrolünü zorlaştırmaktadır. Matkap üzerinde oluşan talaş kalınlığı, talaş akışını belirleyen etkidir. Matkap ile iş parçası malzemesi arasında oluşan sürtünmeye bağlı olarak yüzeyde oluşan sıcaklığın yetersiz ve dönme ekseninde kesme hızının sıfır olması, delik delme işleminde ana problemdir. Bundan dolayı, matkap geometrisi ve malzemesinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [5, 7].

Matkap ile delme işlemi, radyal ağzın parçaya teması ile başlar ve ana kesme ağzlarının aktif kesme işlemine katılması ile devam eder. Oluşan talaş, helisel kanallar vasıtasıyla tahliye edilir. Radyal ağız, matkabın dönme ve ilerleme hareketi ile iş parçasını ezerek kesicinin ağzlamasını sağlar. Böylelikle matkabın delme eksenine paralel olacak şekilde ilerlemesini sağlar. Kesici ağız ise matkabın ilerleme hareketiyle helis bir yüzey oluşturarak, iş parçasını kesmeye başlar. Helisel yüzey boyunca hareket eden takımın kesme ağzlarının etki yönü sürekli değiştiğinden, matkabın etkili kesme açıları da değişmektedir [8].

Özellikle, havacılık sanayisindeki uygulamalarda delik yüzey kalitesi önemlidir [9]. Delik yüzey pürüzlülüğü ve çap doğruluğu, delik kalitesini belirten parametrelerdir [10]. Bu işlemden, matkap performansı ve delik kalitesinin

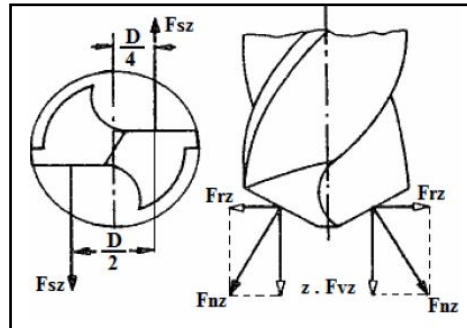
belirlenmesinde, kesme parametreleri ve matkap malzemeleri önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle, en iyi delme performansının belirlenmesi için araştırmacılar bu konu üzerine yoğunlaşmışlardır [11]. Delik delme işleminin gerçekleştirilmesi esnasında yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra çapak oluşumu, ölçü tamlığı, dairesellik ve aksel kaçıklık gibi etkenler de ön plana çıkmaktadır. Bu etkenler, kesme hızı, ilerleme, matkap geometrisi ve malzemesi, iş parçası malzemesi gibi çeşitli kesme koşullarına bağlıdır [12]. Bu kesme koşulları ise kesme kuvvetini, kesme sıcaklığını, takım aşınmasını, delik kalitesi ve talaş tipini doğrudan etkilemektedir [13]. Matkapla delik delme işleminde delik kalitesinin optimum şekilde sağlanması için bu durumun göz önüne alınması gerekmektedir. Son yıllarda, özellikle kriyojenik işlem sayesinde kesme bölgesindeki oluşan sıcaklıklar bir miktar azaltılarak delik delme işleminde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, kesme parametrelerine bağlı olarak delik delme işlemi esnasında delik kalitesini etkileyen faktörler ve bu alanda literatürde yapılan araştırmalar bir arada sunulmuştur.

## 2. DELME PROSESİ (DRILLING PROCESS)

### 2.1. Kesme Kuvveti ve Moment (Cutting Force and Moment)

Kesme kuvveti, bir malzemenin işlenebilirliğini gösteren parametrelerden biridir [14-16]. Genellikle, işleme esnasında düşük kesme kuvvetleri istenmektedir. Kesme kuvvetleri, işlenmiş yüzeyin kalitesini etkilemekle birlikte matkapların takım ömrü de etkilemektedir [17]. Kesme momentinin artması, kesici takım ile malzeme arayüzünde oluşan ısının artmasına neden olmaktadır. Kesici matkabın bir kesici ağızı dikkate alındığında, bu bölgede ilerleme kuvveti ( $F_{vz}$ ), radyal kuvvet ( $F_{rz}$ ) ve kesme kuvveti ( $F_{sz}$ ) oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kesici ucu etkileyen kuvvetler [18]. (Affecting forces to the cutting edge)

Kesici uç konumu itibarıyla her ağızda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengelemektedir. Dolayısıyla delme

işleminde  $F_{sz}$  ve  $F_{vz}$  kuvvetleri etkili olmaktadır (Şekil 1) [18]. İki ağızlı bir matkap için oluşan kesme kuvveti;

$$F_s = zF_{sz} = 2F_{sz} = d_{sz}k_s = \frac{ds}{2}k_s \quad (\text{Nm}) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $k_s$ , özgül kesme kuvvetini ifade etmektedir. İki ağızlı matkapta oluşan toplam kesme momenti;

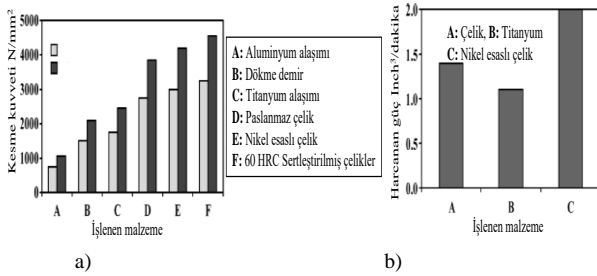
$$F_s = 2F_{sz} \quad (\text{Nm}) \quad (2)$$

$$M_s = zF_{sz} \frac{d}{4} = 2F_{sz} \frac{d}{4} = F_s \frac{d}{4} \quad \text{veya} \quad (3)$$

$$M_s = \frac{d^2 sk_s}{8 \cdot 10^3} \quad (\text{Nm}) \quad (4)$$

ile hesaplanabilir.

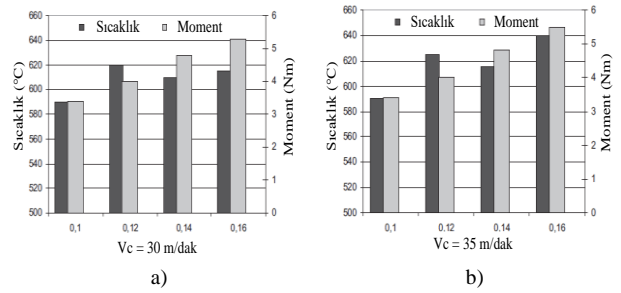
Alaşımli çelikler, alüminyum, metal veya polimer matrisli kompozit gibi farklı malzemelerin işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetleri, kesme parametrelerinin yanı sıra bu malzemelerin yapısal özelliklerinin farklı olmasından dolayı değişkenlik göstermektedir. Örneğin, [19-20]'de titanyumun delinmesinde oluşan kesme kuvvetleri alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Titanyumun işlenmesinde, takım-talaş arayüzünde oluşan temastan dolayı kesme kenarı civarında diğer metal malzemelere göre yüksek değerlerde gerilmeler oluşur [21]. Titanyumun delinmesindeki güç tüketimi, düşük sertliğe sahip çeliklerin delinmesinde harcanan güç ile yaklaşık olarak aynı veya daha düşük değerlerde olmaktadır [22]. Şekil 2.a ve b' de farklı metallere delinmesi esnasında oluşan kesme kuvveti ve güç tüketim değerleri sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2-a) Farklı metallere delinmesinde oluşan kesme kuvveti [23] (Consisted cutting forces in drilling of different metals), b) Farklı metallere delinmesinde harcanan güç [22] (Consumed power in drilling of different metals).

Kesme kuvvetleri, titreşim, yüzey hataları ve takım aşınması gibi faktörlere etki etmektedir. Araştırmacıların birçoğu, delik delme işlemi esnasında oluşan ilerleme kuvveti ve moment için matematiksel modeller

geliştirmişlerdir. Williams [24] delme işlemi esnasında, matkap ağız bölgesini esas, ikincil kesme kenarı ve matkap uç bölgesi şeklinde üç bölge olarak belirterek, talaş oluşumu ve matkabın ağızlaması ile ilgili, Zhang ve ark., [25], matkabın kesme kenarı boyunca, ilerleme kuvveti, moment ve titreşim mekaniği ile ilgili, Wang ve ark., delme esnasında oluşan talaş kalınlığına bağlı olarak dinamik kesilmemiş talaş kalınlığı arasındaki ilişkiyi belirten modeller geliştirmişlerdir. Sabit titreşim parametrelerinin yanı sıra ilerlemenin artması ile moment ve ilerleme kuvvetleri artmaktadır [26-27]. Coz ve ark [28]., Ti6Al4V alaşımının MQL (minimal quantity of lubricant) ile delinmesinde kesme hızının artması ile sıcaklık ve moment değerlerinde artış olduğunu ve bu değerlerin Zeilmann and Weingaertner [29]' in yaptığı benzer çalışmaya göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Moment değerlerindeki artış, talaş kesitinin artması ile ilişkilendirilirken, kesme hızının artması ise moment değerlerini çok fazla etkilemediğini ifade etmişlerdir (Şekil 3.a ve b).



Şekil 3. Ti6Al4V alaşımının delinmesinde oluşan sıcaklık ve moment değerleri (Consisted temperature and moment values in drilling of Ti6Al4V alloy, a) Vc=30 m/dak, b) Vc=35 m/dak [28].

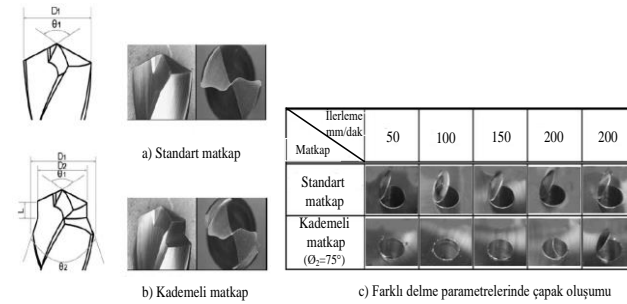
Tsao ve Hocheng, ilerleme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ilerleme oranı ve matkap çapının olduğu, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler ise ilerleme oranı ile devir sayısı olduğunu belirtmişlerdir. Taguchi deney düzeneği kullanılarak, yapay sinir ağları ile tahmini model geliştirmişlerdir [30]. İlerleme oranının artması ile iş parçası üzerinden kaldırılan talaş kesiti artar ve bu sebeple delme esnasında mekanik titreşimin artmasına bağlı olarak delme kuvvetleri artar [31-33]. Rajmohan ve Palanikumar, Al356/SiC metal matrisli karma kompozit malzemenin delinmesinde, düşük ilerleme değerlerinin kullanılması gerektiğini, ilerlemenin artması ile ilerleme kuvveti ve moment değerlerinin arttığını ve delik yüzey kalitesinin azaldığını belirtmişlerdir [34]. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde, fiber-matris arayüzünde delaminasyonun oluşumu, ilerleme kuvveti ve moment çıktıkları ile yakından ilişkilidir. Birçok yazarın [35-37] yaptığı çalışmada da sabit kesme parametrelerinde ilerleme kuvvetinin ve moment değerinin artması ile delaminasyonun arttığı belirtilmiştir.



## 2.2 Delik Kalitesi ve Matkap Geometrisi (Hole Quality and Drill Geometry)

Delme işleminde, kesme parametrelerinin yanlış seçimi, delik kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı, delme işleminde, yüzeyin hassas olarak işlenmesi için bu parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Kesme parametreleri genel olarak, kesme hızı, ilerleme, delme derinliği, matkap malzemesi, soğutma sıvısı ve çevre koşullarından oluşmaktadır [38-41]. Deng ve Chin [42], işleme şartları, delik çapı, matkap çapı, ilerleme ve devir sayısı gibi etkenleri giriş parametresi olarak dikkate alarak, delik daireselliğini Taguchi metodu ile test etmişlerdir. Panda ve Mahapatra [43], delik yüzey pürüzlülüğünün ve matkap kesici kenarında oluşan serbest yüzey aşınmasının belirlenmesi için gri tabanlı Taguchi (Gray-based Taguchi) metodunu önermişlerdir.

Delik delme esnasında, delik çıkış bölgesinde oluşan çapak, makina parçalarının kalitesini ve fonksiyonelliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Çapak, makine parçalarının birbirleri arasında çalışması esnasında güvenilirliğini ve hassas çalışma kabiliyetini en aza indirdiği için delik kalitesini belirleyen en önemli parametredir [44]. Gaitonde ve ark., delik çıkışında oluşan, çapağın yüksekliğini ve kalınlığını minimuma indirmek için çok amaçlı Taguchi (multi-objective) metodu ile optimum parametreleri 8 m/dak kesme hızı, 0.08 mm/devir ilerleme, 134° uç açısı ve 8° ön boşluk açısı olarak belirlemişlerdir [45, 46]. Diğer bir çalışmada ise matkap uç açısının çapak oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, boşluk açısının azaltılması ve büyük çapa sahip matkapların kullanılması gerektiği belirtilmiştir [47]. Ko ve ark., SM45C alaşım çeliğinin delinmesinde, 130°'den büyük uç açısına sahip standart matkap, kademeli matkaba göre kıyaslandığında, daha fazla çapak oluşumunun gözlemlendiği, 75° kademe açısına sahip kademeli matkabin, çapağı minimize edilebilmesi için ideal olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4).

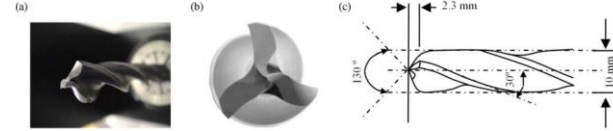


Şekil 4.a) Standart matkap (uç açısı 140°) (Standard drill-tip angle 140°), b) Kademeli matkap (step drill), c) SM45C alaşım çeliğinin farklı delme parametrelerinde çapak oluşumu [48] (Burr formation in drilling of SM45C alloy steel in different drilling parameters).

Birçok çalışmada, matkap geometrisinin çapak oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çapak boyutunun azaltılması için büyük uç açılı matkapların kullanılması

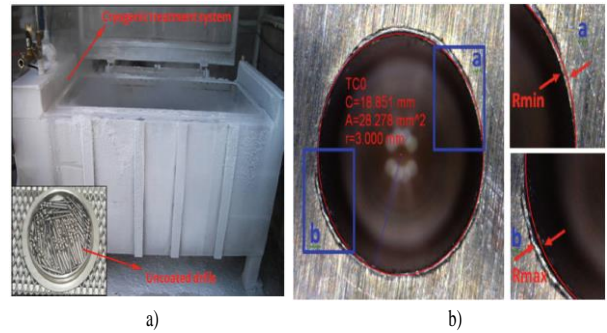
gerektiği [49], diğer bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [50].

Pena ve ark., Al 7075-T6'in delinmesinde çapak oluşumunun belirlenmesi için sinyal işleme yöntemi ile algoritma geliştirmişlerdir. Delme anında oluşan moment ile sinyaller arasında ilişki kurularak delme parametreleri belirlenmektedir. Ayrıca geliştirilen algoritma, farklı yöntemlerle kıyaslandığında, % 92 doğruluğun sağlandığı belirtilmiştir [51].



Şekil 5.a) Karbür matkap (Carbide drill), b) Matkap uc detayı (Drill tip detail), c) Matkap ölçüleri (Drill dimensions) [51].

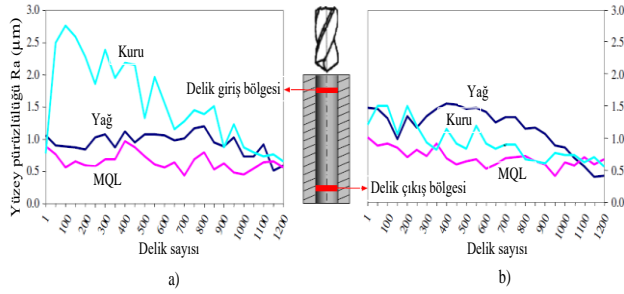
Çiçek ve ark., AISI 304 çeliğinin delinmesinde, kaplamasız HSS matkaplara uygulanan üç farklı (geleneksel ısıl işlem-CHT, kriyojenik işlem-CT, kriyojenik ve ısıl işlem-CTT) işlemin, delik yüzey pürüzlülüğü ve dairesellik hatası üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Taguchi ve RSM (Response surface methodology) optimizasyonu sonucunda, yüzey pürüzlülüğü ve dairesellik hatası üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla, ilerleme ve kesme hızı olduğunu ve matkaplara uygulanan CT işlemi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerini azalttığı için yüzey pürüzlülüğü ve dairesellik hatası üzerinde pozitif bir etki yaptığını belirtmişlerdir (Resim 1) [52].



Resim 1.a) Kriyojenik test sistemi ve kaplamasız HSS matkaplar (Cryogenic test system and uncoated HSS drills), b) AISI 304 paslanmaz çeliğin delinmesinde maksimum ve minimum yarıçap ölçüleri [52] (Maximum and minimum radius dimensions in drilling of AISI 304 stainless steel).

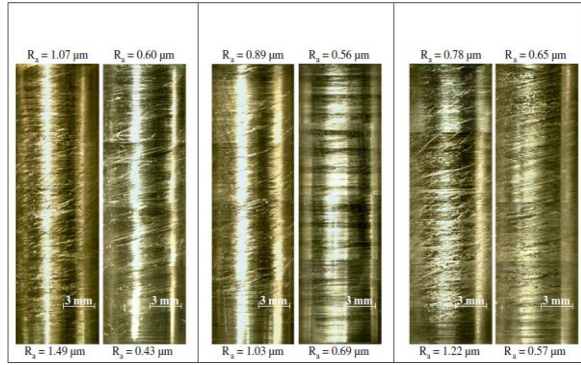
Zeilmann ve ark., TiAlN kaplamalı karbür matkap ile yaptıkları çalışmada, AISI P20 çeliğinin delinmesinde, MQL (minimum quantity lubricant-emülsiyon) miktarda yağlılama soğutma yönteminin emülsiyon (yağ) ve kuru şartlarda yapılan delme işlemlerine göre delik sayısı ve yüzey kalitesi açısından daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir (Şekil 6.a-b).





Şekil 6.a) Delik giriş bölgesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü (Consisted surface roughness in hole entry zone), b) Delik çıkış bölgesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü [53] (Consisted surface roughness in hole exit zone).

Ayrıca, MQL soğutma işleminde delik giriş ve çıkış bölgesinde oluşan, yüzey pürüzlülüğünün daha az olduğu tespit edilmiştir (Resim 2) [53].



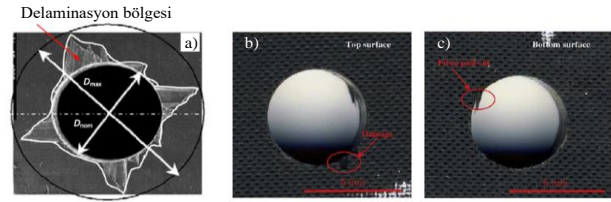
Resim 2. Farklı soğutucu tiplerine göre delik giriş ve çıkışında oluşan yüzey pürüzlülüğü ve yapısı (Consisted surface roughness and hole structure in hole entry and exit zones for different coolant types).

Kıvık ve ark, Inconel-718'in delinmesinde, TiN kaplamalı takımlarla düşük ilerlemelerde (0,05 mm/dev), kaplamasız takımlarla orta ilerlemelerde (0,075 mm/dev), TiAlN kaplamalı takımlarda ise yüksek ilerlemelerde daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Ancak, genel olarak en düşük yüzey pürüzlülük değerini, kaplamasız matkaplar ile elde edilmiştir [54].

Genellikle uzay ve havacılık sanayiinde kullanılan elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerde, birbirleri arasındaki perçinli birleştirmelerden dolayı delik delme işlemi yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin delinebilirliği ile ilgili yoğunlukla, kesme parametreleri ve kesici takım geometrisi üzerine literatürde çalışmalar yapılmıştır. Rajamurugan ve ark., cam elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde, ilerleme oranının artması ile delik girişinde delaminasyonda artış olduğu, kesme hızının azalması ile delaminasyonda azalma olduğunu belirtmişlerdir [55]. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde, fiber-matris arayüzünde delaminasyon oluşumu, ilerleme kuvveti ve moment

parametreleri ile yakından ilişkilidir. Birçok yazar [56-58] bu malzemelerin delinmesinde, delme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisinin delik yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Uygun olmayan parametre seçimi, delik yüzeyinde termal hasar, delaminasyon ve elyaf kopması gibi istenmeyen durumlara sebep olmaktadır. Bu kusurlar üzerinde delaminasyon, en önemli etkiye sahiptir. Koenig ve ark., yüksek ilerleme değerlerinde elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesi sonucu, delik çıkışında, çatlakların oluştuğunu [59], Miller ise optimum kesme şartları ile delik yüzey hasarının minimuma indirgenmesinde kullanılmak üzere veri tabanı geliştirmiştir [60].

Elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon,  $F_d = (D_{max})/D$  ile belirlenmektedir. Burada,  $D_{max}$  (mm), tabaka yüzeyinde hasar gören alanı kapsayan maksimum çap değeridir.  $D$  (mm) ise, matkap çapını ifade etmektedir.



Resim 3. Elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesi (Drilling of carbon fibre reinforced composites), a) Delaminasyonun oluşumu (Formation of delamination), b) Delik girişinde oluşan delaminasyon (Delamination forming in hole entry), c) Delik çıkışında oluşan elyaf kopması [61] (Delamination forming in hole exit).

Franke, polimer kompozitlerin delinmesinde, dairesellik ve aksel kaçıklık üzerinde kesici takım köşe yarıçapının ve iş parçası malzemesine ait elastik deformasyon özelliğinin etkili olduğunu ve köşe yarıçapının artması ile dairesellik, aksel kaçıklık ve ilerleme kuvvetlerinde artış olduğunu ifade etmişlerdir [62].

Zitoune ve ark., elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde, ilerleme değerinin artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış olduğu, ancak devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir [61]. Davim ve ark., Viapal VUP 9731 ve ATLAC 382-05 matrisli polimer kompozitlerin delinmesinde, ilerleme oranının kesme parametreleri arasında delaminasyon üzerinde sırasıyla % 63.5 ve %72.8 etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [63].

### 2.3. Takım Ömrü (Tool Life)

20.yüzyılın başından itibaren, metallere ve alaşımların talaşlı imalatında, kesme parametrelerinin takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Talaşlı imalat işlemlerinde, kesici takım değiştirme süresinin

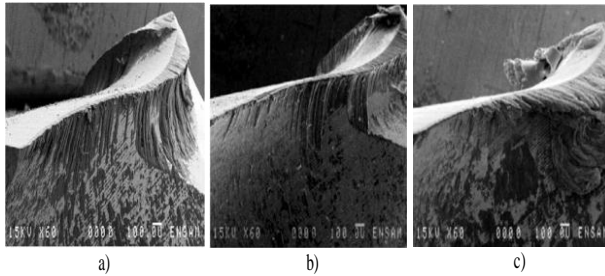
azaltılması, verimliliğin artırılması ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, takım ömrü ile ilgili oluşturulan matematiksel modeller, optimum şartların belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. 1907 yılında Taylor tarafından geliştirilen matematiksel model, takım ömrünün doğru tahmin edilmesini sağlamıştır. Bu model, takım ömrü ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi Eşitlik 5'te ortaya koymaktadır;

$$V_c \cdot T^n = C \quad (5)$$

Burada,  $V_c$  kesme hızını (m/dak),  $T$  takım ömrünü (dak),  $n$  ve  $C$  takım malzemesi, ilerleme ve iş parçası malzemesine göre belirlenen katsayıdır [64]. Bu matematiksel model, genişletilerek Eşitlik 6 elde edilmiştir;

$$V_c \cdot T^n \cdot D^x \cdot F^y = C \quad (6)$$

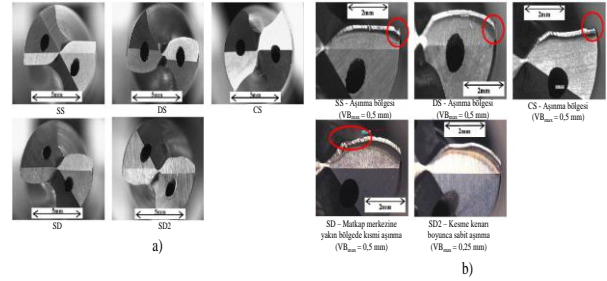
Eşitlik 6'da  $D$ , kesme derinliğini (mm),  $F$  ilerleme miktarını (mm/dev),  $x$  ve  $y$  ise deneysel olarak belirlenen katsayıdır. Üretim verimliliğinin artırılmasında takım ömrü, önemli bir role sahiptir. Dolayısı ile önemli bir ekonomik faktördür [65]. İmalatta kesme işlemlerinin ana araştırma konusunu oluşturmakla birlikte, araştırmacılar tarafından takım ömrü ile ilgili bazı değerlendirme ve tahminler yapılmaktadır. Bazı araştırmalarda, düşük kesme hızlarında abrazyondan dolayı takım aşınmasının olduğu ve kesme hızının artırılmasının kesme yüzeyinde sıcaklığın artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Bu durum, plastik deformasyon etkisi ile takım-talaş arayüzünde birincil kesme bölgesinde oluşan sürtünme ve kesme gerilmeleri ile yakından ilişkilidir. Soğutucu ve yağlayıcı akışkanlar kullanılarak kesme yüzeyinde artan sıcaklık azaltılabilmektedir. Böylelikle takım aşınması, bir miktar önlenebilmektedir [66]. Nouari ve ark., AA2024 alüminyum alaşımının delinmesinde, TiAlN+WC/C kaplanmış sementit karbür matkapların yüksek kesme hızlarında, takım ömrü açısından daha iyi performans gösterebileceği, ancak HSS matkapların kuru delme şartlarında iyi sonuçlar vermediğini belirtmişlerdir [67].



Resim 4. Karbür matkapla 70 delik delme işleminden sonra kesici kenarın görüntüsü (Image of cutting edge after the 70th drill operation with carbide drill), a) Kaplamasız karbür matkap (Uncoated carbide drill),  $V=25$  m/dak, b) TiAlN+WC/C kaplı karbür matkap

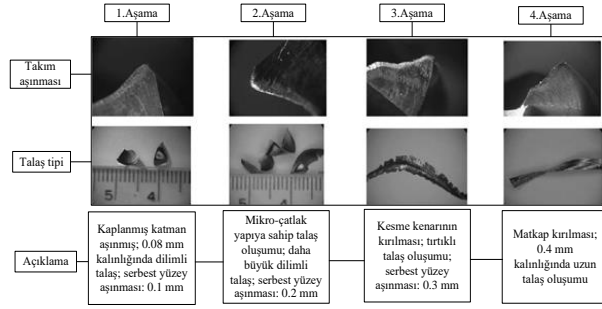
(TiAlN+WC/C coated carbide drill),  $V=65$  m/dak, c) Kaplamasız karbür matkap (Uncoated carbide drill),  $V=165$  m/dak [67].

Lin ve Ting, bakır alaşımlı malzemenin HSS matkaplarla delinmesi sonucunda oluşan kesme kuvvetlerine bağlı sinyaller yardımıyla takım aşınmasını araştırmışlardır. İlerleme, kesme derinliği ve takım aşınmasının kesme kuvvetleri üzerinde etkili olduğu, ilerleme kuvveti ve momentin artması ile takım aşınmasında artış görülmüştür [68]. Aized ve Amjad, AISI D2 malzemenin HSS matkaplarla derin delik delme işleminde, küçük gagalama değerleri ve soğutma sıvısı kullanılarak, takım ömrü ve delik yüzey kalitesi açısından daha iyi sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir [69, 70] düşük kesme hızlarında kaplama malzemesinin sertliğinden dolayı matkapların performansının arttığını belirtmişlerdir. Sharman ve ark., yaptıkları çalışmada, SS, CS ve DS takım geometrisine sahip matkaplarda oluşan aşınmanın 0,5 mm olduğunu (Resim 5.a ve b) ve SD2 (kaplamasız matkap)'ların takım ömrü açısından daha az performans sergilediği, matkaplar üzerindeki kaplamanın takım ömrü üzerinde olumlu etki yaptığını belirtmişlerdir. [71, 72]'in yaptığı çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

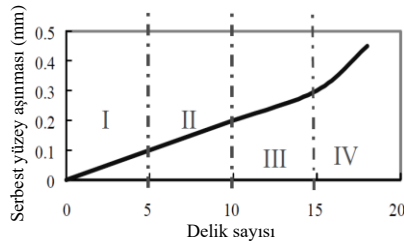


Resim 5.a) Matkaplara ait uç geometrisi (Tip geometries), b) Matkaplarda oluşan aşınma bölgeleri ve aşınma miktarı (Wear zones and amount of wear on drills) [71].

Chen ve Liao, inconel 718 süper alaşım malzemesinin TiAlN kaplanmış tungsten karbür matkap ile delinmesinde, delik sayılarına göre oluşan aşınma ve talaş tipini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmada, 2. aşamada kesici kenarda talaş yapışmasının (built-up edge) olduğu ve bunun da matkap kesici ağızında aşınmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 7-8) [72].

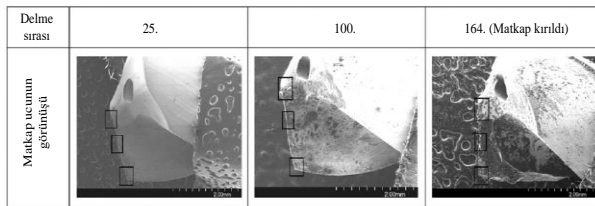


Şekil 7. Her bir aşamada oluşan takım aşınması ve talaş tipinin gösterimi [72] (Image of tool wear and burr type for each step).



Şekil 8. TiAlN kaplamalı matkaba ait serbest yüzey aşınması-takım ömrü ilişkisi [72] (Flank wear-tool life relation for TiAlN coated drill).

Cantero ve ark., [73] Ti-6Al-4V malzemenin TiN kaplamalı ISO K40 karbür matkapla delinmesi sonucunda, difüzyon aşınması ve kesme esnasında termal ve mekanik gerilmelerinden dolayı matkapta kırılmalar, Ezugwu ve Lai, [74] HSS matkaplarla Inconel 901 malzemenin delinmesinde, abrasiv, adhezyon ve plastik deformasyon aşınma mekanizmalarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Sanjay ve ark., [75] orta sertlikteki çelik malzemenin kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak HSS matkaplarla delinmesi sonucu oluşan aşınma için yapay sinir ağları yöntemi ile matematiksel model geliştirmişlerdir. Li ve ark., [76] yaptıkları çalışmada titanyum alaşımlarının delinmesinde takım ömrü açısından en iyi performansı, WC-Co spiral uçlu matkaplar ile 91 m/dak kesme hızı, 0.102 mm/devir ilerleme ve 156 mm<sup>3</sup>/sn talaş kaldırma hacmi ile elde etmişlerdir (Şekil 9).



Şekil 9. WC-Co spiral uçlu matkabın 61 m/dak kesme hızı ve 0,152 mm/dev ilerleme parametrelerinde delik sırasına göre takımın oluşan aşınmaya ait SEM görüntüsü [76] (Scanning Electron Microscope image of tool wear in 61 m/min cutting speed and 0,152 mm/rev feed rate cutting parameters for Spiral tipped WC-Co drill).

Coz ve ark., sıcaklık ölçüm sistemi geliştirerek havacılık sanayisinde kullanılan alaşım malzemelerinin delinebilirliğini araştırmışlardır. Geliştirilen ölçüm sistemi ile takım aşınmasının kontrol edilmesi, optimum kesme şartlarının belirlenmesi ve istenen yüzey kalitesi açısından sanayide kullanılabileceği belirtilmiştir [28]. Matsumura ve Obikawa [77] ve Teshima ve Shibusaka [78] matkapta oluşan serbest yüzey ve krater aşınmalarını, resim görüntüsü kullanarak sayısal veriler ile tahmin etmişlerdir. Neema ve Pande, [79] ilerleme kuvveti ve moment değerinin artması ile takım aşınmasında artış olurken, devir sayısının artması ise çok fazla etki yapmadığını belirtmişlerdir.

### 3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Delme işlemi, makine parçalarının birbiri ile montaj yapılmasında en fazla kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biridir. Bu amaçla, makine parçalarının hassas çalışabilmesi için delme esnasında oluşan çapak ve yüzey pürüzlülüğü gibi istenmeyen durumların en aza indirgenmesi gerekmektedir. Optimum kesme parametreleri belirlenerek, hassas makine parçalarının üretilmesi nispeten mümkün olabilmektedir. Buna göre literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İlerleme kuvvetini etkileyen en önemli parametrenin ilerleme hızı olduğu,
- İlerleme hızının artması ile delik yüzey pürüzlülüğünde artış olduğu,
- Çapak oluşumu üzerinde, matkap uç açısının ve ilerleme hızının etkili olduğu,
- Kademeli matkap veya uç açısı büyük olan matkaplar kullanarak çapak yüksekliğinin azaltılabileceği,
- Matkaplara uygulanan kriyojenik işlemin, ilerleme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı etkiye sahip olduğu,
- Matkaplara uygulanan kaplama işleminin sürtünme katsayısını düşürerek, yüksek kesme hızlarında delme işleminin yapılabildiği,
- İlerleme kuvveti ve moment değerlerinin artması ile matkap kesici kenarında aşınmanın oluştuğu,
- Kesici takım köşe yarıçapının dairesellik, eksenel kaçıklık ve ilerleme kuvveti üzerinde etkili olduğu,
- MQL soğutma sisteminin, matkapların takım aşınması açısından performansını arttırdığı,
- Malzeme yapısının farklı olduğu elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan delaminasyonun, kesici takım geometrisi, moment ve ilerleme kuvveti ile yakından ilişkili olduğu,
- Talaş kesitinin artması ile moment değerlerinde artış olduğu,
- Kesme hızının moment değerleri üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir.

## TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Tez Teşvik Burs'u ile sağlamış olduğu desteklerden dolayı, TÜBİTAK-BİDEB birimine teşekkür ederim.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Ö. Tekaslan, N. Gerger, ve U. Şeker, "AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması", BAÜ FBE Dergisi, 10(2), 3-12, 2008.
- [2] G. Sur, H. Çetin, E. Çevik, H. Ahlatçı and Y. Sun, "Determining the Influence of Ti Additive on Surface Roughness During Turning of AA6063 Alloy", 6th International Advanced Technologies Symposium(IATS'11), Elazığ, Turkey, 2011, pp.180-185.
- [3] W.C. Chen, and C.C. Tsao, "Cutting performance of different coated twist drills", Journal of Material Processing Technology, 88(1-3), 203-207, 1999.
- [4] H. Zhao, "Predictive models for forces, power and hole oversize in drilling operations", Ph.D. thesis, University of Melbourne, Australia, 1994.
- [5] H.L. Tonshoff, W. Spintig, and W. König, A. Neises, "Machining of Holes Developments in Drilling Technology", Annals of the CIRP, 43(2), 551-560, 1994.
- [6] R. Li, and A.J. Shih, "Finite element modeling of high-throughput drilling of Ti-6Al-4V", Transactions of NAMRI/SME, 35, 73-80, 2007.
- [7] T. Kıvak, "Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [8] M. Akkurt, "Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları", Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998, 23-90.
- [9] S.A. Basile, "Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding", Precision Engineering, 15(4), 258-265, 1993.
- [10] M.S. Roger, and V.L. Russell, "Experimental design for process settings in aircraft manufacturing. In: Statistical case studies: a collaboration between academe and industry", Society for Industrial and Applied Mathematics, 235-247, 1998.
- [11] M. Kurt, E. Bağcı, and Y. Kaynak, "Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40(5), 458-469, 2009.
- [12] E. Kılıçkap, ve M. Hüseyinoğlu, "Tepki yüzey modeli ve genetik algoritma kullanılarak AISI 316' nın delinmesinde oluşan çapak yüksekliğinin modellenmesi ve optimizasyonu", Mühendislik Dergisi, 1(1), 71-80, 2010.
- [13] P.F. Zhang, N.J. Churi, and Z.J. Pei, C. Treadwell, "Mechanical Drilling Processes for Titanium Alloys: A Literature Review", Machining Science and Technology: An International Journal, 12(4), 417-444, 2008.
- [14] K. Colligan, "New tool drills both titanium and carbon composites", American Machinist, 138(10), 56-58, 1994.
- [15] D. Kim, and M. Ramulu, "Cutting and drilling characteristics of hybrid titanium composite laminate(HTCL)", In Proceedings of Materials and Processing Technologies for Revolutionary Applications Fall Technical Conference. Seattle, Washington, 2005, 1-8.
- [16] B.K. Lambert, "Prediction of force, torque and burr length in drilling titanium-composite materials", SME Technical Paper MR79-363, 1979.
- [17] G. Meral, H. Dilipak, ve M. Sarıkaya, "AISI 1050 Malzemenin Delinmesinde Delme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Çoklu Regresyon Metoduyla Modellenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8(1), 37-46, 2011.
- [18] F. Mendi, "Takım tezgahları teori ve hesapları", Gazi Kitabevi, Ankara, 1996, 5-40.
- [19] X. Yang, and C.R. Liu, "Machining titanium and its alloys", Machining Science and Technology, 3(1), 107-139, 1999.

- [20] E.Q. Ezugwu, "Titanium alloys and their machinability-a review", *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3), 262-274, 1997.
- [21] W. Konig, "Applied research on the machinability of titanium and its alloys", In *Proceedings of the Forty-Seventh Meeting of AGARD Structural and Materials Panel*, Florence, 1979, 1-10.
- [22] J.F. Kahles, M. Field, and D. Eylon, F.H. Froes, "Machining of titanium alloys", *Journal of Metals*, 37(4), 27-35, 1985.
- [23] Anonymous(2006) Specific cutting force. Available: <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=129&pageid=2144416344>.
- [24] R.A. Williams. "A study of the drilling process", *Journal of Engineering for Industry*, 96(4), 1207-1215, 1974.
- [25] L.B. Zhang, L.J. Wang, X.Y. Liu, H.W. Zhao, X. Wang, H.Y. Luo, "Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fibre-reinforced composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(5), 641-657, 2001.
- [26] L.P. Wang, L.J. Wang, Y.H. He, Z.J. Yang, "Prediction and computer simulation of dynamic thrust and torque in vibration drilling", *Proceedings Institution of Mechanical Engineers(Part B) Journal of Engineering Manufacture*, 212(6), 489-497, 1998.
- [27] L.P. Wang, J.S. Wang, and P.Q. Ye, L.J. Wang, "A theoretical and experimental investigation of thrust and torque in vibration microdrilling", *Proceedings Institution of Mechanical Engineers(Part B) Journal of Engineering Manufacture*, 215(11), 1539-1548, 2001.
- [28] G.L. Coz. M. Marinescu, and A. Devillez, D. Dudzinski, L. Velnom, "Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys", *Applied Thermal Engineering*, 36(1), 434-441, 2012.
- [29] R.P. Zeilmann, and W.L. Weingaertner, "Analysis of temperature during drilling of TiAl4V with minimal quantity of lubricant", *Journal of Materials Processing Technology*, 179,(1-3), 124-127, 2006.
- [30] C.C. Tsao, and H. Hocheng, "Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network", *Journal of Materials Processing and Technology*, 203(1-3), 342-348, 2008.
- [31] A.I.S. Antonialli, A.E. Diniz, and R. Pederiva, "Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50(1), 65-74, 2010.
- [32] V.P. Astakhov, "Effects of the cutting feed, depth of cut, and workpiece(bore) diameter on the tool wear rate", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(7-8), 631-640, 2007.
- [33] I. Korkut, K. Yavuz, and Y. Turgut, "An experimental investigation into the machinability of GGG-70 grade spheroidal graphite cast iron", *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 16(2), 116-122, 2009.
- [34] T. Rajmohan, and K. Palanikumar, "Optimization of Machining Parameters for Surface Roughness and Burr Height in Drilling Hybrid Composites", *Materials and Manufacturing Processes*, 27(3), 320-328, 2012.
- [35] H. Hocheng, and H. Puw, "On drilling characteristics of fibre-reinforced thermoset and thermoplastics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 32(4), 583-592, 1992.
- [36] H. Hocheng, H. Puw, and K. Yao, "Experimental aspects of drilling of some fibre reinforced plastics", *Proceedings of the machining of composite materials symposium. Chicago Illinois: ASM Materials week*, 1992, 127-138.
- [37] W. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic(CFRP) composite laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), 1097-1108, 1997.
- [38] P.K.R. Rao, and M.S. Shunmugam, "Accuracy and surface finish in BTA drilling", *International Journal of Production Research*, 25(1), 31-44, 1987.
- [39] P.K.R. Rao, and M.S. Shunmugam, "Wear studies in boring trepanning association drilling", *Wear*, 124(1), 33-43, 1988.



- [40] P.K.R. Rao, and M.S. Shunmugam, "Investigation: stress in boring trepanning association machining", *Wear*, 119(1), 89-100, 1987.
- [41] M.M. El-Khabeery, S.M. Saleh, and M.R. Ramadan, "Some observations of surface integrity of deep drilling holes", *Wear*, 142(2), 331-349, 1991.
- [42] C.S. Deng, and J.H. Chin, "Hole roundness in deep-hole drilling as analyzed by Taguchi methods", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(5), 420-426, 2005.
- [43] S.S. Panda, and S.S. Mahapatra, "Parametric optimisation of multiresponse drilling process using grey based Taguchi methods", *AIMS Int. Conf, Noida, New Delhi*, 2008, 1-4.
- [44] J. Koelsch, "Divining edge quality by reading the burrs", *Quality Magazine*, 40(13), 24-28, 2001.
- [45] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, B.T. Achyutha, B. Siddeswarappa, "Taguchi approach with multiple performance characteristics for burrs size minimization in drilling", *Journal Scientific & Industrial Research*, 65(12), 977-981, 2006.
- [46] R. Jeyapaul, P. Shahabudeen, K. Krishnaiah, "Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method-a review", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(11), 1331-1337, 2005.
- [47] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, B.T. Achyutha, B. Siddeswarappa, "Taguchi optimization in drilling of AISI 316L stainless steel to minimize burr size using multi-performance objective based on membership function", *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 374-379, 2008.
- [48] S.L. Ko, J.E. Chang, and G.E. Yang, "Burr minimizing scheme in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 237-242, 2003.
- [49] S.L. Ko, and J.K. Lee, "Analysis on burr formation in drilling with new concept drill", *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 392-398, 2001.
- [50] H. Wada, and K. Yoshida, "Burrless drilling of metals", *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 66(7), 1109-1114, 2000.
- [51] B. Pena, G. Aramendi, A. Rivero, L.N.L. Lacalle, "Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque", *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 45(14), 1614-1621, 2005.
- [52] A. Çiçek, T. Kıvak, E. Ekici, "Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology(RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(2), 295-305, 2015.
- [53] R.P. Zeilmann, G.L. Nicola, T. Vacaro, C.R. Teixeira, R. Heiler, "Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5), 431-441, 2012.
- [54] T. Kıvak, K. Habalı, U. Şeker, "Inconel 718'in Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Talaş Oluşumu Üzerindeki Etkisinin Araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2), 293-298, 2010.
- [55] T.V. Rajamurugan, K. Shanmugam, S. Rajakumar, K. Palanikumar, "Modelling and analysis of thrust Force in drilling of GFRP Composites using Response Surface Methodology(RSM)", *Procedia Engineering*, 38, 3757-3768, 2012.
- [56] H. Hocheng, H. Puw, "On drilling characteristics of fibre-reinforced thermoset and thermoplastics", *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 32(4), 583-92, 1992.
- [57] H. Hocheng, H. Puw, K. Yao, "Experimental aspects of drilling of some fibre reinforced plastics" In: *Proceedings of the machining of composite materials symposium, Chicago Illinois: ASM Materials week*, 1992, 127-38.
- [58] W. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic(CFRP) composite laminates", *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 37(8), 1097-108, 1997.
- [59] W. Koenig, C. Wulf, P. Grass, H. Willerscheid, "Machining of fiber reinforced plastics", *Manufacturing Technology-CIRP Annals*, 34(2), 537-548, 1985.



- [60] J.A. Miller, "Drilling graphite/epoxy at Lockheed", *Am Mach Autom. Manufact* 131(10), 70-71, 1987.
- [61] R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet, "Study of drilling of composite material and aluminium stack", *Composite Structures*, 92(5), 1246-1255, 2010.
- [62] V. Franke, "Drilling of long fiber reinforced thermoplastics-influence of the cutting edge on the machining results", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1), 65-68, 2011.
- [63] J.P. Davim, P. Reis, C.C. António, "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(1), 1828-1833, 2004.
- [64] F.W. Taylor, "On the Art of Cutting Metals", American Society of Mechanical Engineers, New York, 1907.
- [65] S.S. Gill, R. Singh, H. Singh, "Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(3-4), 256-260, 2009.
- [66] A. Moufki, A. Molinari, D. Dudzinski, "Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(10), 2103-2138, 1998.
- [67] M. Nouari, G. List, F. Girot, D. Gehin, "Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45(12-13), 1436-1442, 2005.
- [68] S.C. Lin, C.J. Ting, "Tool wear monitoring in drilling using force signals", *Wear* 180(1-2), 53-60, 1995.
- [69] T. Aized, M. Amjad, "Quality improvement of deep-hole drilling process of AISI D2", *International Journal of Advancad Manufacturing Technology*, 69(9), 2493-2503, 2013.
- [70] S. Sharif, E.A. Rahim, "Performance of coated and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3), 72-76, 2007.
- [71] A.R.C. Sharman, A. Amarasinghe, K. Ridgway, "Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1-3), 424-432, 2008.
- [72] Y.C. Chen, Y.S. Liao, "Study on wear mechanisms in drilling Inconel 718 superalloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 269-273, 2003.
- [73] J.L. Cantero, M.M. Tardio, J.A. Canteli, M. Marcos, M.H. Miguelez, "Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V", *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 45(11), 1246-1255, 2005.
- [74] E.O. Ezugwu, C.J. Lai, "Failure modes and wear mechanisms of M35 high-speed drills when machining inconel 901", *Journal of Materials Processing Technology*, 49(3-4), 295-312, 1995.
- [75] C. Sanjay, M.L. Neema, C.W. Chin, "Modeling of tool wear in drilling by statistical analysis and artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3), 494-500, 2005.
- [76] R. Li, P. Hegde, A.J. Shih, "High-throughput drilling of titanium alloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(1), 63-74, 2007.
- [77] T. Matsumura, T. Obikawa, "On the development of expert system for selecting the optimum cutting condition", *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 58(10), 1691-1696, 1992.
- [78] T. Teshima, T. Shibusaka, M. Takuma, A. Yamamoto, K. Iwata, "Estimation of cutting tool life by processing tool image data with neural network", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 42(1), 59-62, 1993.
- [79] M.L. Neema, P.C. Pande, "The effect of magnetization on the wear of HSS steel tools", *Wear*, 59(2), 355-362, 1980.



## **Proses azaltıcı kalıp tasarımında endüstriyel bir ürünün delme ve kılavuz çekme işlemlerinin nümerik model analizi**

Mehmet Onur Yağır<sup>1\*</sup>, Osman Hamdi Mete<sup>2</sup>

*14.08.2015 Geliş/Received, 22.11.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296838

### **ÖZ**

Günümüzde işletmeler yüksek adetlerde üretim yapmayı planladığı kalıplarda mümkün olduğu kadar yeni teknolojilerin uygulandığı, işçilik ve bakım maliyetlerini düşürecek çözümler beklemektedir. Rekabet gücünü doğrudan etkileyen; kalite, hız, düşük maliyet ve iş güvenliği unsurlarını dolayısı ile rekabet gücünü ileriye taşıyan sektörlerin dünya piyasalarında tutunacağı bilinen bir gerçektir. Bu çalışma da, endüstriyel bir ürüne ait parçada üretim süreci adımlarını azaltarak, hem ürün üretim sürecini kısaltmak hem de ürün kalitesini arttırmak amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kalıplarda Proses Azaltma, Progresif Kalıplara Farklı İmalat Yöntemlerinin Eklenmesi.

## **Numerical model analysis of an industrial product, drilling and tapping operations on reducing the mold design process**

### **ABSTRACT**

Today businesses are waiting for the solutions decreasing the prices of workmanship and maintenance of the molds they will produce in many quantities and using the newest Technologies. It is known for sure that the sectors which lead quality, speed and low cost facts effecting the competition will keep existing in the market. In this study, it is aimed to shorten manufacturing process of a product and to increase product quality by reducing the manufacturing process steps of an industrial product. \*

**Keywords:** Reduction of Processes in Mold, Additional different manufacturing methods for progressive molds.

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya - meyagir@gmail.com

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya - [ohmete@sakarya.edu.tr](mailto:ohmete@sakarya.edu.tr)

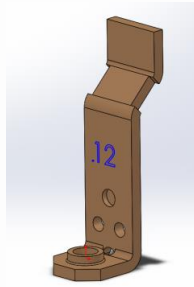
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel ürün pazarında rekabet etmenin en iyi yolu yüksek kalite standartlarını ve teknolojik işlemleri mümkün olduğunca birleştirmekle olduğu görülmüştür. Kalıpta tek bir işlemle parça üretimi, işgücü maliyetlerini düşürdüğü ve aynı zamanda parça kalitesinin artmasına yardımcı olduğu gözlenmiştir.

Aşağıda bahsi geçen kalıp yapıları için, ilk olarak mevcut üretim proseslerindeki delik delme ve kılavuz açma ile kalıp içinde delik delme- kılavuz çekme prosesleri karşılaştırılacaktır. İkinci olarak delik delme ve kılavuz çekme işlemlerinin farklı analiz programları kullanarak nümerik modelleme ile irdelenmesi hedeflenmiştir.

### 1.1. Prograsif Kalıplarda Verimlilik (Efficiency in progressive molds)

Geçmiş üretim proseslerinde her bir form verme işlemi kalıpta ayrı ayrı yapılmaktaydı. Örneğin Şekil1.1 de çevre kesme, delme ve bükme işlemi olan bir endüstriyel parça görülmektedir.



Şekil 1. Endüstriyel bir parça örneği (Example of an industrial part)

Mevcut üretim proseslerinde, Şekil 1'de verilen parça için ayrı ayrı kalıplarda aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir;

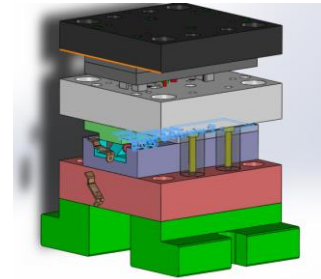
1. Çevre kesme delme
2. Bükme
3. Aparatta dış çekme

Her işlem için ayrı bir operasyonla birlikte, kişinin belli süre içinde kendisinden beklenen adetsel beklentiyi gerçekleştirebilmesi için acele etmesi, yorulması ve dikkat dağınıklığı sonucunda gerçekleşen olayları beraberinde getirir.

Üçüncü operasyonda yani dış çekme aparatında ise kişinin elinin sabit bir şekilde sürekli kullanmasını gerektirir. Bu durum ise insan anatomisine aykırı bir

durumdur. Aynı şekilde dış çekme işlemi için kullanılan aparatındaki çalışma boşlukları ve parça prosesinden kaynaklanan ölçüsel bozukluklar hatalı montaj işlemleri beraberinde getirir.

Prograsif kalıplarda her adım presin bir vuruşu kadar süre almaktadır. Böylelikle parça çok kısa bir sürede hızlı olarak üretilebilmektedir. Her vuruşta aynı anda birçok adım gerçekleşmekte ve ham malzeme ile sistem kendini sürekli beslemektedir. Parçaya ayrı bir aparatla dış çekme operasyonundan kaynaklanan ölü zamanların önüne geçilmektedir.



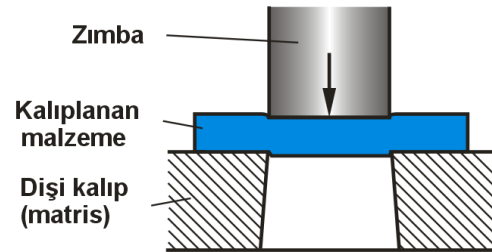
Şekil 2. Kalıp çalışma görüntüsü. (The image of the working mold.)

Çalışmada, prograsif kalıpta delme ve dış çekme sırasında parça formunda oluşan değişimler irdelenecektir. İlk olarak kesme teorisi incelendikten sonra kılavuz çekme ile işlemi için nümerik analiz gerçekleştirilecektir.

Malzeme kalıp üzerine yerleştirilip pres ile başlığa ilk hareket verildikten sonra, zımba malzeme ile temas etmekte ve malzeme üzerine basınç etkisi yapmaktadır. Malzemenin elastiklik sınırı aşıldığı zaman, plastik deformasyon meydana gelmektedir. (Şekil 3'de)

Kesme işlemi üç aşamadan oluşmaktadır;

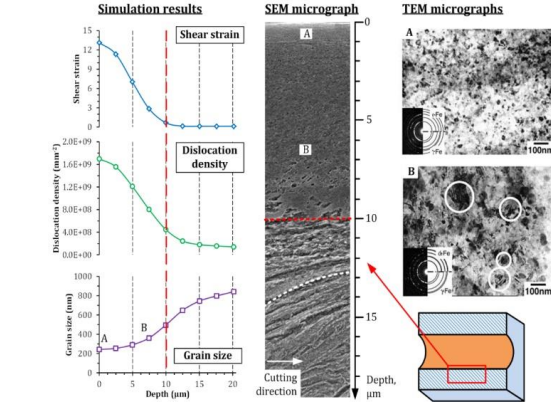
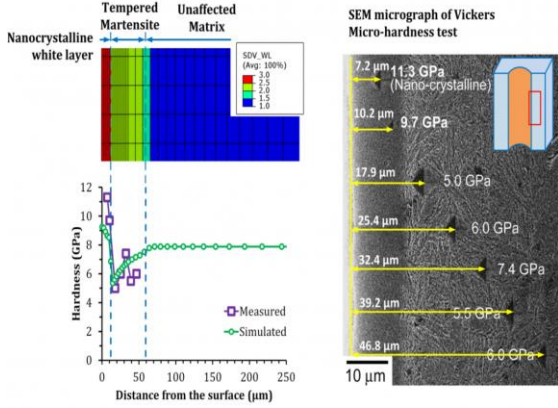
1. Plastik biçim değiştirme
2. Batma(kesilme)
3. Kırılma(kopma)



Şekil 3. Plastik şekillenme (Plastic shaping.)

### 1.1.2. Yüzey Altı Mikro Yapı (Subsurface Microstructure)

Şekil 4'te Kılavuz matkap deliğinin yüzeyine yakın SEM ile nüfus etme ve TEM mikrografik boyunca kayma, gerilme, toplam dislokasyon yoğunluğu, tane büyüklüğü simüle profillerinin karşılaştırılması görülmektedir.

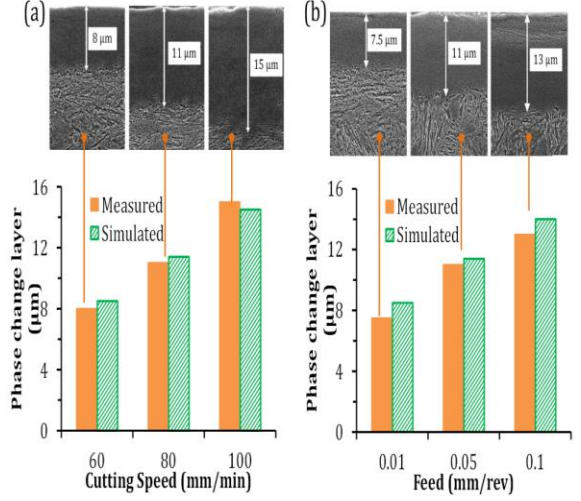


Şekil 4. TEM ve SEM analizi ile mikro yapının gösterilmesi (TEM and SEM analysis showing the microstructure)

### 1.1.3. Sertlik Değişimi (Hardness Change)

Delik yüzeyi çevresinde faz kompozisyonu ve mikrosertlik profili Simüle edilmiştir. Mikrosertlik artışı nedeniyle ciddi plastik deformasyonun üst nanokristal beyaz tabakasında olduğu tahmin edilmektedir. (Şekil 5 'te)

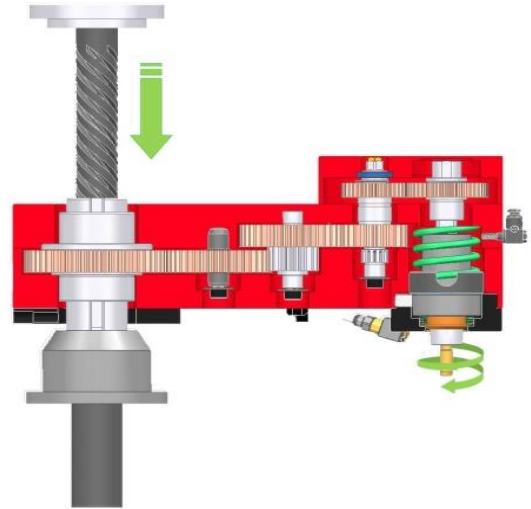
Nanokristal beyaz tabakanın kalınlığı, kesme hızı ve parça ilerleme hızı gibi farklı işlem parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir. Martenzitik yapıda ise 10-60 µm tavlama etkisinde mikro-sertlikte bir azalma olması düşünülmektedir.



Şekil 5. Kesme ve ilerleme hızına bağlı olarak mikro yapıdaki değişim (Change in microstructure due to cutting and pacing)

## 1.2 Kalıpta Mekanik Kılavuz Çekme (Mechanical Tapping in the mold)

Kalıpta mekanik kılavuz çekme işlemi için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan ilki kalıp üst plakası ile hareket eden helisel matkabın, helisel diş açılmış yatakta aşağı-yukarı hareketiyle kendisine bağlı dişli grubuna hareket aktarması ve kılavuz kalemini döndürmesidir. (Şekil 6) İkinci yöntem ise, kalıp üst plakasının kremayer dişli üzerinde kayarak, aşağı-yukarı kendisine bağlı dişli grubuna hareket aktarması ve kılavuz kalemini döndürmesidir. (Şekil 7)

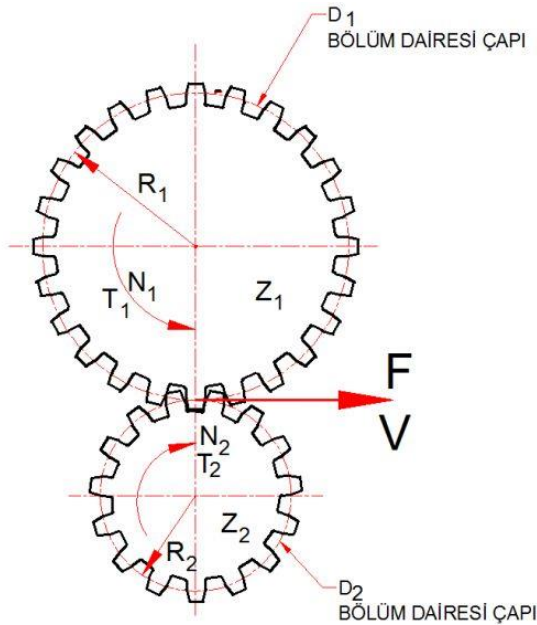


Şekil 6. Helisel matkap sistemi ile mekanik diş çekme prosesinin şematik gösterimi (Schematic representation of mechanical tapping with helical drilling system)



Şekil 7. Kremayer dişli sistemi ile mekanik kılavuz çekme yöntemi (Mechanical tapping method and rack system)

Her iki sistemde kullanılan dişliler tork ve dönme hareketini aktarmak için dizayn edilmektedirler. Dişli çifti bölüm dairesine teğet konumunda birbirlerine dokundukları için bu noktada oluşan kuvvet (F) ve çizgisel hız (V) her iki dişli için aynı kalmakta, ancak tork ve devir değerleri yarıçaplar oranında birbirinden farklı olmaktadır.



Şekil 8. İki dişli arasındaki kuvvet ve çevrim oranı ilişkisi (Force and the relationship between the two gear ratios)

$$\frac{T_1}{R_1} = \frac{T_2}{R_2} \quad (1.1)$$

aynı denklemden eşitliğin her iki tarafını aynı sayı ile çarpar veya bölersek eşitliğin değeri bozulmayacağından

$$\frac{T_1}{D_1} = \frac{T_2}{D_2} \quad (1.2)$$

elde edilir. Çevrede ki diş sayıları tam sayı olmak zorunda ve birlikte çalışacak dişlilerin diş adımları da birbirine eşit olmak zorundadır. Böylece,

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (1.3)$$

ve

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (1.4)$$

elde edilir.

- Ri : Bölüm dairesi yarı çapı (mm)
- Di : Bölüm dairesi çapı (mm)
- F : Aktarılan kuvvet (N)
- V : Çevresel hız (m/sn)
- Ti : Aktarılan tork (Nm)
- S : Diş hatvesi
- Zi : Diş sayısı

Kılavuz delik ölçüsü için aşağıdaki formüllerle temel bir hesaplama yapılabilir.

$$TD - TP = D \quad (2.1)$$

Örnek: M10x1.5 kesme kılavuzunun matkap ölçüsü, 10-1.5=8.5 olarak bulunur.

$$TD - \frac{0,975}{TPI} = D \quad (2.2)$$

Örnek: 1/4-20 kesme kılavuzunun matkap ölçüsü,

$$0,250 - \frac{0,975}{20} = 0,2013$$

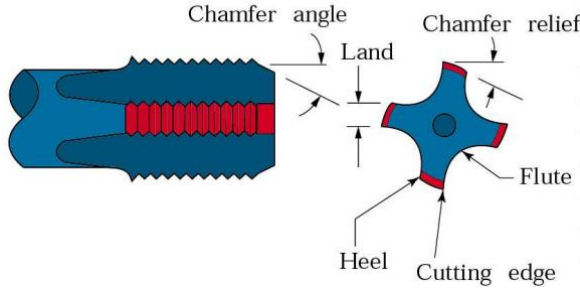
- D : Delik çapı (mm)
- TD : Vida dişli anma çapı (mm)
- TP : Diş adımı (mm)
- TPI : Diş adımı (inç)

Prograsif kalıplarda kılavuz çekilecek deliğin zımba ile delinmesi ve kılavuz çekme işlemi sırasında parça formunda oluşan değişimler aşağıda irdelenmiştir.

### 1.2.1 Kılavuz Çekme Nümerik Analizi (Tapping Numerical Analysis)

Kılavuz çekme işlemlerinde kullanılan takımlar genellikle Yüksek Hız Çeliklerinden (HSS) yapılırlar. Bununla birlikte son zamanlarda kaplamalı (TiN) kılavuz takımlarla da üretilmeye başlanmıştır. (Şekil 9'da kılavuz yapısı görülmektedir)

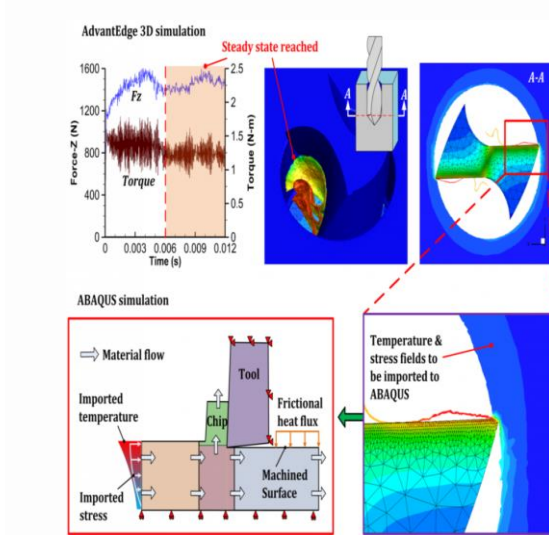




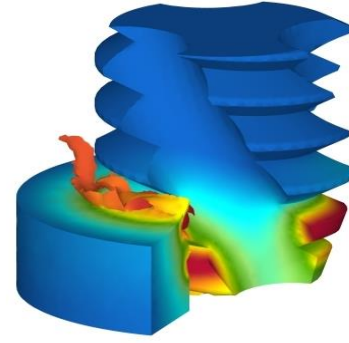
Şekil 9. Kılavuz yapısı (Guide structure)

### Kılavuz matkabı ilerleme kesiti (Guide section of drill advance)

Şekil 10'da kılavuz için açılan matkap deliğinin ABAQUS programında hazırlanan simülasyon modeli ve kılavuz çekme sırasında ilerleme kesitinin 3D simülasyonu görülmektedir. Kılavuz matkap ilerleme kesitinde kuvvet, zaman eğrisi ve kararlı duruma ulaşıldığı andaki tork değerleri grafikte gösterilmiştir. Aynı şekilde matkap ucundan A-A kesiti alınarak sıcaklık ve stres parametreleri irdelenmiştir. ABAQUS simülasyonunda sıcaklık ile stres ilerlemesinin önemli kısmının malzeme ilerlemesi yönünde olduğu ve sürtünme direncine bağlı olarak matkap ucunda ısınmanın arttığı görülmüştür.



Şekil 10. Kılavuz matkap deliğinin ABAQUS programında oluşturulan simülasyon modeli (Manual prepared in ABAQUS simulation model of the drill hole program)



Şekil 11. Diş çekme işlemindeki deformasyon görüntüsü (Image deformation in the threading process)

Aşağıdaki örnek ISO ve UTS standardı – 60° vida dişlerine uygulanmıştır.

Örnek, M8x1,25

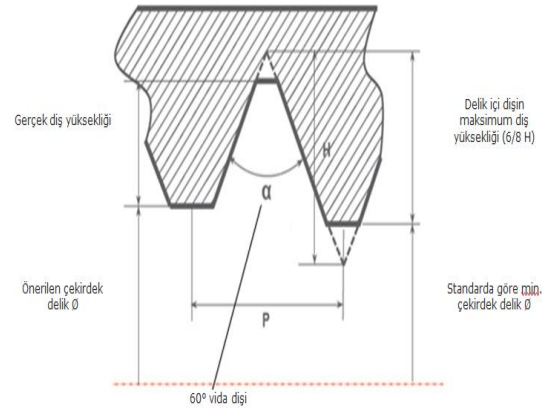
Standarta göre maksimum diş yüksekliği 6/8 H'dir.

$$H = 0.866 \times P$$

(H = Temel üçgen yüksekliği)  
(P = diş adımı)

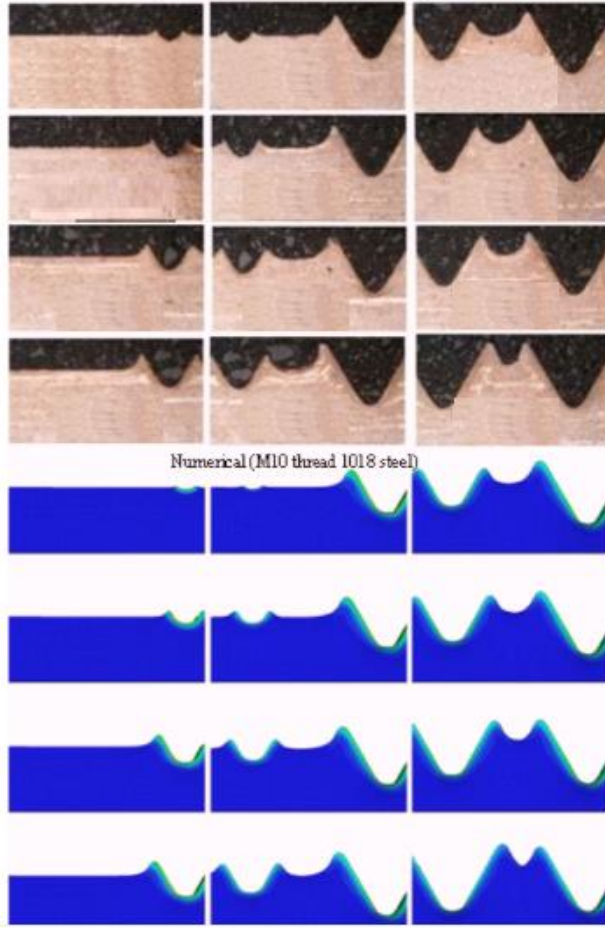
Maksimum diş yüksekliği:  
 $6/8 * (0.866 \times 1,25) = 0.811 \text{ mm}$   
 Ø 6.9 mm çekirdek deliğinin gerçek diş yüksekliği:  
 $(8 - 6,9) / 2 = 0.55 \text{ mm}$   
 Diş yüksekliği  $(0.55 / 0.81) \times 100 = \%68$  olur.

Diş çekme işleminde verilen diş yüksekliğine bağlı olarak malzeme yapısında ortaya çıkan parametreler, aşağıda verilen farklı analiz görüntüleri ve grafiklerle irdelenmiştir.

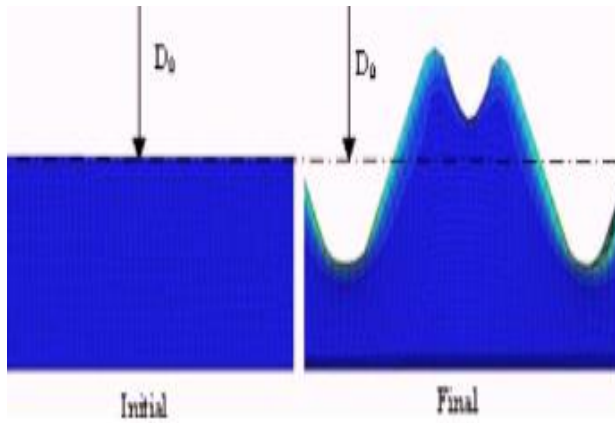


Şekil 12. Diş çekme profil açısı (Turn threading profile)

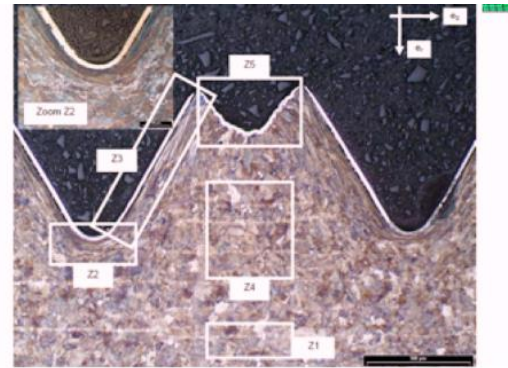
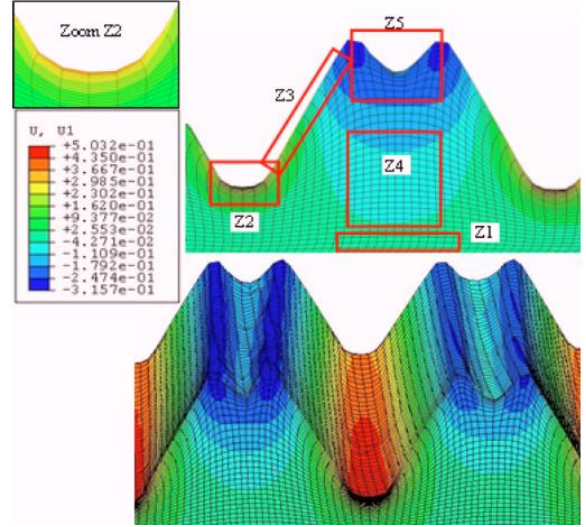




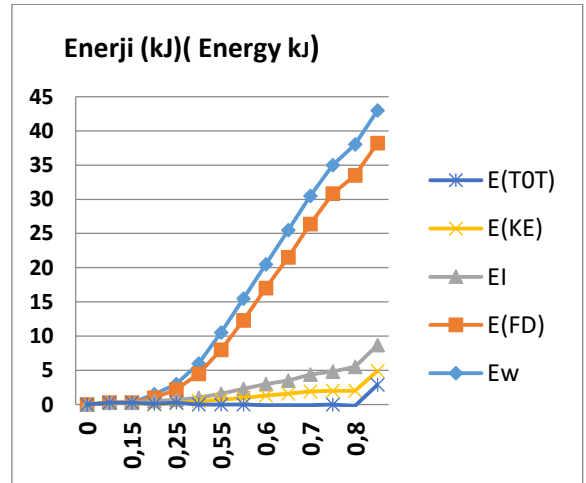
Şekil 13. Adım adım dış çekme hatvesinin gösterilmesi (Step by step demonstration of thread lead)



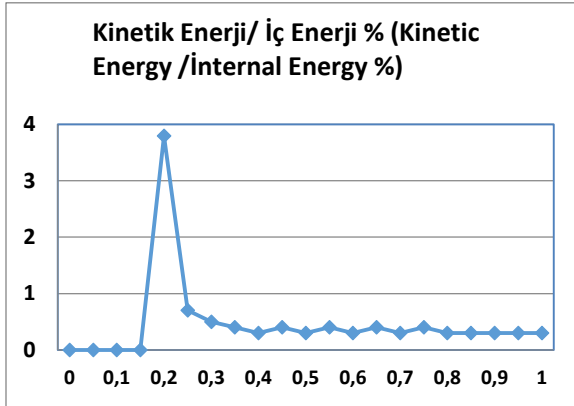
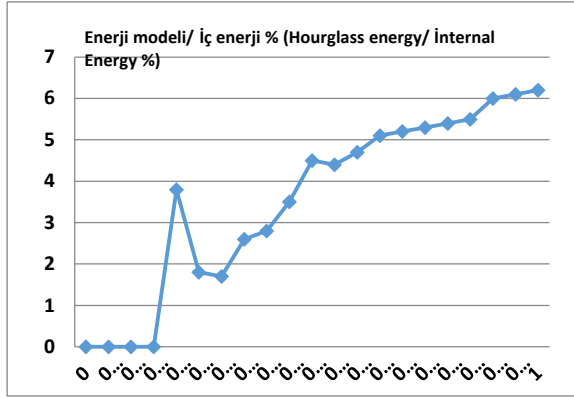
Şekil 14. Dış çekilmeden ve dış çekildikten sonraki form (Tooth extraction and tooth pulled after the next form)



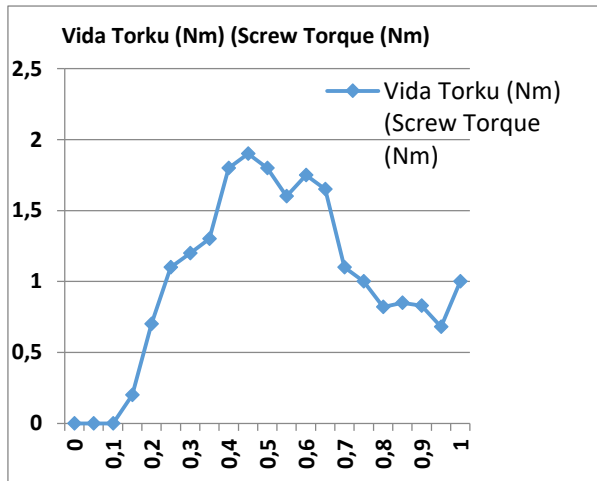
Şekil 15. Kılavuz oluşturma işlemi sırasında malzeme radyal deplasman mesh yapısı (Manual radial displacement of the mesh structure of the material during the forming process)



Şekil 16. Enerji dengesi (Energy balance) [7]



Şekil 17. İş parçası enerji modelinin enerji/iç enerji ve kinetik/iç enerji zaman diyagramları (Business part of the energy model of the energy / kinetic energy and internal / internal energy time diagrams) [7]



Şekil 18. İş parçası modelin tork-zaman diyagramı (Torque-time diagram of the workpiece model)[7]

### 1.2.2 Prograsif Kalıpta Kılavuz Ömrünü Etkileyen Faktörler (Factors Affecting The Life Of Progressive Mold Guides)

Matris ile baskı plakası arasında form verme işlemi için belirli bir kuvvetle sıkıştırılan malzemeye, zımba ile baskı uygulanarak form verme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Kılavuz çekme işlemi etkileyen faktörler;

Döndürme momenti: Kılavuzla sıvama için gerekli döndürme momenti diş ölçüsüne, delik çapına, malzemenin cinsine ve yağlamaya bağlıdır. Ayrıca, talaş kaldırarak diş açmaya kıyasla %20 daha fazla döndürme momenti gerekmektedir.

1. Kesme hızı: Sıvayarak diş formu verilirken, malzeme akışının homojen olması için kesme hızı normal diş açma işlemlerine göre yaklaşık % 120'dir.
2. Eksenel kuvvet: Kılavuzun malzeme ile ilk teması esnasında kalıp içerisindeki ve kılavuz ünitesindeki çeşitli kuvvetleri absorbe etmesi için kılavuz diş boyunun % 30 kadar belirli baskı kuvvetinde geri çekilmesi gerekir.
3. Delik çapı: Normal diş açma işlemindeki diş yüksekliğine oranla daha derin dişler açılabilir.
4. Yağlama: Metallerin soğuk şekillendirilmesi için yüksek kuvvetler gerekir. Bu da yüksek sürtünme kuvvetlerini ve ısıyı ortaya çıkarır. Her bir kılavuz çekme işleminde döndürme momentinin düşürülmesi, kaliteli ve düzgün diş formunun elde edilebilmesi için ilave düzenli yağlamaya ihtiyaç vardır. Düzenli yağlama ve yağın tipi kılavuz ömrünü etkileyen önemli faktörlerdendir.

## 3. Sonuç ve Öneriler (Results and Recommendations)

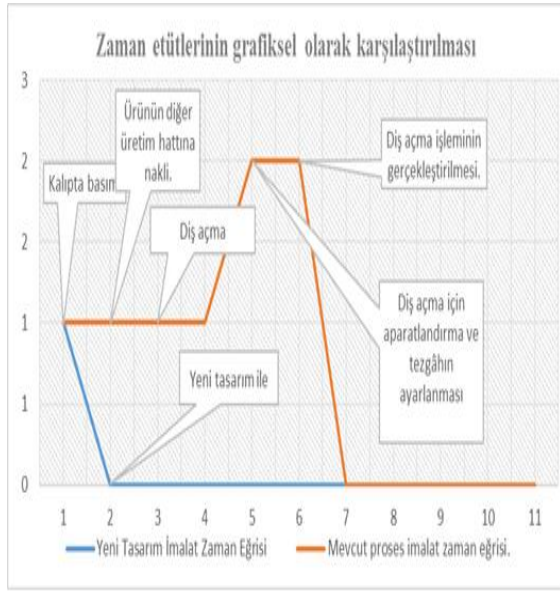
Prograsif kalıp; birden çok operasyonu ve işlemi, sırayla tamamlamak için; içerisinde malzeme şeridinin ilerletildiği kalıplardır. Prograsif kalıp, imalatı istenen ürün üzerinde yapılması gereken birden fazla operasyonun aynı kalıpta gerçekleştirilmesi işlemidir. Bu kalıplar insan gücünü azaltmak amacıyla üretilen kalıplardır. Bu sayede hata oranı da minimize edilecektir. Endüstriyel ürün pazarında rekabet gücünü de düşündüğümüzde aşağıda sıralanan nedenlerle prograsif ve prograsif kalıplarda birleştirilmiş kalıpların tercih edildiği anlaşılmaktadır.

1. Kalite,

2. Hız,
3. Düşük maliyet
4. İş güvenliği

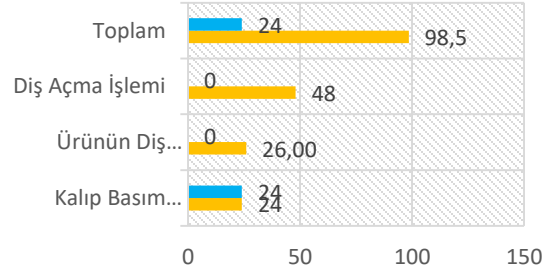
Grafik 1’de, seçilen örnek parça için eski yöntem ve birleştirilmiş kalıp ile imalatına ait zaman etütü ve maliyet grafikleri karşılaştırılmıştır.(Tablo1, Grafik1, Grafik2 ve Grafik3) Grafiklerden ve Tablo1’den anlaşılacağı üzere proses birleştirici kalıpta süre %87,5 ve maliyet %75,6 düşmektedir.

Tablo1. Maliyet bazında karşılaştırma



Grafik 1. Zaman etütlerin grafiksel gösterimi (Graphical representation of time study)

### On bin adet parça üretimi işçilik maliyeti



	Kalıp Basım İşlemi	Ürünün Dış Açma Tezgahına İletilmesi	Dış Açma İşlemi	Toplam
Yeni Tasarım	24	0	0	24
Mevcut Proses	24	26,00	48	98,5

Grafik 2. Parça üretim adımları ve zamanları (Part of the production steps and time)

M.O. Yağır ve O.H. Mete / Proses azaltıcı kalıp tasarımında endüstriyel bir ürünün delme ve kılavuz çekme işlemlerinin nümerik model analizi

Grafik 3. İşçilik maliyetlerinin karşılaştırılması. (A comparison of labor costs)

Prograsif kalıpta kalıbın bir baskısı ile tek seferde elde edilen parça formlarında kullanılacak delme ve kılavuz çekme işlemleri nümerik analiz yöntemleri ile irdelenmeye çalışılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Kılavuz deliği delme işleminde yüzey altı mikro yapı incelendiğinde yüzeyden parça merkezine ilerledikçe sertliğin azaldığı, malzeme ilerleme hızına bağlı olarak sürtünme direnciyle birlikte malzeme ısının arttığı Şekil10'daki analiz görüntüsünden okunmuştur. Bu nedenle kalıp delme zımbası seçiminde ısıl dayanımı ve sürtünme direnci yüksek malzeme seçilmesi ürün kalitesi ve bakım gereksiniminin azaltılması açısından tercih edilmelidir.
2. Kılavuz çekme işleminden sonra parçaya ait analiz grafiklerden aşağıdaki durumlar okunmuştur:
  - a. Sürtünme direncine bağlı olarak sıcaklık artışı gözlenmiştir(Şekil 10).
  - b. Sıcaklık ilerlemesinin büyük bölümü malzeme ilerlemesi yönünde olmuştur(Şekil 10)..
  - c. İç enerjinin 0,15 zaman skalasından sonra logaritmik olarak %40 seviyelerinden başlayarak arttığı görülmüştür(Şekil 16)..
  - d. 0,15-0,25 zaman aralığında kinetik enerjinin %40 lara çıktığı daha sonra %0,5 seviyelerine indiği görülmüştür(Şekil 16)
3. (Tablo1, Grafik1, Grafik2 ve Grafik3) Grafiklerden ve Tablo1'den anlaşılacağı üzere proses birleştirici kalıpta süre %87,5 ve maliyet %75,6 düşmektedir

	Tek Parça Üretiminde Gerçekleştirilen Adımlar ve Zaman Dağılımı			On Bin Adet Parça Üretim Zamanı		On Bin Adet Parça Üretimi İşçilik Maliyeti	
	Yapılan İşlem	Geçen süre (sn)	Ölü zaman (sn)	Geçen süre (sn)	Ölü zaman (sn)	Parça başına (TL)	On bin parça üretimi (TL)
Mevcut Proses	Kalıp Basım İşlemi	1	0	10.000	0	0.0024	24
	Ürünün Diş Açma Tezgâhına İletilmesi	5	5	50.000	3.000	0.0005	26,50
	Diş Açma İşlemi	2	0.5	20.000	5.000	0.0024	48
	<b>Toplam</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>80.000</b>	<b>8.000</b>	<b>0.0053</b>	<b>98,5</b>
Yeni Tasarım	Kalıpta Basım İşlemi	1	0	10.000		0.0024	24
	Diş Açma İşlemi Kalıp İçindedir.	0	0	0	0	0	0
	Diş Açma İşlemi.	0,0001	0	1	0	0	0
	<b>Toplam</b>	<b>1,0001</b>	<b>0</b>	<b>10.001</b>	<b>0</b>	<b>0.0024</b>	<b>24</b>

**KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] Federal Elektrik Yatırım ve Ticaret A.Ş., Kalıp tasarımları, 2000.
- [2] Federal Elektrik Yatırım ve Ticaret A.Ş., Kalıphane bölümü dökümanları, 2000.
- [3] İsmail Hakkı Özden, Dr. Gökhan Başman /Sac şekillendirme kalıp preslerinde sac yağlama otomasyonu tasarımı/ <http://docplayer.biz.tr/28382062-Sac-sekillendirme-kalip-preslerinde-sac-yaglama-otomasyonu-tasarimi.html>
- [4] Kurşunel Kalıp Yönetim Kurulu Üyesi Nuran Kurşunel/ST. Sac İşleme Teknolojileri Dergisi/<http://www.haberortak.com/Haber/Sac-Isleme/11082010/Progresif-kaliplarla-insan-gucu-olmadan-parca-uretilebiliyor.php>.
- [5] <http://wildeanalysis.co.uk/fea/software/deform/deform-3d-suite/machining>

- [6] <http://www.tasarimdanimalata.com/gecme-toleranslari/>.
- [7] <http://www.muhendislikbilgileri.com/>
- [8] Florestan Mathurin, Jean Guillot, Pierre Stéphan, Alain Daidié, 3D Finite Element Modeling of an Assembly Process With Thread Forming Screw, AUGUST 2009, Vol. 131 / 041015-  
[www.ukub.org.tr](http://www.ukub.org.tr) sitesinden alıntıdır.
- [9] Sami Ataşımşek/ Saç Metal Kalıpcılığı/1977 Mart
- [10] İ. Uzun ve Y. Erişkin/ Saç Metal Kalıpcılığı/ Milli Eğitim Basım Evi 1985
- [11] Osman Okka/ Mühendislik Maliyet Hesapları/ Nobel Dağıtım, 2006
- [12] J. R. Paquin, Çevirmen: Coşkun Kırmızı/ Kalıp Yapım ve Çiziminde Temel Kurallar/ Atlas Kitabevi 1987

## İstanbul-Atakent bölgesi (batı kısmının) yeraltı yapısının araştırılması ve modellenmesi

Ersin Dağ<sup>1\*</sup>, Ayhan Keskinsezer<sup>2</sup>

20.09.2016 Geliş/Received, 15.11.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.296993

### ÖZ

Bu çalışmada, İstanbul-Atakent bölgesinde daha sonra yapılması planlanan mühendislik yapıları öncesi, zemin özellikleri ve yer hareketleri nedeniyle doğabilecek olan problemlere karşı alınması gereken tedbirler amacıyla yer altı yapılarının modellenme çalışması gerçekleştirilmiştir. Sondaj kuyularından elde edilen malzeme bilgileri ve litolojik kesit doğrultuları Ceylan Formasyonu, Danişmen Formasyonu ve Çekmece Formasyonu üzerindedir. Çalışmalarda jeofizik yöntemlerden çoklu elektrot yöntemi ile çok kanallı yüzey dalgası analizi (MASW) yöntemi uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar sondaj kesitleri ile karşılaştırılmıştır. Jeofizik yöntemlerden elde edilen özdirenç değişimleri, sismik ortamlar ve mevcut topografyada varlığı görülen derelerin izleri 2B ve 3B grafiklerde işaretlenmiştir. Tüm sonuçların uyum içerisinde olduğunun tespitinden sonra inceleme sahasının yeraltı modellemesi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sondaj Kuyusu, Yüzey Dalgası Analizi, MASW Yöntemi, Elektrik Özdirenç, Modelleme

## İstanbul-Atakent region (the western portion) the underground investigation and modelling

### ABSTRACT

In study, the prior engineering structures planned to be done later in İstanbul-Atakent region, a modeling study of underground structures has been carried out for the purpose of to be taken against the problems that may arise due to soil properties and ground movements. Material information obtained from drilling wells and line sections are on the Ceylan Formation, Danişmen Formation and Çekmece Formation. Multiple electrode method from geophysical methods and Multi-channel surface wave analysis methods were used in the studies and obtained results were compared with the drilling sections. The resistivity changes obtained from geophysical methods, traces of seismic environments and existing skies of existing topography, it is marked in 2D and 3D graphics. Underground modeling of the examination area was made, after the determination that all the results are in accordance.

**Keywords:** Drilling Wells, Surface Wave Analysis, MASW Method, Electrical Resistivity, Modelling

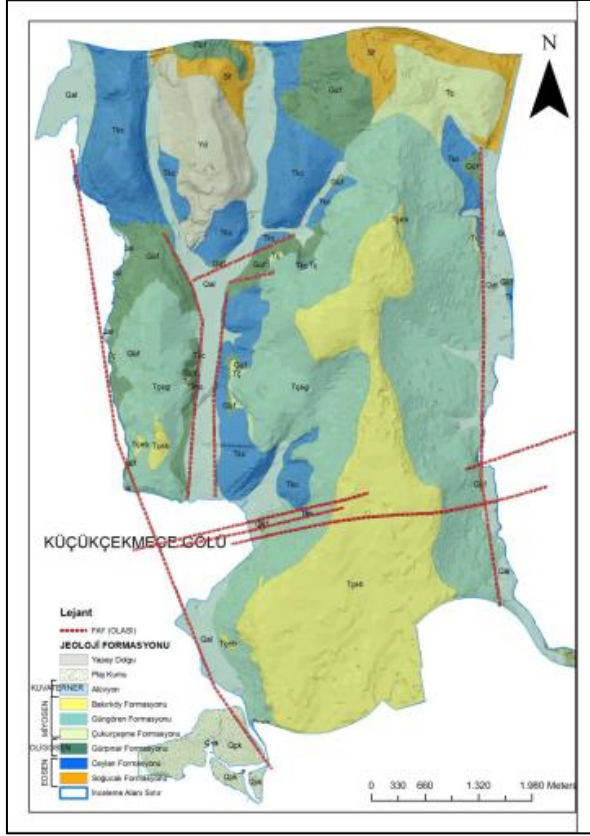
\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Sakarya - ersindag1989@hotmail.com

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Sakarya - ayhank@sakarya.edu.tr







Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası (İ.B.B. 2007'den değiştirilerek) (Geology map of the study area) [3].

Danişmen Formasyon'u Trakya'da akarsu, ova, göl ve bataklık ortamlarında temsil edilmektedir. Yüksek oranda kumtaşı, çakıltası ve miltaşı arakatlı, kiltası ve şeyllerle temsil edilir [1]. Formasyon toplamda beş üyeye ayrılmaktadır ve bunlardan sadece Gürpınar Üyesi inceleme sahasımızda gözlemlenmiştir [2]. Küçükçekmece gölünde batı kısımlarda ve kuzeyde gölün iki tarafında, yüksek oranda vadi tabanında ve yamaçlarda açığa çıkarak kendini göstermektedir. Gürpınar Üyesi gevşek kumtaşı ile miltaşı ara katlı kiltası-şeyl türü kırıntılardan meydana gelmektedir. Egemen kaya türü ince kum-mil ara katlı kil-kiltasıdır. Taze halinde kiltası morumsu, yeşil-koyu kül rengine, ayrılmış halinde boz-açık kül rengine sahiptir. Gürpınar Üyesi Üst-Miyosen yaşlıdır [1][2].

Çekmece Formasyonu İstanbul'un batı yakasında Marmara denizi kıyıları ile Karadeniz kıyıları arasında bulunmaktadır. Formasyon'da en altta kum, üstünde ise kil-mil-kum-kireç bulunur. Formasyonu'nun egemen kaya birimi kireçtaşlarıdır [1]. İnceleme sahasımızda ise Çekmece Formasyonu'nun Güngören Üyesi gözlemlenmiştir. Üye kum-mil arakatlı killerden oluşmaktadır. Üye'de egemen birim cinsi yeşil renkli killerdir. Üye'ye ait net kesitler Küçükçekmece gölünün doğu kısımlarında, Avcılar ve Firuzköy sınırlarında

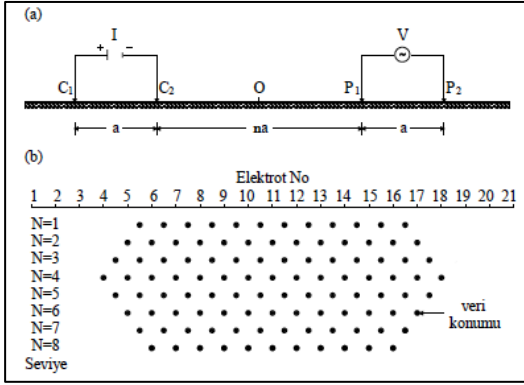
görülmektedir. Denizel ortam, göl veya bataklığı ifade etmektedir. Orta sertliğe sahip ve şişmeye duyarlı pekişmiş vaziyette ve Üst Miyosen yaşlıdır [1][2].

İnceleme sahasının da içerisinde yer alan bölge, yapılaşma bakımından son derece aktiftir. Bu nedenle çeşitli inşa ve alüvyon düzlüklerin doldurulması gibi kaynağı çokta bilinmeyen yapay zemin durumuna gelmiş dolgular bölgede yaygın durumdadır. Kalınlıklarının 3 ile 5 m'den yer yer 10 ile 40 m'lere kadar değiştiği ve hatta bazı bölgelerde bu rakamlarında üzerinde olduğu bilinmektedir. Tarihsel etkininde sebebiyet vermesi sonucu düzensiz yapıya kavuşmuş ve doğal zeminden ayırt etmek oldukça güçleşmiştir. İnceleme sahasında da olduğu gibi killerden oluşmaktadır ve içeriğindeki tuğla parçacıkları, moloz vb. unsurlar sayesinde ayırt edilebilmektedir.

### 3. YÖNTEMLER (METHODS)

#### 3.1. Çoklu Elektrot Sistemi (Multi Electrode System)

Son zamanlarda, gelişen elektronik ve bilgisayar biliminin evrimi, seçilen bir doğrultuda sondaj-profil ölçüsü elde edilmesine imkan verecek şekilde otomatik olarak değiştirilebilen çok elektrotlu öz direnç ölçü sisteminin geliştirilmesine neden olmuştur. Toplanan ölçüler sonucu ulaşılan görüntüye (yani görünür öz direnç yapma kesitine) bir ters çözüm algoritması uygulanarak doğrultu boyunca belirlilerin derinliğe bağlı öz direnç değerleri hesaplanır [4]. Bu şekilde toplanan ölçüler sistematığı sondaj ve profil ölçü alma şeklinin birleştirilmiş hali olarak da yorumlanabilir. Belirli aralıklarla seçilen bir hat üzerine sıralanmış DES istasyonları gibidir. Bu şekilde tasarlanan ölçü alma tekniği sayesinde yatay ve düşey doğrultudaki mevcut öz direnç değişkenlikleri hakkında veriler elde edilebilir (Şekil 3). Eskiden beridir kullanılan standart tek kanallı ya da analog cihazlarla bu ölçülerin toplanması fazlaca zahmetli ve meşakkatli olacaktır. Bu nedenle çok kanallı ya da çok elektrotlu prensibe uygun sistemler tercih edilmelidir. Böylece oluşturulan ölçü alma sistemlerinde kullanılan elektrotlar eşit aralıklarla bir doğrultu boyunca yerleştirildikten sonra, ölçü alma cihazının yönetiminde olduğu sisteme bağlanır ve verilerin toplanmasına başlanılabilir. Bu yöntemle sahadan toplanan görünür öz direnç verileri, yatay ekseninde doğrultu boyunca dizilen elektrotların koordinatları ile düşey ekseninde de derinliğe bağlı akım elektrotlarının uzaklığına göre ölçeklenen verilerin konumlarına ait olana değerler konturlanarak görünür öz direnç kesitleri oluşturulur [5].

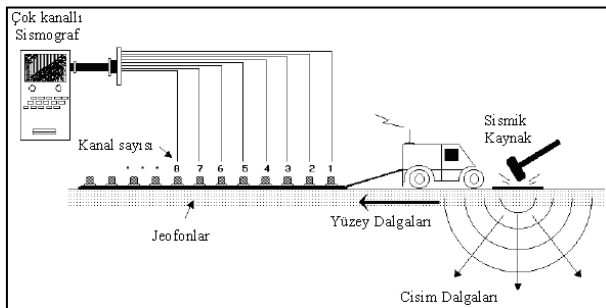


Şekil 3. Dipol-dipol elektrot diziliminde derinlik saptanması (Depth detection dipole-dipole of the electrode in lineup) [6]

### 3.2. Yüze Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (Multi Channel Analysis of Surface Waves)

Yüze dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi, sıg mühendislik çalışmalarında son yıllarda tercih edilen yöntemler arasında yerini alan yüze dalgalarının spektral analiz yöntemi (SASW)'nin yanıt veremediği yerlere ışık tutmak amacıyla geliştirilen ve kullanılan bir yöntemdir. Yüze dalgalarının çok kanallı analizi ile çalışılırken balyoz, ağırlık düşürme, gun vb. aktif kaynaklı yöntemlerin yanı sıra doğal kaynaklı pasif dinleme yöntemi de kullanılabilir. (Şekil 4.). MASW yöntemi, Rayleigh dalgasının tabakalı olan yarı sonsuz yer küre modelinde yayılması ve S-dalga hızının belirleyici etkisine dayanan, bu şekilde de faz hızlarından S-dalgası hız profillerinin elde edildiği yöntemdir [7].

MASW yönteminde veri-işlem akış yolu sırasıyla, araziden elde edilen yani toplanan yüze dalgaları, faz hızı - frekans dönüşümü bir başka deyişle dispersiyon eğrisinin elde edilmesi ve S-dalgasının ters çözüm işlemine tabii tutulmasıdır. Burada sinyal/gürültü oranı dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır çünkü Vs hızının doğru şekilde bulunabilmesi için, sinyal/gürültü oranının yüksek olduğu, yerleşim yerlerinden uzak olacak alanlarda gürültü olabildiğince minimumlaştırılır.

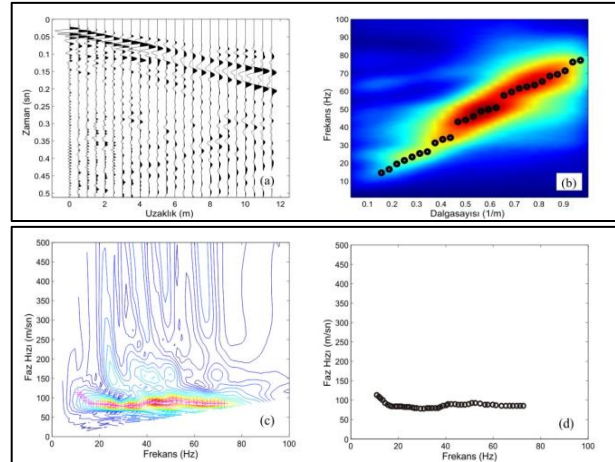


Şekil 4. Çok kanallı yüze dalgasının veri toplama düzeneği (Data acquisition mechanism of the multichannel surface wave) [8].

MASW yönteminde kaynak ile alıcılar aynı doğrusal doğrultuda dizildikten sonra çok kanallı sismik kayıtların

alımı kısmına geçilir. Kaynak ve alıcı aralığı ile ofset uzaklıklarına, elde edilmek istenen ground roll sinyallerinin kalitesini artırmak için dikkat edilmelidir [9]. Bu şekilde elde edilen saha kayıtlarının atış noktalarındaki değişik frekansları kullanılarak faz hızı hesaplamaları yapılmaktadır. Böylece verilerin frekansa ait faz hızları yani dispersiyon eğrileri elde edilmiş olur. Yer tepkisinin özelliklerine göre Rayleigh dalgasının dispersiyon eğrisi ile S dalgası hızı arasında bağ kurulur. Kurulan bu bağ sonucu ortaya çıkan ilişkinin birinci kısmı türev analizinden yüze dalgalarının yaklaşımı ortaya çıkar. Seçilen frekans aralığında, Rayleigh dalgasının dispersiyon eğrisi için tabakalı ortamlarda; P dalgası hızı, S dalgası hızı, kalınlık ve yoğunluk bilgilerinin elde edilmesi sağlanır. Rayleigh dalgasının dispersiyon eğrisinde “temel mod” olarak nitelenen baskın modda, S dalgası hızı kolaylıkla seçilebildiğinden bu değerlere ulaşılabilir [7] [10] [11].

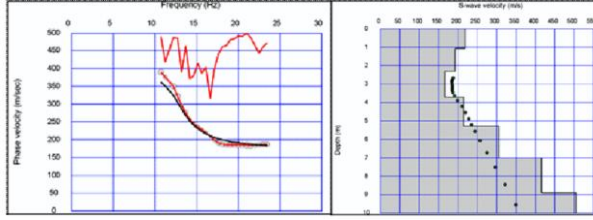
Rayleigh dalgasının yüze dalgası analizi yönteminde en önemli nokta dispersiyon eğrisinin elde edilmesidir (Şekil 5.). Dispersiyon eğrisini elde etmek için farklı yöntem ve teknikler mevcuttur. Bunlar içerisinde en basit ve yaygın olan yöntem Guo ve Liu (1999)'e göre farklı konumlarda kaydedilen iki izin çapraz ilişkisi ile bulunmasıdır [7] [12].



Şekil 5. Dispersiyon eğrisinin çıkarılması (a) atış kaydı, (b) frekans-dalga sayısı (f-k) dönüşümü, (c) faz düzeltmesi ile hız spektrumu ve piklenmiş veri, (d) temel mod dispersiyon eğrisi (Removing the dispersion curves (a) shot record, (b) frequency-wave count f-k conversion, (c) phase correction with velocity spectrum and pickle up data, (d) basic mode dispersion curve) [7].

Frekans dalga sayısı analizlerinin neticesinde ulaşılan Rayleigh dalgası dispersiyon eğrilerine, ters çözüm işlemi uygulanır ve S dalgası hız modeli sonuçlarına ulaşılır. Bu aşamada, dispersiyon eğrilerinin çoğunlukla “temel mod” olarak bilinen baskın modu işleme alınır (Şekil 6.).

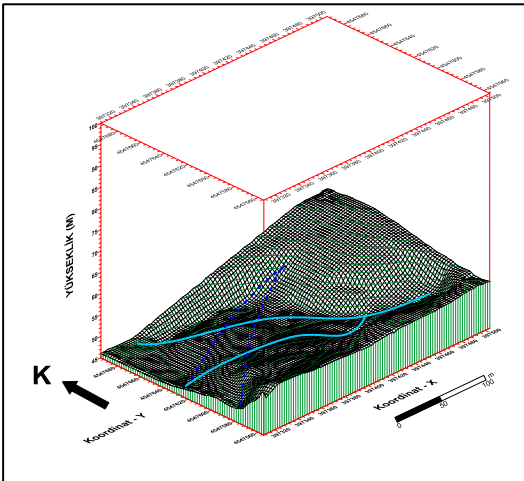
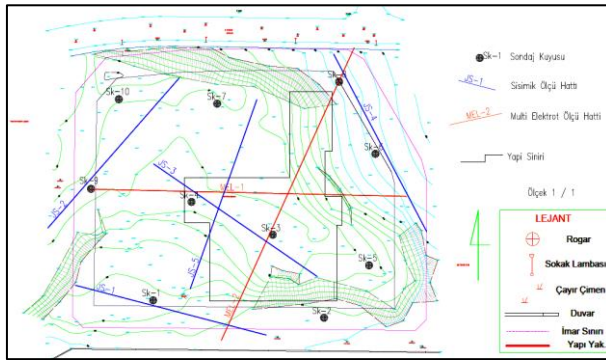




Şekil 6. Dispersiyon eğrisi ve S dalgası hız modeli (Dispersion curves and S-wave velocity model)

#### 4. UYGULAMALAR (APPLICATIONS)

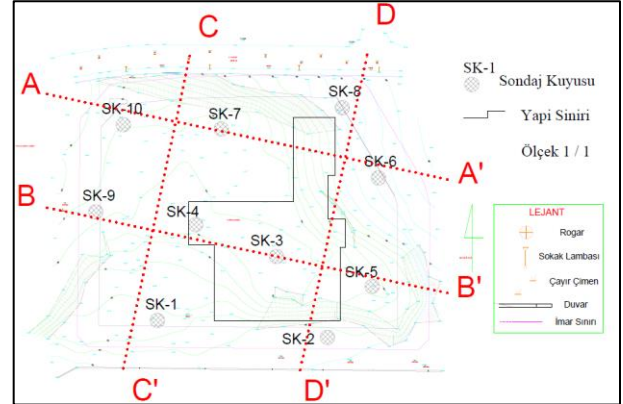
İstanbul ili Küçükçekmece ilçesi Atakent bölgesi batı kısmında yer alan arazi çalışmalarına ait lokasyon haritası Şekil 7.a.'da verilmiştir. Yaklaşık 20.000 m<sup>2</sup> alana sahip arazide 10 adet zemin araştırma sondajı, 2 adet çoklu elektrot uygulaması (kırmızı hatlar) ve 5 adet sismik profil (mavi hatlar) çalışmaları yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilerek yorumlara gidilmiştir. İnceleme alanı kendi içinde ~15 m'lik bir kot farkına sahip olup, KB-GD doğrultulu (açık mavi kesik çizgi) çevresel etki ve zaman kavramı nedeniyle oluşmuş vadi tipi dere yatağı göze çarpmaktadır. Diğeri ise net olmasa da bu forma uyduğu düşünülen KD-GB doğrultulu (koyu mavi kesik çizgi) bir dere yatağı mevcuttur (Şekil 7.b.).



Şekil 7. (a) İnceleme alanı çalışma lokasyon haritası (b) 3B görünümü  
(a) Study area location map (b) 3D view

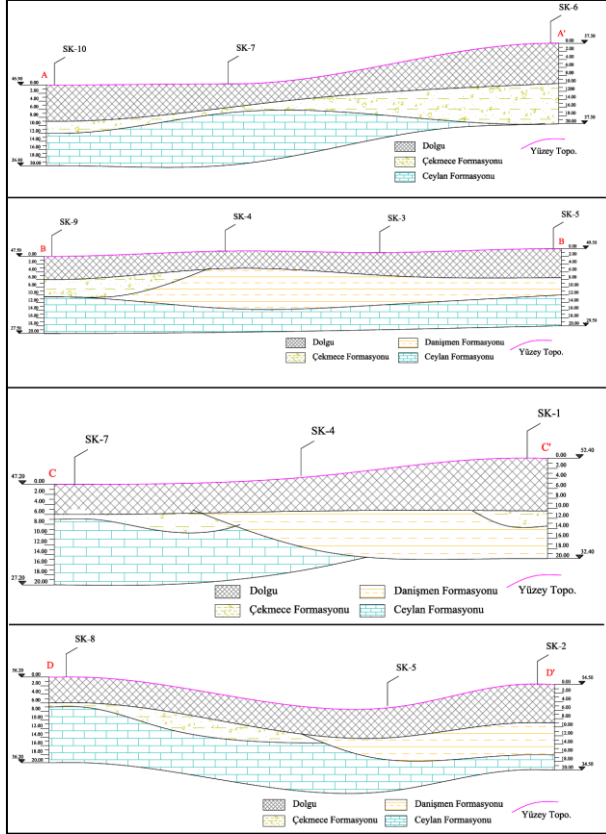
#### 4.1. Litolojik Kesitler (Lithological Sections)

İnceleme alanında malzeme bilgisi ve model yapısının oluşturulmasına yönelik litolojik kesitleri elde edebilmek amacıyla derinlikleri 20 m olan 10 adet sondaj kuyusu açılarak Şekil 8.'de ki plana göre 4 adet doğrultuda kesitler oluşturulmuştur.



Şekil 8. İnceleme alanı kullanılan litolojik kesit doğrultuları (Lithological section lines used in the study area)

Sırasıyla elde edilen A-A', B-B', C-C' ve D-D' kesitlerinden; yüzeyden başlayarak 7-7,5 m'ye kadar içerisinde silt-çakıl bulunan genellikle kil oranı daha fazla, yapay dolgu malzemesi izlenmektedir. Dolgular uzun zamanın vermiş olduğu etki ve düzensiz yapısı nedeniyle doğal zeminle iç içe girmiştir. İçerisindeki beton, tuğla, moloz vb. parçalar sayesinde ayırt edilebilmektedir. Dolgu malzemesinin altında zemin özellikleri gösteren 12,5-15 m arasına kadar uzanan Çekmece Formasyonunun Güngören Üyesi'ne ait Üst Miyosen yaşlı sarı-haki-yeşil renkli katı-çok katı sert, ince çakıllı kil ile Gürpınar Üyesi'nin özelliklerini gösteren kiltası yer yer yanal durumda da olacak şekilde bulunmaktadır. Sarı-yeşil-haki renkli olan kiltası, Orta Oligosen- Erken Miyosen yaşlıdır. Zayıf dayanıma sahiptir ve ince tabakalı, ayrılmış özelliktedir. Bu seviyelerden sonra en altta ise, inceleme sahasının kendi lokal yapısı içinde temel kaya niteği özelliği gösterebilecek Ceylan Formasyonuna ait kireçtaşları bulunmaktadır. Bu kireçtaşları Üst Eosen-Alt/Orta Miyosen yaşlı olup mavi-gri-kül rengine sahiptirler. İçerisinde kil yoğunluğu bulunan bu kireçtaşları orta-sağlam, ince-orta tabakalı ve az ayrılmış niteliğe sahiptirler (Şekil 9.).



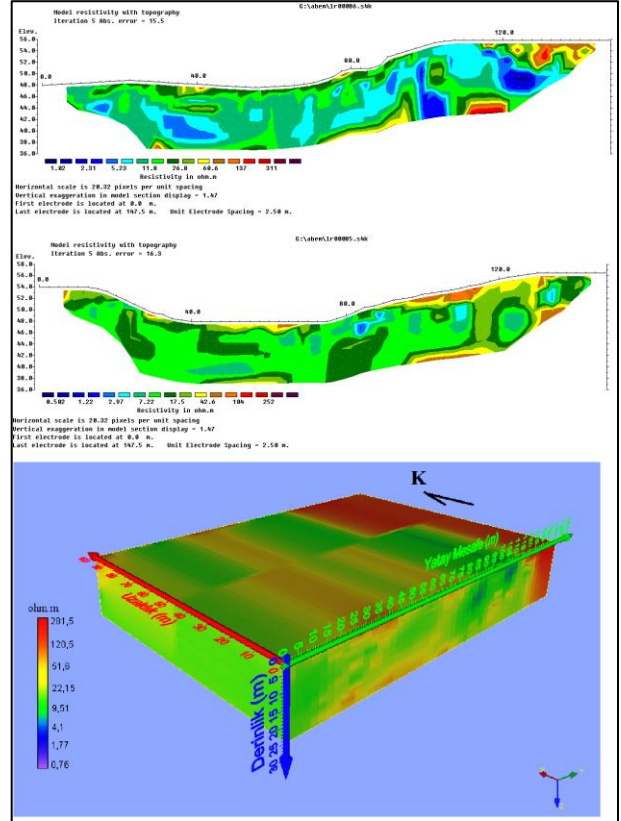
Şekil 9. İnceleme sahası litolojik kesitleri (Lithological sections in the review stage)

#### 4.2. Çoklu Elektrot Sisteminin Uygulaması (The Application of Multi Electrode Systems)

İnceleme alanı içerisinde özdirenç bağılı değişimleri modellemek amacıyla iki profil boyunca özdirenç ölçüleri alınmıştır. Ölçümler sırasında detay bilgi edinebilmek için 60 elektrottan oluşan düzenek yardımıyla çoklu elektrot profilleri boyunca dipol-dipol dizilim tekniği uygulanmıştır. Ölçülerin alınması sırasında ABEM markasının SAS 1000 modeli olan özdirenç ölçü cihazı kullanılmıştır. Elektrot ayırıcı olarak ise 60 yol ayırabilen ABEM Lund ayırıcı tercih edilmiştir. Elektrot özelliği olarak da 40 cm uzunluğunda ve 12 mm çapında özel bakır alaşımli çelik elektrotlardan yararlanılmıştır. Cihazın çalışması ve yere göndereceği akımı elde etmek amacıyla 45 amper 12 V değerlerine sahip kuru tip akü, kablo olarak da 5,00 m elektrot açıklığı uzunluğunda, her birinde 21 istasyon bulunan 4 x 100 m uzunluğuna sahip kablolar kullanılmıştır. 2,5 m elektrot aralığı ile çalışılmış ve toplam uzunluğu 147,5 m olan iki adet hat oluşturulmuştur. Arazideki ölçü planı ve gps yardımıyla elde edilen hatların koordinatları da kayıt edilmiştir.

Her iki hattan da 663 noktadan data toplanmıştır. MEL-1 profilinde elde edilen görünür özdirenç değerleri

minimum 0,84 ohm.m ve maksimum 862,52 ohm.m değerleri arasında değişmektedir. MEL-2 profilinde ise bu değerler 0,40-764,25 ohm.m arasındadır. Elde edilen ham verilere Res2dinv programı yardımıyla çözüm işlemine başlanmıştır. Çözüm işlemine elektrotların kot dağılımları da eklenerek topografik değerlerle birlikte final kesitleri oluşturulmuştur. Topografik değerlerin yanı sıra GPS yardımıyla her bir elektrotun koordinatları kullanılarak kesitler birleştirilmiş ve 3B grafik elde edilmiştir (Şekil 10.).

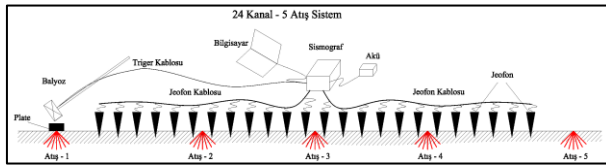


Şekil 10. (a) MEL-1 final kesiti (b) MEL-2 final kesiti (c) Birleştirilmiş 3B saha grafiği ((a) MEL-1 final section (b) MEL-2 final section (c)3D combined field graphics))

Her iki kesit birlikte değerlendirildiğinde arazinin boşluklu yapısı özdirenç değerlerinin dolgu seviyelerinde yüksek çıkmasına neden olmuştur. Yine dolgu içerisindeki yüksek kil oranı bu birimin özdirenç değerlerinde farklılığa neden olmuştur. Arazinin boşluklu yapısı ve bahar aylarında alınan ölçülere mevsimsel yağışlar etki etmiştir. Yüzeýden daha derinlerde karşımıza çıkan ve ufak kapanımlarla görünen düşük özdirençli değerler, geçirimsiz özelliği olan kil-kiltaşı seviyelerinin üzerinde bulunan su birikintisi izleridir. Yüzeýde görülen mevcut dere yataklarının, kesitlerde daha derinlerdeki izleri göze çarpmaktadır.

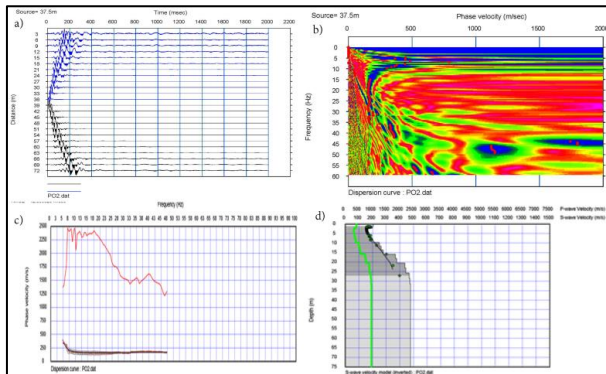
#### 4.3. Çok Kanallı Yüzeý Dalgası Analizi Uygulamaları (Multi Channel Analysis of Surface Waves Applications)

İnceleme alanında her profilde 5 adet atış olacak şekilde 25 adet MASW ölçüsü alınmıştır. Aktif enerji kaynağı tercih edilmiş ve bu doğrultuda 10 kg'lık balyoz kullanılmıştır. Sismik cihaz olarak Seismic Source marka DAQ III model 24 kanallı sismografla ölçümler alınmıştır. Ölçülerimizde örnekleme aralığı 0,25 msn olup kayıt uzunluğu ise 2 sn'dir. Sistemimizde 3,00 m grup aralığı ve 3,00 m ofset mesafesi kullanılmıştır. Toplamda 24 kanallı çalışılan sistemde 69,00 m grup mesafesi ve 72,00 m sistem mesafesi oluşturulmuştur. Oluşturulan sistem içerisinde 3 m mesafeli ofset uzaklıklarından düz ve ters atışlar yapılmasının yanı sıra ayrıca 6-7, 12-13 ve 18-19 no'lu jeofonların aralarına girilerek bu noktalardan da atışlar yapılmıştır (Şekil 11.)

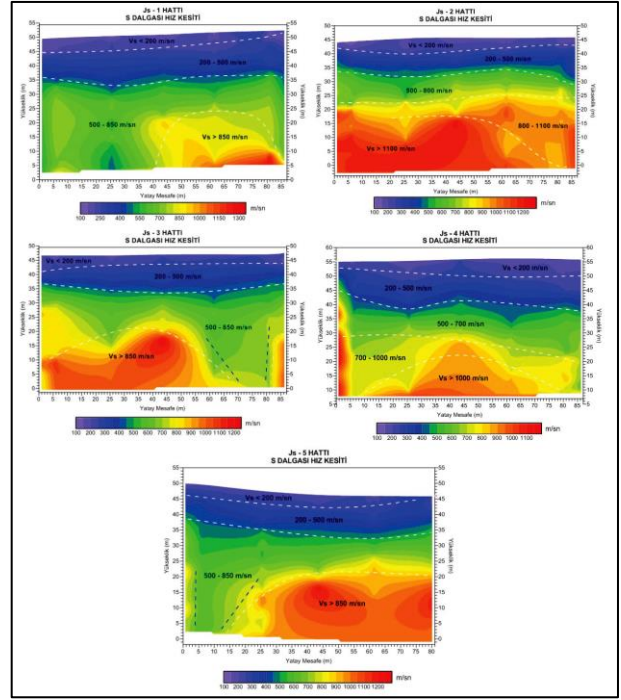


Şekil 11. Sismik profillere ait ölçüm geometrisi (Measurement geometry relating to the seismic profile)

Bu şekilde sahada alınan sismik kayıtlar çözüm programları yardımıyla değerlendirilerek her bir noktaya ait frekansa bağlı faz hızları eğrileri yani bir başka deyişle dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen dispersiyon eğrilerine ters çözüm işlemi uygulanmış ve S dalgası modelleri çıkarılmıştır (Şekil 12.). Her serimin kendi içindeki 5 atış kaydının 1B S dalgası hız yapısı gps ve topografik değerler yardımıyla birleştirilerek 2B derinlik-hız kesitleri oluşturulmuştur (Şekil 13.). Yüzyden gözlemlenen dere yatağının sismik kesitteki izleri 3. ve 5. profilde mavi kesik çizgi ile işaretlenmiştir.



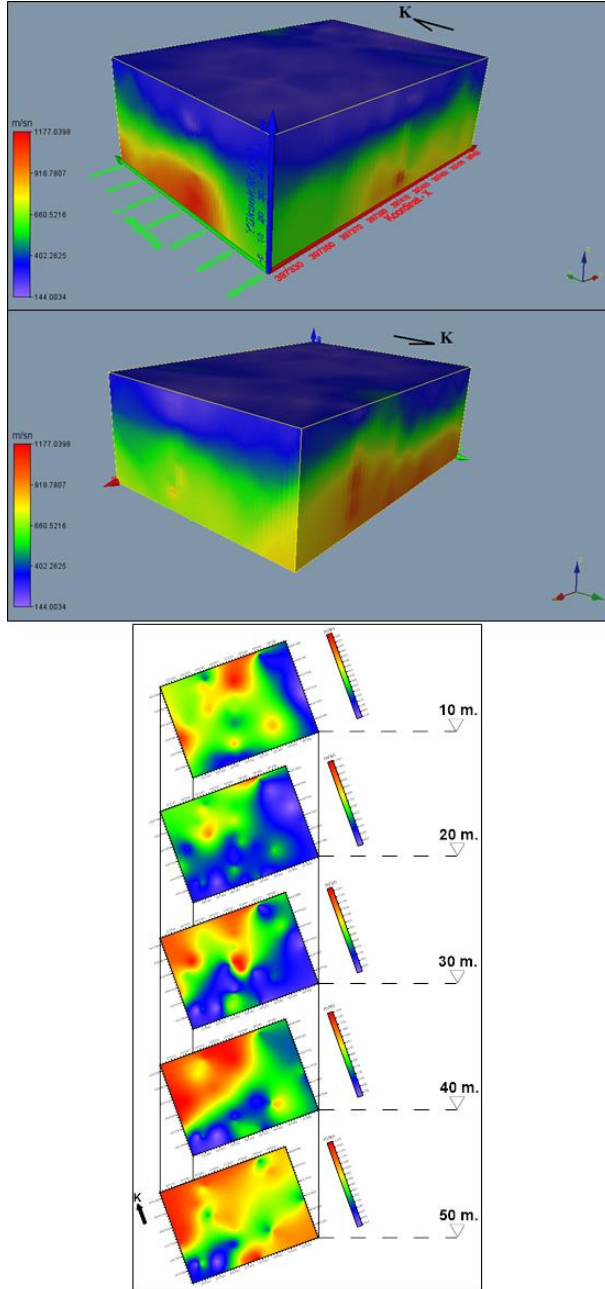
Şekil 12. Yüzy dalgası çözümü işlem aşamaları (Process steps of the surface wave solution)



Şekil 13. Sismik profillerin derinlik-S dalgası hız kesitleri (Depth-S wave velocity sections of the seismic profile)

Sismik hızlar yardımıyla modellenen iki boyutlu yer altı kesitlerimiz, kaynak alıcı mesafeleri ve bunların koordinatları kullanılarak yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yardımıyla S dalgasının tüm sahaya yayılan 3B farklı açılardan oluşturulan grafikleri ve yüzeyden başlayarak 10 m'de bir çıkarılan kat haritaları Şekil 14.'deki gibi elde edilmiştir.





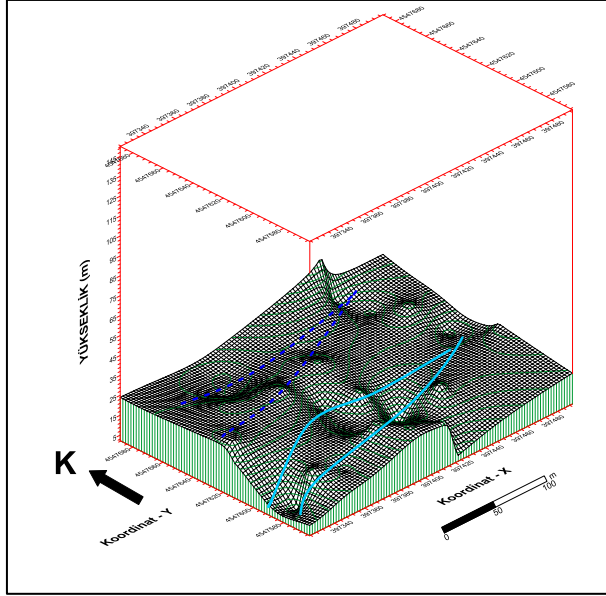
Şekil 14. (a) İnceleme sahasının farklı açılardan 3B görünüşleri (b) Kat haritaları ((a) 3D views from different angles of the study area (b) layer map)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İstanbul ili Atakent bölgesinin batı kısmında yer alan bölgedeki arazinin mühendislik ana kayası ve üzerindeki tabakaların yer altı modelinin çıkarılmasına yönelik yapılan bu çalışmada sondaj kuyuları, özdirenç çalışmaları ve sismik çalışmalardan yararlanılmıştır. Arazide Ceylan Formasyonu, Danişmen Formasyonu ve Çekmece Formasyonu üzerinde çalışılmıştır. İnceleme

sahasında öncelikle 10 adet sondaj kuyusu açılarak arazi hakkında malzeme bilgisi ve tercih edilen doğrultularda litolojik kesitler elde edilmiştir. Sahanın iletkenlik durumu, su oranı ve özdirenç değişimlerini saptamak amacıyla 2 adet 60 elektrotlu 147,5 m uzunluğunda çoklu elektrot uygulaması yapılmıştır. Yaklaşık 14 m elde edilen penetrasyon sonucu 0,76-281,5 ohm.m aralığında değişen gerçek özdirenç değerlerine ulaşılmıştır. Özdirenç kesitlerinde su izleri ve mevcut topografyadaki dere yataklarının belirtileri ile jeolojik birimler saptanmıştır. Buna göre dolgu ve Danişmen Formasyonu'nun geçirimsiz kilaşları ile Çekmece Formasyonu'nun killeri net bir şekilde, Ceylan Formasyonu'nun kireçtaşları ise hedeflenen derinliğin tam olarak yakalanmamasına karşın azda olsa gözlemlenmiştir. Sismik temel ve üzerindeki tabakaların hız yapılarının tespitine yönelik, inceleme sahasında 5 profilde 25 noktada sismik ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlere çok kanallı yüzey dalgası analizi uygulanarak S dalgası hız modelleri çıkarılmıştır. Profillere ait 1B modeller birleştirilerek 2B hız kesitleri oluşturulmuştur. Bu kesitler kendi içinde sismik ortamlara ayrılarak yaklaşık dolgu seviyelerine ait S dalga hızları 200 m/sn'den düşük olarak bulunmuştur. Ceylan Formasyonu'nun kireçtaşı seviyelerine ait S dalgası hızları ise 850-1000 m/sn arasında değişmektedir. Bu iki sismik ortam arasında bazı kesitlerde bir, bazı kesitlerde ise iki sismik ortam görülmektedir. Bunlar 200-500 m/sn arasında değişen S dalga hızına sahip Çekmece Formasyonu'nun killeri ile 500-800 m/sn arasında değişen S dalga hızına sahip Danişmen Formasyonu'nun kilaşlarıdır. 3. ve 5. profilde topografyada görülen mevcut derelerin izleri sismik çalışmalarda da gözlemlenmiş ve işaretlenmiştir. Daha sonrasında 2B hız kesitleri birleştirilmiş ve 3B hız grafiği elde edilmiştir. Yüzeiden başlayarak 10 m'de bir kat haritaları da çıkarılarak arazinin sismik temeli ile hız yapısının detaylı incelemesi yapılmıştır. Buna göre özellikle 30 m seviyelerinden sonra arazinin KB tarafının daha hızlı olduğu görülmektedir.

Tüm bu çalışmalar sonucunda inceleme sahasında uygulanan yöntemlerin sonuçları değerlendirilmiş ve birbirleri ile korele edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler uygulanan yöntemlerin sonuçlarının uyum içerisinde olduklarını göstermektedir. Son olarak mühendislik ana kayasının yer içindeki seyri ve dere yataklarının izlerinin de olduğu Şekil 15.'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 15. Mühendislik ana kayasının yer içindeki 3B seyri (3D image in place of the engineering main rock)

Yer altının kompleks yapısının ifadesi sırasında sondaj kuyuları vb. yöntemler bu karmaşıklığın açıklanmasında tek başına yeterli olamamakta ve maliyetleri yukarı çıkarmaktadır. Aynı zamanda tek boyutta çözümler üreten bu gibi yöntemler yer altı yapısını olduğu gibi tam anlamıyla yansıtamamaktadır. Jeofizik yöntemlerin devreye girmesiyle birlikte yer altı yapısının temel fiziksel özellikleri, gerçeğe en yakın biçimde sondaj kuyuları ile de doğrulanarak tercih edilen boyutlarda saptanabilmektedir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] İ.B.B. Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Hazırlanması Avrupa Yakası Güney, Yerleşim Amaçlı Mikrobölgeleme Çalışmaları Sonucu Hazırlanan İmar Planlarına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüd Raporu. Deprem Risk Yönetim ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, Nihai Rapor, 2007.
- [2] N. Özgül, K. Üner, İ. Bilgin, R. Korkmaz, İ. Özcan, İ. Akmeşe, Z. Yıldız, Ü. Yıldırım, Ö. Akdağ, M. Tekin, İstanbul İl Alanının Genel Jeoloji Özellikleri. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, 2005.
- [3] G. Karaoğlu, İstanbul Küçükçekmece ilçesinin mühendislik jeolojisi ve yerleşime uygunluk değerlendirmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [4] J. Bernard, L. Orlando, F. Vermeersch, "Electrical resistivity imaging for environmental applications." 16 th International Geophysical

Congress and Exhibition of Turkey, Abstracts Book, 376-379, 2004.

- [5] İ. Akça, "JFM 312 Uygulamalı jeofizik ders notları." Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 2012.
- [6] S. Yılmaz, "Dipol-Dipol görünür öz direnç verilerinin 2-b ters çözümü için pratik bir yaklaşım." İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yerbilimleri Dergisi, C. 18, S. 1, SS. 113-122, 2005.
- [7] Ç. Çaylak, "Çok kanallı yüzey dalgası verisinin ters çözüm teknikleri ile çok sığ yapıların araştırılması." Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2009.
- [8] C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia, "Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record." The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 1377-1380, 1998.
- [9] C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia, "Multi-channel analysis of surface waves (MASW)." Geophysics, 64, 800-808, 1999.
- [10] J. Xia, R.D. Miller, C.B. Park, "Estimation of near-surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves." Geophysics, 64, 691-700, 1999.
- [11] Y. Xia, H. Tong, W. K. Li, "Single-index volatility models and estimation." Statistica Sinica, 12, 785-799, 2002.
- [12] T. Guo, L. Liu, "Non-intrusive evaluation of submarine tunnel foundation using dynamic high-frequency surface wave prospecting Proc". Symp. on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (Environmental and Engineering Geophysics Society), Oakland, 67-74, 1999.



## Lityum iyon piller için kalay (II) oksit kompozit anot elektrotlarının üretimi ve karakterizasyonu

Mehmet Oğuz Güler\*

31.10.2016 Geliş/Received, 16.11.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.296995

### ÖZ

Bu çalışmada Li-iyon piller için uyumlu çekirdek olarak kalay (II) oksit anotlar kimyasal indirgeme yöntemi ile sentezlenmiştir. Karbon esaslı kabuk sentezi için mikrodalga destekli karbürizasyon yöntemi kullanılmış ve SnO tozlarının yüzeylerinde ince amorf bir karbon tabakası elde edilmiştir. Üretilen kalay (II) oksit/karbon kompozit elektrotların yüzey morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiş ve yapıların faz bileşenleri X-Işınları Difraktometresi (XRD) ile karakterize edilmiştir. Üretilen kalay (II) oksit/karbon kompozit tozları kullanılarak hazırlanan elektrotlar ile CR2016 test hücreleri hazırlanmış ve elektrotların elektrokimyasal performansı MTI BST8-MA 8 kanallı pil test ünitesinde, oda sıcaklığında 10 mV ve 2,5 V arasında sabit 1C şarj/deşarj şartlarında akım verilerek test edilmiştir. Sonuç olarak, kalay (II) oksit/karbon kompozit elektrot malzemeleri ile 100 çevrim sonrasında 396 mAh g<sup>-1</sup>deşarj kapasitesi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kalay (II) oksit, çekirdek/kabuk, kimyasal indirgeme, mikrodalga destekli karbürizasyon, Li iyon pil.

## The Production and characterization of tin (II) oxide composite anode electrodes for lithium ion batteries

### ABSTRACT

In this study, the core component of the composite, tin (II) oxide powders synthesized through a facile chemical reduction methods for Li-ion batteries. As the shell structure, surfaces of the as-synthesized tin (II) oxide particles were coated with carbon through microwave assisted carburization process. The surface morphologies and phase components of the as-synthesized tin (II) oxide/carbon composites were investigated via scanning electron microscopy and X-ray diffraction methods, respectively. CR2016 type coin cells were prepared by using tin (II) oxide/carbon composite powders and electrochemical tests were performed at room temperature via 8-channel MTI BST8-MA electrochemical test station between 10 mV and 2.5 V potential range by applying fixed 1 C state of charge conditions. The results have shown that tin (II) oxide/carbon composite structure have significantly improved the specific capacities to 396 mAh g<sup>-1</sup> after 100 cycles.

**Keywords:** Tin (II) oxide, core/shell, chemical reduction, microwave assisted carburization, Li ion battery.

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

\* Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Bölümü, Sakarya - [guler@sakarya.edu.tr](mailto:guler@sakarya.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

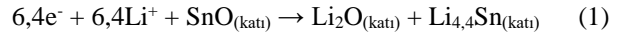
Yüksek hıza ve güce sahip olan cihazların kullanıcılar tarafından daha da küçültülmesi talebi cihazların çalıştırılması için gerekli olan enerji içinde yoğun çalışmaların sarf edilmesine neden olmuştur. Bunun yanı sıra sıfır emisyon değerlerine sahip olan elektrikli araçların geliştirilme çabaları da hem yüksek enerji hem de yüksek güç yoğunluğuna sahip şarj edilebilir enerji kaynaklarına ihtiyacı artırmıştır. Bu tür ihtiyaçların karşılanmasında lityum iyon pilleri üstün niteliklerinden dolayı günümüzde büyük önem taşımaktadır. Bu pil türü günümüzde özellikle cep telefonları, mini kameralar ve dizüstü bilgisayarları gibi portatif elektronik ürünlerin gereksinim duyduğu enerji miktarını sınırlı bir zaman dilimi içerisinde başarılı bir şekilde karşılayabilmektedir. İlk olarak Sony Energetic tarafından ticari olarak piyasaya sürülmüş olan lityum iyon piller halen ticari anlamda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [1].

Günümüzde gelinen noktada özellikle 1990'dan bu yana lityum iyon pillerde kullanılan malzemelerde büyük değişimlerin gözlemlendiği görülmüştür. Son yirmi yılda lityum iyon pillerin özellikle katot malzemeleri, teknolojik açıdan büyük evrimler geçirmiştir. Anot olarak ele alındığında ise bu tür pillerde kullanılmakta olan en gözde malzeme halen grafitir. Bu çalışmanın temelini ise grafitten çok daha üstün niteliklere sahip ve bu tür pillerdeki mevcut katot sistemleri ile uyumlu olan ve mevcut elektronik cihazların daha etkili bir şekilde kullanılmasına yardımcı olabilecek bir malzeme geliştirmesi oluşturmaktadır.

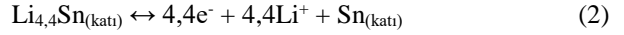
Yüksek kapasiteli Li-iyon pil uygulamaları için lityum ile reaksiyona giren birçok metal bulunmaktadır. Ancak bu malzemelerin çevrim ömürleri oldukça zayıftır. Bunun nedeni ise bu malzemelerin lityum ile reaksiyonu sonrasında çözünmeye, parçalanmaya ve çatlamaya uğramalarıdır. Günümüzde lityum iyon pillerin anot malzemeleri konusunda yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak "aktif-inaktif" kompozitler düşüncesi göz önüne alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu tür malzemelerin temel niteliği ise elektrokimyasal çevrim boyunca anot malzemesinin hacimsel olarak genişmesi sağlanırken herhangi bir hasarın ortaya çıkmasının engellenmesi şeklinde düşünülebilir [2].

Grafitin özellikleri incelendiğinde, yaklaşık olarak 372 mAh g<sup>-1</sup> gravimetrik ve 818 Ah l<sup>-1</sup>'lik bir hacimsel kapasiteye sahip olduğu görülmektedir [3]. Fakat özellikle son yıllarda piyasa çıkan çeşitli dizüstü bilgisayar ve çok fonksiyonlu cep telefonlarından dolayı daha yüksek kapasiteye sahip olan lityum iyon piller üzerindeki çalışmalara tekrardan başlanmıştır. Grafitin anot malzemesi olarak tercih edilmesinin yanı sıra bir takım metaller de anot malzemesi olarak çalışılmıştır.

Özellikle kalay oksit esaslı cam seramikler üzerine yapılan çalışmalar bu stratejinin bir devamı olarak gösterilebilir [4]. Kalay (IV) oksit esaslı cam kompozitlerinden üretilen anot malzemeleri ilk olarak Fuji mühendisleri [5] tarafından geliştirilmiştir ve çevrimler sonrası anotta meydana gelen hasarlar ortadan kaldırılmıştır. Daha yüksek kapasite ve elektrokimyasal özelliklere sahip olan anot malzemeler için halen farklı malzeme sistemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Kalay esaslı anot elektrotlarından biri tanesi de kalay (II) oksittir (SnO) [6]. Ancak lityum ile alaşımlama sonrası hacimsel genişlemelere bağlı olarak çok hızlı bozulması bu elektrotların kullanımını sınırlamaktadır [7]. Anot elektrotu olarak kullanımı boyunca lityum iyonları ve SnO yapısı arasında aşağıdaki reaksiyon meydana gelmektedir;



Yukarıdaki şarj adımının hemen sonrasında ise anottaki yarım hücre reaksiyonu aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir [8];



Literatür çalışmaları incelendiğinde her ne kadar farklı yöntemlerle üretilmiş olsalar da, SnO yapısı içerisinde eser miktarlarda kalay (IV) oksit bulunduğu gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde bulunan eser miktarlardaki kalay (IV) oksit ise SnO yapısının oksidasyonunu teşvik etmekte ve anot yapısının kararlı kalmasına engel olmaktadır [9]. Bunun yanı sıra, sentezlenmiş partikül morfolojisinin de uygulamalardaki şarj kapasiteni ciddi oranda etkilemektedir. Yüksek saflıkta SnO yapısının sentezlenmesi hususunda literatürde kalay klorür ve üre kullanılarak homojen çöktürme [10], inert gaz atmosferinde kondensasyon prosesi [11], farklı hücreler içerisinde lazer ile kondensasyon/buharlaştırma prosesleri [12] ve mikrodalga ısıtma yolu ile çözeltilerden sentezleme [13] gibi birçok yöntem önerilmiştir. Ancak söz konusu yöntemlerin pahalı donanımlar gerektirmesi, yüksek reaksiyon süreleri ve kalay (IV) oksit içermeyen yapıların elde edilmesi gibi hususlarda önemli başarılar elde edememiştir [14]. Literatürde verilmiş olan yöntemlerle karşılaştırıldığında atmosferik şartlar altında yüksek saflıkta SnO yapısının sentezlenmesinde en başarılı yöntem kimyasal çöktürme yöntemi olarak görülmektedir.

Bu çalışmada SnO/C hibrit kompozit serbest elektrotları kimyasal indirgeme ve mikrodalga destekli karbürizasyon yöntemleri kullanılarak iki aşamada üretilmiştir. Üretilmiş olan anot elektrotlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı yöntemlerle analiz edilmiştir. Anot malzemesi olarak tasarlanmış serbest elektrotlardan

CR2016 düğme tipi hücreler üretilmiş ve elektrokimyasal özellikleri de incelenmiştir. Elektrokimyasal testler sonrasında elde edilmiş sonuçlar, SnO/C hibrit kompozit yapılarının ticari olarak kullanılmakta olan grafitte göre daha üstün özelliklerinin olduğunu göstermiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. SnO Tozlarının Sentezlenmesi (Synthesizing of SnO Powders)

SnO tozların üretiminde kimyasal indirgeme yöntemi kullanılmıştır. Bu proseste 100 mL saf su içerisinde 3,52 g Na sitrat ( $\text{HOC}(\text{COONa})(\text{CH}_2\text{COONa})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Sigma Aldrich) tamamen çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bu karışıma 3,53 g Na hipofosfit monohidrat ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Sigma Aldrich) indirgeyici olarak eklenmiş ve pH değerini dengelemek için 2,24 gr sodyum hidroksit (NaOH, Sigma Aldrich) ilave edilmiştir. Hazırlanmış olan çözeltiye 2,5 g  $\text{SnSO}_4$  eklenmesi sonrasında SnO tozlarının elde edilmesi sağlanmıştır. SnO tozlarının çöktürülmesi sonrasında çözelti vakum filtrasyon yöntemiyle süzülüş ve pH değeri 7 olana kadar saf su ile yıkanmıştır. Elde edilen tozlar etüvde 60 °C'de 12 saat boyunca kurutulmuştur.

### 2.2. Mikrodalga Destekli Karbürizasyon Yöntemi (Microwave Hydrothermal Carburization Process)

100 mL saf su içerisine 3 g glikoz ( $\geq 99.5\%$  - Sigma-Aldrich) eklenmiş ve tamamen çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bu çözeltiye içerisine kimyasal çöktürme yöntemi ile elde edilmiş SnO tozundan 1 g eklenmiştir ve manyetik karıştırıcıda 60 dk süreyle karıştırılmıştır. Mikrodalga işlem için elde edilmiş çözelti politetrafluoroetilen (PTFE) imal edilmiş 100 mL'lik bir sızdırmaz reaktöre içerisine yerleştirilmiştir. Malzemeler 2.45 GHz bir magnetron frekansta, maksimum gücü 1200 W ve 10 W darbe kontrollü güç oranlarında hidrotermal mikrodalga (Milestone ROTOSYNTH) kullanılarak karbürize edilmiştir. Çözelti sıcaklığı 10 dakikada 200 °C'ye çıkacak şekilde ayarlanmış ve 200 °C'de 1 saat işlem görmüştür. Mikrodalga ışınması sırasında sıcaklık referans reaktör içine yerleştirilen bir termokupl ile kontrol edilmiştir. Karbonizasyon işleminden sonra, reaktör oda sıcaklığına soğutulmuştur ve karbonize edilen malzemeler polivinilidin florür filtresi (PVDF, 0,45 µm, Millipore) içinde mekanik bir vakum pompası kullanılarak süzülüş ve daha sonra nötr pH elde edilene kadar, saf su ile yıkanmıştır. Katı ürün, 12 saat boyunca 60 °C'de vakum altında kurutulmuştur.

### 2.3. SnO ve SnO/C Anot Elektrot Üretimi (Production of SnO and SnO/C Anode Electrodes)

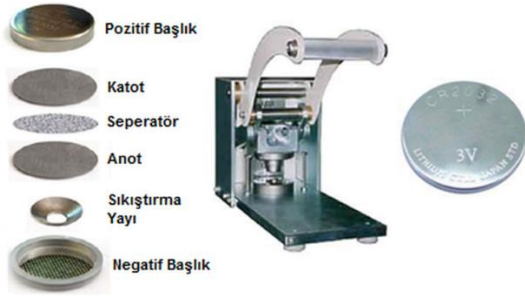
SnO ve SnO/C anot elektrotların üretimi için çamur yapılmıştır. Anot elektrotlarının üretimi için 9 mL 1-metil-2-prolidin (NMP, Merck) çözücü içerisinde 50 mg PVDF (Sigma Aldrich) bağlayıcı manyetik karıştırıcıda 2 saat karıştırılmıştır. Bu karışıma elektrot iletkenliğinin sağlanması amacıyla 100 mg karbon karası ve 350 mg SnO tozları eklenmiş ve yaklaşık 15 dk manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Manyetik karıştırıcının sıcaklığı 110 °C ye getirilmiş ve çamur kıvamı elde edilinceye kadar ısıtma ve karıştırma işlemine devam edilmiştir. Çamur oluşumu sonrasında Doktor Blade yardımıyla 500 µm kalınlığında bakır folyo üzerine sıvanmıştır. Sıvanma işlemi tamamlanınca çamur 24 saat boyunca vakum ortamında 70 °C'de 12 saat süre ile kurutulmuştur. Benzer işlem basamakları SnO/C elektrot üretiminde de tekrarlanmıştır.

### 2.4. Elektrot Malzemelerinin Karakterizasyonu (Characterization of Electrode Materials)

Üretilen SnO/karbon hibrit kompozit elektrotların yüzey morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiş ve yapıların faz bileşenleri X-Işınları Difraktometresi (XRD) ile karakterize edilmiştir. Üretilen elektrot malzemelerin elektrokimyasal analizlerinin yapılabilmesi için CR2016 düğme tipi hücreler MBraun Labstar marka argon gazı ile doldurulmuş eldivenli kutuda hazırlanmıştır. Anot olarak üretilen elektrotlar ve katot olarak da lityum (Li) metali pozitif ve negatif başlıklar arasına yerleştirilmiştir. Anot ile katodun birbirine temas ederek kısa devre oluşumunu önleyecek ancak iyonların geçişini de sağlayabilecek separator olarak da mikro porlu polipropilen (PP, Celgard 2300) kullanılmıştır. Anot ve katot malzemesinin iyonik iletkenliğini sağlayacak olan 1M'lık lityum heksaflorofosfat ( $\text{LiPF}_6$ , Sigma Aldrich) tuzu + Hacimce %50 dimetil karbonat (DMC, Sigma Aldrich) ve %50 etilen karbonat (EC, Sigma Aldrich) çözeltisi elektrolit olarak kullanılmıştır ve bu elektrolit separator üzerine damlatılmıştır. Pil yine argon ortamında Şekil 1'den de görülebileceği gibi zımba yardımı ile basılmıştır.

Elektrokimyasal pil performanslarını ölçülebilmesi amacıyla galvanostatik şarj-deşarj işlemleri 0,01-2,5 V potansiyel aralığında gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ölçümleri ise 10 mV şiddetinde (genliğinde) bir sinüs dalgasının uygulanması ile 0,01-100 kHz frekans aralığında alınmıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) çalışmaları Gamry Instrument Version 5.67 cihazı ile yapılmıştır.



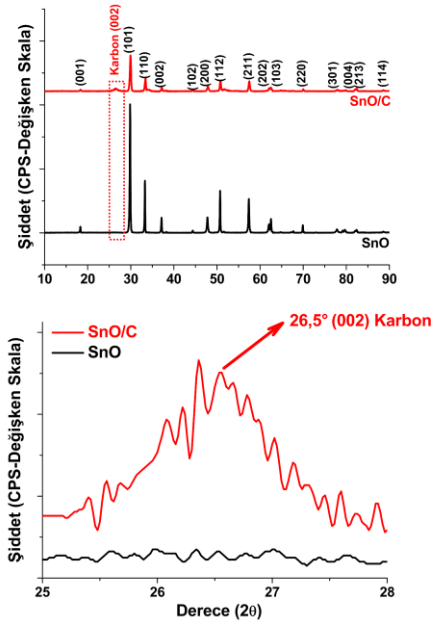


Şekil 1. CR2016 türü şarj edilebilir pil ve montajı (CR2016 type button cell and cell assembly)

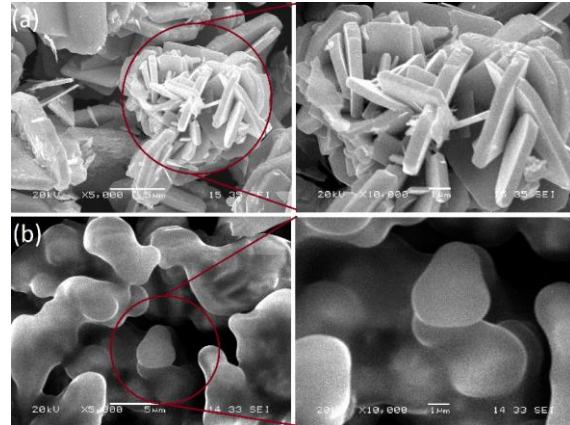
Pil kapasite testleri 1,0 C (1 saat şarj, 1 saat deşarj) hızında ve oda sıcaklığında (25 °C) yapılmıştır. Testler 0,01-2,5 V potansiyel aralığında gerçekleştirilmiştir. Toplam çevrim sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Pillerin galvanostatik şarj deşarj testleri MTI BST8-MA pil test cihazı ile yapılmıştır.

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

Üretilmiş olan SnO partiküllerin ve karbon kaplı SnO partiküllerin X-ışınları analizleri Şekil 2'deki gibidir. SnO'ye uygulanan X-ışınları analizleri çözüldüğünde JCPDS kart no 06-0395 ile birebir uyum gösterdiği görülmektedir [15]. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tetragonal kristal yapıda ve  $a=b=3.802 \text{ \AA}$  ve  $c=4.836 \text{ \AA}$  kafes parametrelerine sahip SnO partikülleri başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Bunun yanı sıra, SnO partiküllerinin en şiddetli pikleri ise (101), (110), (112) ve (212) düzlemlerine ait olduğu ayrıca anlaşılmaktadır. XRD analizlerinden elde edilmiş piklerin şiddetleri de literatür çalışmaları ile uyum içerisinde [16]. Mikrodalga destekli karbürizasyon sırasında elde edilmiş SnO/C kompozitlerin XRD paternleri incelendiğinde ise  $26.5^\circ$ 'de karbona has (002) pikinin ortaya çıktığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, sentezlenmiş olan SnO partiküllerinin yüzeylerinin karbon kaplanmasına bağlı olarak elde edilmiş pik şiddetlerinde de ciddi düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir. Karbürizasyon işlemi sonrasında karbonun (002) pikinin elde edilmesi mikrodalga destekli hidrotermal karbürizasyon işlemi sonrasında karbonun yalnızca SnO partikülleri yüzeyinde çekirdeklendiği ve SnO kristal yapısı içerisine difüze olmadığı görülmektedir. Ayrıca, mikrodalga destekli karbürizasyon işlemi sonunda SnO partiküllerinin üzerine kaplanmış olan karbon tabakasının amorf karakterde olduğu da elde edilmiş paternlerden anlaşılmaktadır.



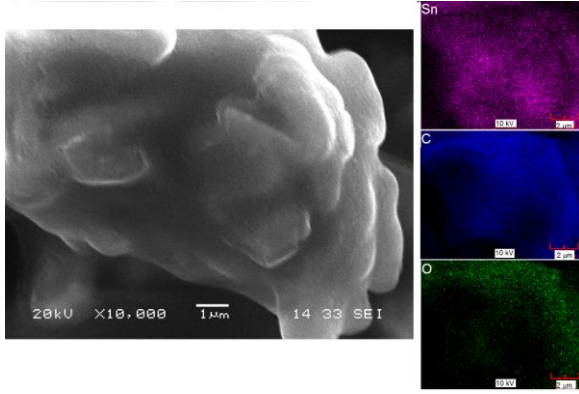
Şekil 2. SnO ve SnO/C anot elektrotlarının X-ışınları difraksiyon analizleri (X-Ray diffraction analysis of SnO and SnO/C anode electrodes)



Şekil 3. (a) SnO ve (b) SnO/C anot elektrotlarının SEM görüntüleri (SEM images of (a) SnO and (b) SnO/C anode electrodes)

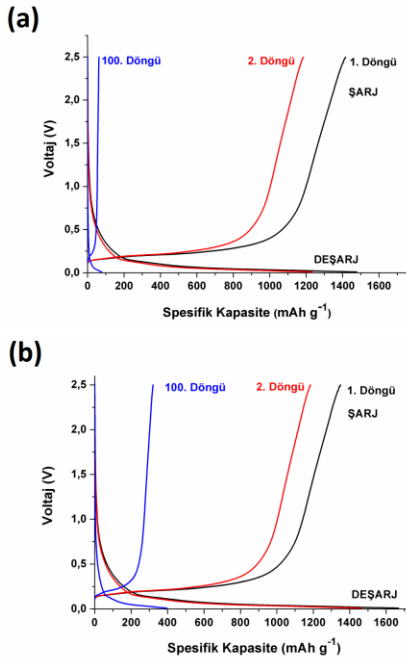
Kimyasal indirgeme yöntemi ile üretilmiş olan SnO ve mikrodalga destekli karbürizasyon prosesi sırasında elde edilmiş anot elektrotlarının SEM görüntüleri ise Şekil 3a ve 3b'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere kimyasal indirgeme yöntemi sonrası elde edilen SnO partiküller tabaka benzeri bir yapıda çekirdeklendiği ve yaklaşık olarak boyutları 1.5-10 µm arasında değişkenlik göstermektedir. Ayrıca yer yer iri partiküller de göze çarpmaktadır. Partiküllerin kalınlıkları ise yaklaşık olarak 250-300 nm aralığında değişmekte olup, bir araya geldiklerinde çiçek yapılı mimari biçiminde çekirdeklendikleri gözlenmektedir [17].





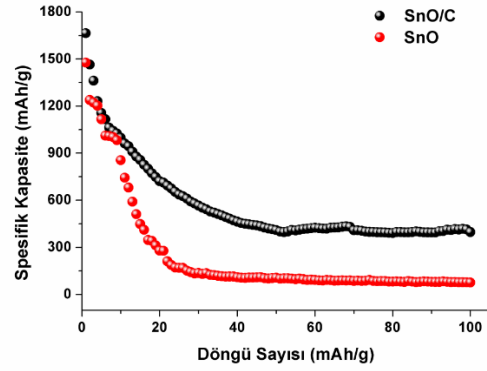
Şekil 4. SnO/C anot elektrotlarının EDS noktasal haritalama SEM görüntüleri (EDS dot map SEM images of SnO/C anode electrodes).

Mikrodalga destekli karbürizasyon prosesi sonrasında karbon kaplamanın SnO partiküllerinin üzerinde dağılımını incelemek amacıyla SEM enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi analizi de gerçekleştirilmiş ve noktasal haritalama görüntüleri Şekil 4’de verilmiştir. Görüntü incelendiğinde SnO tozlarının yüzeylerinin yoğun bir karbon tabakası ile kaplandığı görülmektedir. SnO partiküllerinin yüzey ve çevrelerinin homojen bir karbon tabaka ile kaplanması, partiküllerin çevresinde iletken bir tabakanın elde edilmesini ve bunun yanı sıra elektrokimyasal prosesler sırasında meydana gelecek hacimsel genişlemelerin olumsuz etkilerine karşı anot elektrotunu koruyacağını göstermektedir [18].



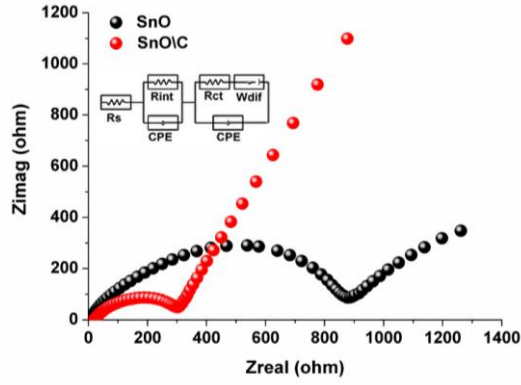
Şekil 5. (a) SnO ve (b) SnO-C anot elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj testleri (Galvanostatic charging-discharging tests of (a) SnO and (b) SnO/C anode electrodes).

SnO ve SnO/C anot elektrotlarının şarj-deşarj eğrileri Şekil 5’de gösterildiği gibidir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere SnO ve SnO/C anot elektrotlarından ilk döngü sonunda sırasıyla 1.447 mAh g<sup>-1</sup> ve 1.664 mAh g<sup>-1</sup>’lik birdeşarj kapasite değerleri elde edilmiştir. SnO ve SnO/C anot elektrotlarının voltaj profilleri incelendiğinde ise yaklaşık olarak 0,25 V platosunda düz bir çizgiye yakın bir eğim sergilenmiştir. Özellikle SnO/C elektrotlarından elde edilmiş eğriler incelendiğinde söz konusu eğimin daha uzun olduğu görülebilir. SnO/C anot elektrotlarının söz konusu niteliği SnO partiküllerinin yüzeylerinin daha iletken olan karbon ile kaplanmasından ileri gelmektedir. Aktif anot partiküllerinin yüzeylerinin karbon ile kaplanması şarj vedeşarj işlemleri boyunca lityum iyonlarının daha iletken bir yüzey üzerinde daha kolay hareket edebilme kabiliyeti kazanması ile açıklanabilir. Bunun yanı sıra, normal şartlar altında aşırı derecede yalıtkan olan SnO partiküllerinin yüzeylerinin iletken bir karbon ile kaplanması şarj vedeşarj işlemleri boyunca meydana gelebilecek polarizasyonların engellenmesine yönelik ciddi oranda katkılar sağlamaktadır [19].



Şekil 6. SnO ve SnO/C anot elektrotlarının çevrim performansı (Cyclic performances of SnO and SnO/C anode electrodes)

Şekil 6’da ise saf SnO ve SnO/C kompozit elektrotlarının pil performansı değerleri görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere 100 döngü sonunda saf SnO toplam pil kapasitesinin yaklaşık olarak % 90’nını kaybederken, SnO/C kompozit elektrotlarının 100 döngü sonundaki pil kapasitesinin %30’nu korumuştur. 100 döngü sonunda kompozit elektrotlarından elde edilmiş olan 396 mAh g<sup>-1</sup>’lık spesifik kapasite değeri karbonun teorik kapasite değerinden de daha yüksektir. Sonuçlardan da görülebileceği üzere en iyi sonuçlar SnO/C hibrit kompozitlerinden elde edilmiştir. Elde edilmiş yüksek kapasite değerlerinin en önemli nedeni SnO partiküllerinin yüzeylerinde çok ince bir karbon kaplamanın oluşmasından ileri gelmektedir. Karbon kaplama elektrolit ile SnO partiküllerinin doğrudan temasını engel olarak yüzey üzerinde pasivasyon tabakasının oluşumunu geciktirerek çevrimsel kararlılığını geliştirmiştir [20].



Şekil 7. SnO ve SnO/C anot elektrotlarının elektrokimyasal empedans testleri (Electrochemical impedance tests of SnO and SnO/C anode electrodes)

Elektrot ve elektrolit çözeltileri arasındaki ara yüzey reaksiyonlarının araştırılması amacıyla elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizleri de gerçekleştirilmiş ve Nyquist eğrileri ise Şekil 7’de gösterilmiştir. Yarım daire şeklinde görülen eğrinin yüksek ve orta frekanslı bölgesi elektrot yüzeyinde oluşan pasivasyon tabakasından  $\text{Li}^+$  iyonlarının difüzyonunu ifade etmektedir. Daha düşük frekanslardaki eğimli çizgi ise elektrotlar arasındaki lityum iyon difüzyonunu gösteren Warburg empedansını ifade etmektedir [21]. Elde edilmiş Nyquist eğrileri ise Şekil 7’nin içerisindeki empedans devresine fit edilmiştir. Empedans devresindeki  $R_s$  bileşeni Elektrolit ve ohmik direncine,  $R_{ct}$  ise şarj transfer direncini,  $CPE$  sabit faz bileşenini ve  $W_s$  ise  $\text{Li}^+$  iyonlarının kütleli difüzyon direnci olan Warburg empedansını ifade etmektedir. Genel olarak, empedans devresindeki  $R_{ct}$  bileşeni kompozit anot elektrotlarında partiküller arası teması ifade etmektedir [22]. Ancak, şarj ve deşarj işlemleri boyunca anot elektrotunda yüksek oranda hacimsel genişlemelere bağlı olarak hasarların ve tozlaşmaların meydana gelmesi ile partiküller arası temas direncinde artış görülür. Bunun yanı sıra, partikül hasarları ve tozlaşmaları yeni elektrot/elektrolit ara yüzeylerinin oluşmasına neden olarak yeni pasivasyon tabakalarının oluşmasına ve buna bağlı olarak ise  $R_{ct}$  değerinin artışına neden olmaktadır [23]. Oluşan pasivasyon tabakalarının kararlı olması halinde pasivasyon tabakasının daha da büyümesi ya da elektrolitin sürekli olarak bozulmasının da önüne geçilebilir [24]. Bu çalışmada SnO ve SnO/C anot elektrotlarının şarj transfer dirençleri ( $R_{ct}$ ) sırasıyla 887 ohm ve 306 ohm olarak bulunmuştur. Elde edilmiş sonuçlar çekirdek/kabuk modelinde sentezlenmiş olan SnO/C anot elektrotlarının elektrokimyasal özellikleri önemli ölçüde geliştirildiği görülmektedir.

#### 4. YORUMLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada SnO partiküller kimyasal indirgeme yöntemi ile üretilmiştir. Anot malzemesi olarak kullanılacak olan SnO tozlarının iletken özelliklerini arttırmak ve meydana gelebilecek kapasite düşüşlerine engel olabilmek amacıyla üretilmiş olan partiküller mikrodalga destekli karbürizasyon yöntemi ile karbon kaplanmıştır. Sentez sonrası üretilen elektrot malzemeleri X-ışınları analizine tabi tutulmuştur. Yapılan analizlerde SnO partiküllerinin herhangi bir empürite içermediği ve mikrodalga destekli karbürizasyon yöntemi sonrasında yüzeylerin karbon tabakası ile kaplandığı görülmüştür. SnO ve SnO-C anot elektrotlarının 1C akım yoğunluğunda 0,01V ile 2,5 V potansiyel aralığında şarj-deşarj işlemleri gerçekleştirilmiş ve saf SnO tozlarının spesifik kapasite değerlerinin 100 döngü sonunda neredeyse tükendiği saptanmıştır. Karbon kaplamanın iletkenliği arttırdığı için kapasite kaybı saf SnO ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen elektrokimyasal test sonuçları mikrodalga destekli karbürizasyon yönteminin pik performansı değerlerini önemli ölçüde geliştirdiği gözlemlenmiştir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] C. Chen and Y. Tseng, “Cross-interaction in Cu/Sn/Co/Sn/Ni and Cu/Sn-Co/Co/Sn-Co/Ni couples,” J. Electron. Mater., vol. 44, no. 3, pp. 1021-1027, Mar. 2015.
- [2] X. Li, Y. Zhong, M. Cai, M. Balogh, D. Wang, Y. Zhang, R. Li and X. Sun, “Tin-alloy heterostructures encapsulated in amorphous carbon nanotubes as hybrid anodes in rechargeable lithium ion batteries,” Electrochim. Acta, vol. 89, no. 1, pp. 387-393, Feb. 2013.
- [3] K. Wang, D. Gan, K. Hsiel and S. Y. Chiou, “The microstructure of  $\eta'$ -Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> and its orientation relationships with Cu in the early stage of growth,” Thin Solid Films, vol. 518, no. 6, pp. 1667-1674, Jan. 2010.
- [4] A. Yamano, M. Morishita, H. Yamauchi, T. Nagakane, M. Ohji, A. Sakamoto, M. Yanagida and T. Sakai, “Electrochemical and safety performance of Li pre-doping free cell using tin-phosphate glass-silicon composite anode,” J. Power Sources, vol. 292, no. 1, pp. 31-38, Oct. 2015.
- [5] Y. Idota, T. Kubota, A. Matsufuji, Y. Maekawa and T. Miyasaka, “Tin-based amorphous oxide: a high-capacity lithium-ion-storage material,” Science, vol. 276, no. 5317, pp. 1395-1397, May 1997.

- [6] J.H. Giefers, F. Porsch and W. G., "Kinetics of the disproportionation of SnO," *Solid State Ionics*, vol. 176, no. 1-2, p. 199–207, Jan. 2005.
- [7] J. Chouvin, C. Branci, J. Sarradin, J. Fourcade, J. Jumas, B. Simon and P. Biensan, "Lithium intercalation in tin oxide," *J. Power Sources*, vol. 1, no. 1, p. 277–281, Sept. 1999.
- [8] I. Courtney and J. Dahn, "Electrochemical and In Situ X-ray diffraction studies of the reaction of lithium with tin oxide composites," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 144, no. 6, pp. 2045-2052, Nov. 1997.
- [9] D.-S. Wu, C.-Y. Han, S.-Y. Wang, N.-L. Wu and I. Rusakova, "Microwave assisted solution synthesis of SnO nanocrystallites," *Mater. Lett.*, vol. 53, no. 3, p. 155–159, Mar. 2002.
- [10] F. Kazumi, N. Chizuko, M. Keizo and M. Shunmei, "Preparation of Tin(II) Oxide by a homogeneous precipitation method," *B. Chem. Soc. Jpn.*, vol. 63, no. 9, pp. 2718-2720, June 2006.
- [11] V. Jimenez, A. E. J. Gonzalez-Elipse, A. Justo and A. Fernandez, "Synthesis of SnO and SnO<sub>2</sub> nanocrystalline powders by the gas phase condensation method," *Sensor. and Actuator.*, vol. 31, no. 1-2, pp. 29-32, Feb. 1992.
- [12] K. Amitabh and R. Rustum, "RESA- A wholly new process for fine oxide powder preparation," *J. Mater. Res.*, vol. 3, no. 6, pp. 1373-1377, Dec. 1988.
- [13] F. J. E. Pires, R. Savu, M. Zaghate, E. Longo and J. Varela, "Microwave-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline SnO powders," *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 2, pp. 239-242, Jan. 2008.
- [14] H. Avila and J. Rodríguez-Páez, "Solvent effects in the synthesis process of tin oxide," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 355, no. 14-15, pp. 885-890, June 2009.
- [15] H. Yamaguchi, S. Nakanishi, H. Iba and T. Itoh, "Amorphous polymeric anode materials from poly(acrylic acid) and tin(II) oxide for lithium ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 275, no. 1, pp. 1-5, Feb. 2015.
- [16] Lu, C. Ma, J. Alvarado, T. Kidera, N. Dimov, Y. S. Meng and S. Okada, "Electrochemical properties of tin oxide anodes for sodium-ion," *J. Power Sources*, vol. 284, no. 1, pp. 287-295, June 2015.
- [17] M. Shimizu, H. Usui and H. Sakaguchi, "Electrochemical Na-insertion/extraction properties of SnO thick-film electrodes prepared by gas-deposition," *J. Power Sources*, vol. 248, no. 1, p. 378–382, Feb. 2014.
- [18] L. Bardini, A. Pappacena, M. Dominguez-Escalante, J. Llorca, M. Boaro and A. Trovarelli, "Structural and electrocatalytic properties of molten core Sn@SnOx nanoparticles on ceria," *Appl. Catal. B-Environ.*, vol. 197, no. 1, p. 254–261, Nov. 2016.
- [19] B. Huang, X. Li, Y. Pei, S. Li, X. Cao, R. Massé and G. Cao, "Novel carbon-encapsulated porous SnO<sub>2</sub> anode for lithium-ion batteries with much improved cyclic stability," *Small*, vol. 12, no. 14, pp. 1645-1955, Feb. 2016.
- [20] G. Yang, A. Frenkel, D. Su and X. Teng, "Enhanced electrokinetics of C–C bond splitting during ethanol oxidation by using a Pt/Rh/Sn catalyst with a partially oxidized Pt and Rh core and a SnO<sub>2</sub> shell," *Chem. Cat. Chem.*, vol. 8, no. 18, p. 2876–2880, 2016.
- [21] M. O. Guler, A. Akbulut, T. Cetinkaya, M. Uysal and H. Akbulut, "Improvement of electrochemical and structural properties of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel based electrode materials for Li-ion batteries," *Int. J. Hydrogen Energ.*, vol. 39, no. 36, pp. 21447-21460, Dec. 2014.
- [22] M. O. Guler, T. Cetinkaya, U. Tocoglu and H. Akbulut, "Electrochemical performance of MWCNT reinforced ZnO anodes for Li-ion batteries," *Microelectron. Eng.*, vol. 118, no. 1, pp. 54-60, Apr. 2014.
- [23] U. Tocoglu, O. Cevher, M. O. Guler and H. Akbulut, "Core-shell tin-multi walled carbon nanotube composite anodes for lithium ion batteries," *Int. J. Hydrogen Energ.*, vol. 39, no. 36, p. 21386–21390, Dec. 2014.
- [24] U. Tocoglu, O. Cevher, M. O. Guler and H. Akbulut, "Coaxial silicon/multi-walled carbon nanotube nanocomposite anodes for long cycle life lithium-ion batteries," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 305, no. 1, p. 402–411, June 2014.

## Betonarme binalardaki perde duvar miktarının bina performansına etkisi

Gökhan Barış Sakcalı<sup>1</sup>, Hamide Tekeli<sup>2</sup>, Fuat Demir<sup>3</sup>

*26.11.2015 Geliş/Received, 21.11.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.296998

### ÖZ

Bu çalışmada perde duvarların bina performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmada sekiz katlı betonarme bir binanın perde duvarlı ve perde duvarsız modelleri oluşturularak çözümlenmeleri yapılmıştır. Model binaların doğrusal elastik olmayan çözüm yöntemi kullanılarak performans seviyeleri belirlenmiştir. Çalışmada, perde duvar alanının kat alanına oranı farklı kolon boyutları ve perde duvar yerleşimleri için incelenmiştir. Model binalar için kapasite eğrileri ve perde duvarlarında meydana gelen kesme kuvveti ve moment grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil ve tablolarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** betonarme bina, performans, perde duvar, doğrusal elastik olmayan yöntem

## The effects of shear wall amount on building performance in RC buildings

### ABSTRACT

In this study, effects of shear walls on RC building performance are investigated. For this purpose, eight stories buildings with/without shear wall are modeled and analyzed. The performance levels of model buildings are determined by using nonlinear method. The ratios of shear walls total area to building area were investigated for different column dimensions and shear wall configuration. Capacity curves of the model buildings and shear force and moment graphics of shear walls are obtained. The obtained results are given in figures and tables comparatively.

**Keywords:** RC building, performance, shear wall, nonlinear analysis

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü - [gokhanbarissakcali@gmail.com](mailto:gokhanbarissakcali@gmail.com)

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü - [hamidetekeli@gmail.com](mailto:hamidetekeli@gmail.com)

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü - [fuatdemir@sdu.edu.tr](mailto:fuatdemir@sdu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ulusal ve Uluslararası birçok deprem yönetmeliği, şiddetli depremler altında yapının elastik ötesi davranacağı varsayımını göz önüne alarak hazırlanmıştır. Depreme dayanıklı yapı tasarımında, elastik sınırlar ötesinde deformasyon olacağı varsayıldığından, şiddetli depremlerde büyük yer değiştirmeler oluşmaktadır. Yatay ötelenme rijitliği küçük olan bir yapıda, ikinci mertbe momentlerinin de etkili olmasıyla yapıda ilave hasarlar oluşacaktır. Hem yeterli rijitliği sağlamak hem de ikinci mertbe etkilerinin oluşmasını önlemek amacıyla 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) [1], görelî kat ötelemelerine sınırlamalar getirmiştir.

Binaya etki eden yatay yükler etkisinde kat yer değiştirmelerinin sınırlandırılması ile birlikte ikinci mertbe momentlerini azaltmak için perdelerin kullanılması oldukça etkili olmaktadır [2-3]. Yön ve Şahin [4], farklı zemin sınıfları için binaya yerleştirilmesi gereken perde duvar miktarını görelî kat ötelemeleri açısından incelemiştir. Çalışmada perde duvar oranının, binanın yapılacağı zeminin de dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ancak burada perde duvarların bina planındaki yerleşimi de oldukça önemlidir. Bu konuda yapılan çalışmalar [5-7] perdelerin bina planında burulma stabilitesine sahip, rijitlikleri simetrik ve temelde devrilmeye karşı yeterli güvenlikte olacak şekilde yerleştirilmesinin uygun olduğunu göstermiştir. Buna benzer olarak T, L ve kare şeklinde farklı geometriye sahip binalarda perde duvar yerleşiminin yapısal davranış üzerine etkileri de bazı çalışmalar [8, 9] tarafından ortaya konulmuştur.

Yatay yüklerin taşınmasında etkili olarak kullanılan perdeler, çerçeve sistemiyle birlikte kullanıldığında, deprem veya rüzgar etkisiyle oluşan yatay yüklerin tamamına yakını karşılarlar. Bu nedenle binanın yatay yük taşıma kapasitesinde artışa neden olurlar. Perde duvarlı betonarme binaların, deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı binalara kıyasla daha iyi bir davranış sergiledikleri bilinmektedir [10-12]. Literatürdeki bazı çalışmalar, özellikle planda yerleştirilmesi gereken perde duvar oranının belirlenmesi üzerine odaklanmıştır. Atımtay [13], bina planına yerleştirilmesi gereken perde duvar alanını, kat alanı ve kat adedi parametrelerine bağlı olarak tanımlamıştır. Çömlekoğlu [14], Burak ve Çömlekoğlu [15], Günel [16] yaptıkları çalışmalarda, perde duvar oranının, orta katlı binaların dinamik davranışı ve deprem performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmaların sonucunda; binalara en az %1 oranında perde duvar yerleştirilmesinin gerekliliği ve perde duvar oranının %1.5 oranını aşması durumunda ise eklenen perde duvarların, bina deprem performanslarına olan etkisinin

oldukça azaldığı vurgulanmıştır. Tekel [17], binalara yerleştirilmesi önerilen %1 oranında perde duvarın DBYBHY [1]'te verilen farklı parametrelere göre genel bir değerlendirmesini yapmıştır.

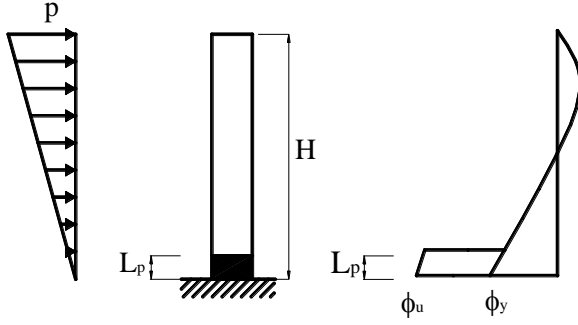
Bu çalışmada, perde duvar miktarının betonarme binaların deprem performansına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla seçilen sekiz katlı konut türü betonarme sadece çerçevesel ve farklı oranlarda perde duvar yerleştirilerek tasarlanan çerçevesel-perdeli binaların deprem performansları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada değişik perde oranları ile bina performansı arasındaki ilişki farklı kolon boyutları için incelenmiştir. Performans değerlendirmesinde doğrusal elastik olmayan yöntem kullanılmıştır.

## 2. BİNALARIN DEPREM GÜVENLİĞİ (SEISMIC SAFETY OF BUILDINGS)

Bir yapının tasarımı, genel olarak güç tükenmesi durumunda yeterli güvenliğin sağlanması ve kullanım durumunda kararlılık, çatlama ve yer değiştirme için sınırlayıcı şartların sağlanması olarak tanımlanabilir. Yapıda büyük hasarların ve toptan göçmenin önlenmesi, taşıyıcı sistemin yatay yük dayanımının büyük bir kısmını büyük elastik ötesi yer değiştirmelerle devam ettirebilmesi ile mümkündür [18].

Belirli bir deprem etkisi altında, bir binada oluşabilecek hasarların düzeyine ve dağılımına bağlı olarak belirlenen yapı güvenliği durumu performans olarak tanımlanmaktadır. Mevcut binaların deprem performansının belirlenebilmesi için DBYBHY [1], doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlerin kullanımını önermektedir. Doğrusal elastik yöntem kuvvet esaslı iken, doğrusal elastik olmayan yöntem şekil değiştirme esaslıdır.

Doğrusal elastik olmayan yöntemde, lineer olmayan malzemenin yapılmış sistemlerde, artan dış yükler altında iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırı aşmakta ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. DBYBHY [1]'de, plastik şekil değiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli bölgelerde toplandığı ve bu bölgeler dışında sistemin elastik davrandığı varsayılır. Bu varsayımı "yığılı plastik davranış hipotezi" denir (Şekil 1).



Şekil 1. Yığılı plastik davranış yaklaşımı (Lumped plastic hinge approach)

Bu hipotez uyarınca kiriş, kolon ve perde türü taşıyıcı sistem elemanlarındaki plastik şekil değiştirmelerin, iç kuvvetlerin kapasitelerine eriştiği belli bölgelerde düzgün yayılı biçimde meydana geleceği varsayılabilir. Eğilme davranışının hakim olmasından ötürü bu bölge “plastik mafsal boyu” ( $L_p$ ) olarak adlandırılır. DBYBHY [1]’de verilen esaslara göre plastik mafsal boyu uzunluğu ( $L_p$ ), çalışan doğrultudaki kesit boyutu ( $h$ )’nin yarısına eşit alınmaktadır ( $L_p=0.5h$ ). Kolon ve kirişlerde plastik mafsal net açıklıklarının uçlarına yerleştirilirken, perdelerde her katta alt ucuna yerleştirilir.

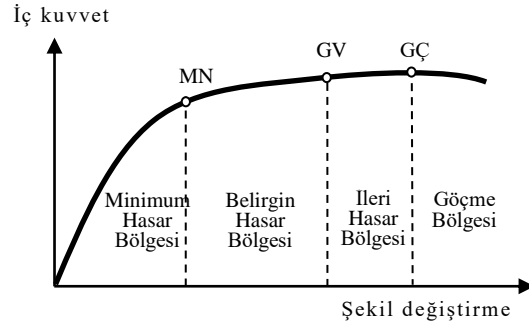
Doğrusal elastik olmayan çözümlemede binanın performans seviyesini belirleyebilmek için, öncelikle binanın hedef yerdeğiştirme istemi hesaplanır. Bina bu tepe yerdeğiştirme istemi seviyesindeki eleman kesitlerine ait belirlenen beton ve donatı şekildeğiştirme değerleri yönetmelikte verilen sınır değerlerle kıyaslanarak elemanın hasar seviyesine karar verilir. DBYBHY [1]’de, plastik şekildeğiştirmelerin hasar seviyesi için izin verilen üst sınırları Denklem (1), (2) ve (3)’teki gibi tanımlanmaktadır.

$$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 ; (\epsilon_s)_{MN} = 0.01 \quad (1)$$

$$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 ; (\epsilon_s)_{GV} = 0.040 \quad (2)$$

$$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 ; (\epsilon_s)_{GC} = 0.060 \quad (3)$$

Bu denklemlerde verilen değerler sırasıyla, beton basınç birim şekildeğiştirmesinin (kısılması) ve donatı çeliği birim şekildeğiştirmesinin (kısılması ve uzaması) üst sınırlarını temsil etmektedir. Burada MN minimum hasar sınırını, GV güvenlik hasar sınırını, GÇ göçme hasar sınırını,  $\rho_s$  kesitte mevcut olan,  $\rho_{sm}$  ise kesitte bulunması gereken enine donatının hacimsel oranını göstermektedir. Taşıyıcı elemanlarda hesaplanan şekildeğiştirmelerin, sınır değerler ile karşılaştırılması sonucunda, kesitlerin hangi hasar bölgelerinde olduğuna karar verilmektedir (Şekil 2).

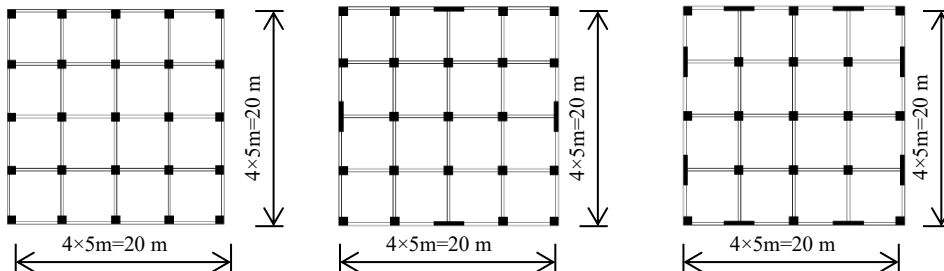


Şekil 2. Eleman hasarının belirlenmesi (Determination of element damage)

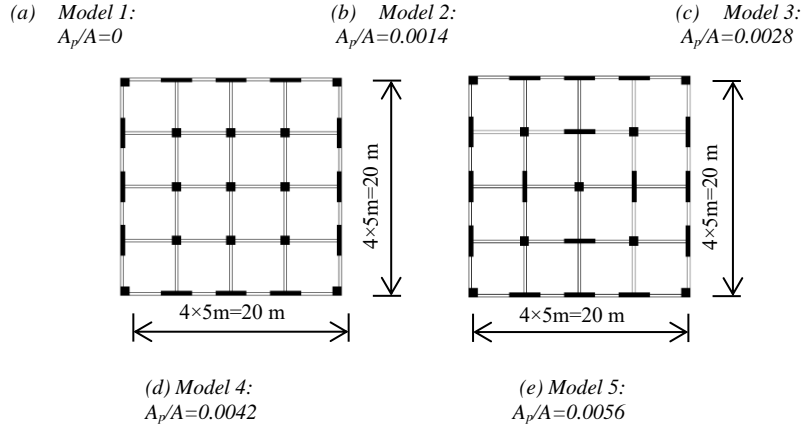
Binanın performans seviyesi, tepe yerdeğiştirme istemi seviyesinde taşıyıcı elemanlarda tanımlanan hasar seviyelerine göre belirlenir. Bina deprem güvenliğinin yeterli olup olmadığına çözümlemelerden elde edilen performans seviyesinin hedef bina performansı ile kıyaslanması ile karar verilir.

### 3. MODEL BİNALARIN İNCELENMESİ (INVESTIGATION OF MODEL BUILDINGS)

Perde duvar miktarı değişiminin betonarme bina performansına etkisini incelemek amacıyla Şekil 3(a)’da görülen sekiz katlı konut türü betonarme çerçevesel bina model olarak seçilmiştir. Model bina üzerine farklı miktarlarda perde duvar yerleştirilerek perdeli-çerçevesel model binalar oluşturulmuştur (Şekil 3(b)-(e)). Model binadaki perde duvar oranı ( $A_p/A$ ), kat içerisindeki bir doğrultudaki perde alanının kat alanına oranı olarak elde edilmiştir.

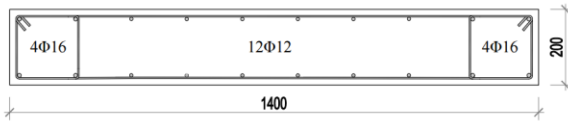






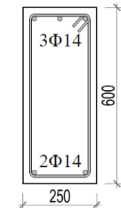
Şekil 3. Betonarme çerçevesel ve perdeli-çerçevesel bina modelleri (RC framed and dual building models)

Perde duvarlar her iki doğrultuda ve simetrik olarak yerleştirilmiştir. Perde duvar oranı, model bina üzerine perde ilave edilerek değiştirilmiştir. Tüm modellerde perde boyutları DBYBHY [1]'de verilen en küçük boyutları sağlayacak şekilde 200×1400 mm olarak dikkate alınmıştır.

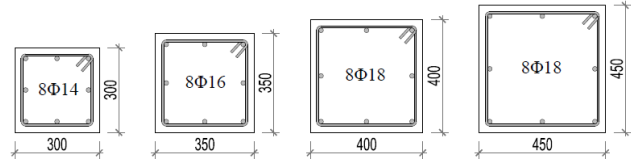


Şekil 4. Perde duvarın kesit özellikleri (Cross section properties of shear wall)

Model binalarda çerçeve açıklığı 5 m, kat yüksekliği ise 3 m olarak seçilmiştir. Kiriş boyutları tüm modellerde aynı ve 250×600 mm'dir (Şekil 5a). Kirişlerdeki mesnet üst donatısı 3Φ14, alt donatısı ise 2Φ14 olarak dikkate alınmıştır. Kolon boyutları kat içerisinde ve tüm katlar boyunca aynı olacak şekilde seçilmiştir. Oluşturulan model bina çözümleri kolon boyutlarının 300×300 mm, 350×350 mm, 400×400 mm, 450×450 mm olması durumları için tekrarlanmıştır. Kolonlara ait donatı oranı %1-1.2 arasında seçilmiştir. Kolonlara ait donatı yerleşim krokisi Şekil 5.b'de gösterilmiştir. Çözümlemelerde C20 beton ve S420 donatı sınıfı esas alınmıştır. Analiz yöntemi olarak eşdeğer deprem yükü yöntemi seçilmiştir. Deprem yükü; 1. derece deprem bölgesi, Z4 yerel zemin sınıfı için hesaplanmıştır.



(a) Kiriş kesiti

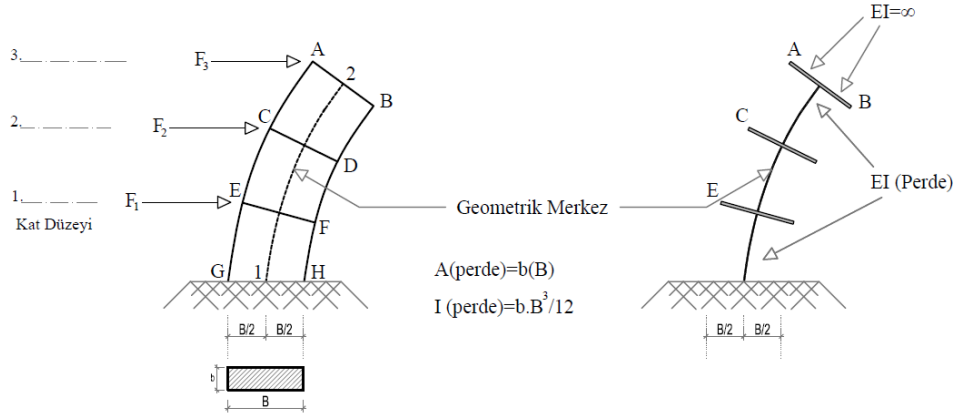


(b) Kolon kesitleri

Şekil 5. Kiriş ve kolonların kesit özellikleri (Cross section properties of beam and columns)

Büyük oranda kesme kuvveti taşıyan betonarme perde duvarlar yapısal analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği için, perde duvarların doğru bir şekilde modellenmesi bina türü yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan çözümleri açısından büyük önem taşımaktadır [19]. Perde duvarların modellenmesinde kullanılan en yaygın yöntem geniş kolon analogisidir. Bu modelde, Şekil 6'da görüldüğü gibi perde elemanın geometrik merkezine dik olacak şekilde alınan her kesit içinde, düzlem kesitler düzlem olarak kalmaktadır. Yapılan çözümlemelerde bu davranışı yansıtabilmek için temel kotundan başlayarak yapı üst kotuna kadar uzanan sürekli perdenin çerçeve ile birleşim düzeylerinde düğüm noktaları oluşturulmuştur. Bu kat düzeylerinde, perde kesitinin düzlem kaldığı gözlemini yansıtabilmek için, uzunlukları perde kesit genişliğinin yarısına eşit (B/2) ve

eğilme rijitlikleri sonsuz olan ( $EI=\infty$ ) çubuk elemanlar kullanılmıştır [13].



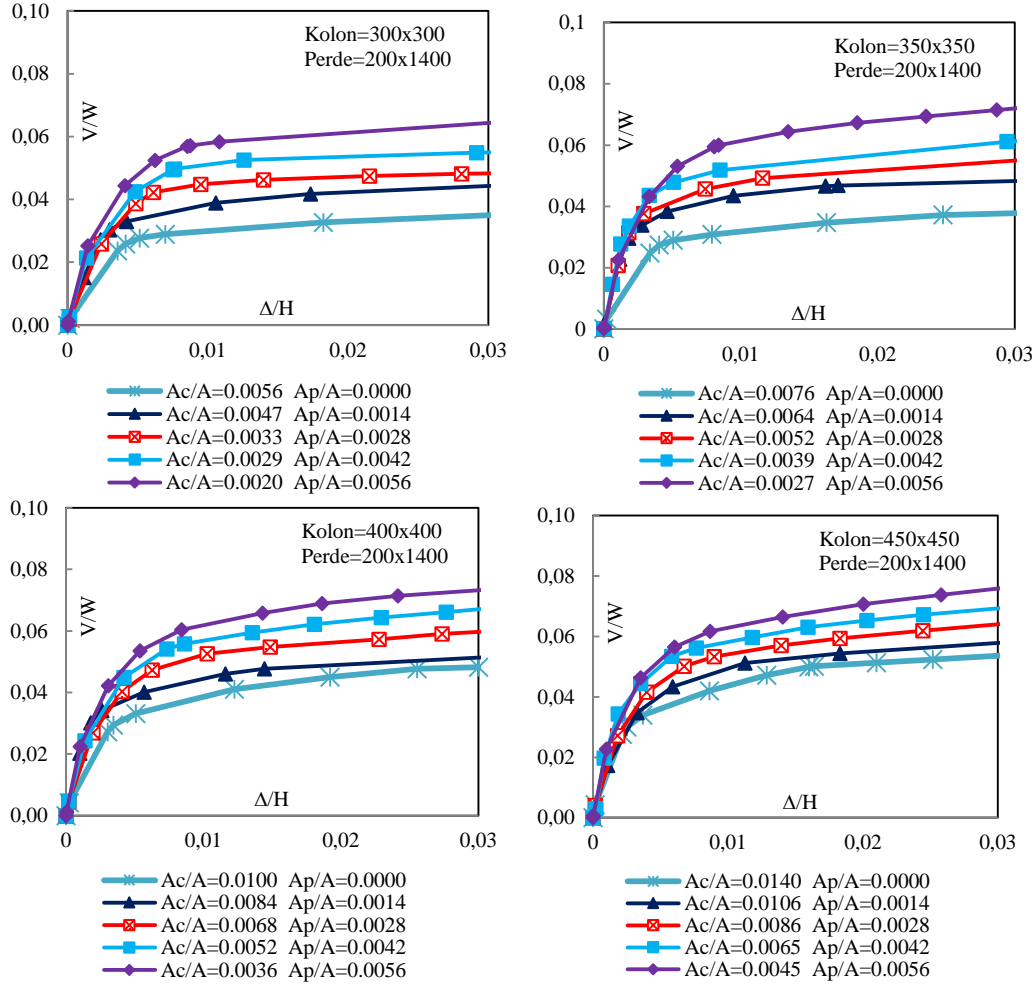
Şekil 6. Perde duvarın eşdeğer matematik modeli [13] (Equivalent mathematical model of shear wall)

Taşıyıcı sistemin matematik modeli oluşturulurken kolon ve kirişler çubuk eleman olarak, perde elemanlar ise geniş kolon analogisi ile modellenmiştir. Kolon ve perde elemanlara  $PM_2M_3$ , kirişlere ise  $M_2$  ve  $M_3$  mafsalları atanmıştır. Kolon ve kirişlerde plastik mafsallar net açıklıklarının uçlarına yerleştirilirken, perde elemanın her katta alt ucuna yerleştirilmiştir. Mafsal özelliklerinin tanımlanmasında Betonarme Elemanlarda Sargı ve Modelleme (BESAM) [20] programı kullanılmıştır. BESAM, DBYBHY [1]' in yedinci bölümünde verilen esasları göz önüne alarak betonarme eleman kesit hesaplamalarını yapan Fortran dilinde bir bilgisayar yazılımıdır. Bu programda Mander sargılı beton modeli kullanılarak kesite ait moment-eğrilik, moment-dönme, normal kuvvet-eğilme momenti kapasite ilişkileri elde edilebilmektedir. Elemanlara ait kesit ve malzeme özellikleri, donatı çapı ve düzeni tanımlandıktan sonra program çalıştırılarak, mafsalların tanımlandığı bir dosya hazırlanabilmektedir. Elemanlara ait plastik mafsallar, bu dosyanın SAP 2000 [21] analiz programına tanıtılması ile oluşturulmuştur.

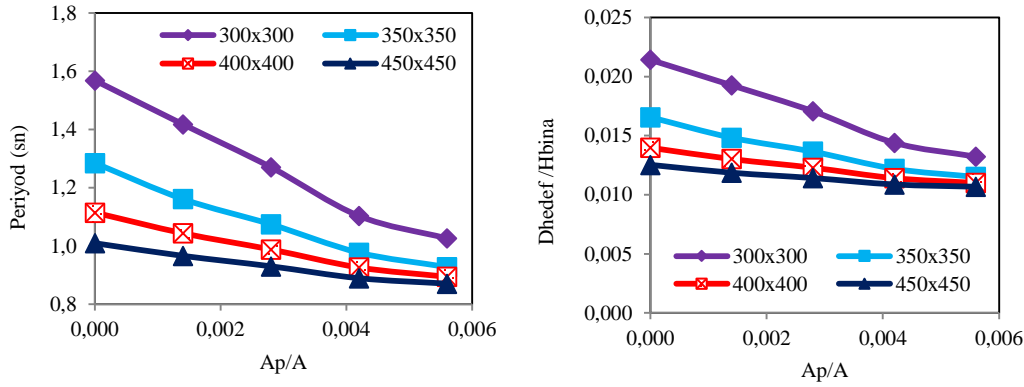
Her bir model bina için, SAP 2000 [21] analiz programı yardımıyla yapılan doğrusal elastik olmayan yöntem çözümlerinden elde edilen kapasite eğrileri boyutsuzlaştırılarak Şekil 7'de verilmiştir. Her bir model

binada perde duvarın adedi ve/veya kolon elemanların boyutu değişmektedir. Bu nedenle grafikler herbir kolon boyutu grubu için kolon alanının kat alanına oranı ( $A_c/A$ ) ve perde duvarların toplam alanının kat alanına oranı ( $A_p/A$ ) parametrelerine bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde perde duvar ilavesi ile binanın yatay yük taşıma kapasitesinin ve ötelenme rijitliğinin önemli derecede artış gösterdiği görülmektedir. Özellikle kolon boyutunun küçük olduğu modellerde bu artış çok daha fazla ortaya çıkmaktadır.

DBYBHY [1]'de verilen doğal periyod hesabı yapının ötelenmesine bağlı olarak verilmektedir. Ötelenme ise yapının rijitliği ile doğrudan ilişkilidir. Model binalardaki doğal periyodun ve hedef tepe yerdeğiştirme istemi/bina yüksekliği ( $\Delta_{\text{hedef}}/H_{\text{bina}}$ ) oranının perde duvar miktarına bağlı olarak değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, beklendiği gibi hedef yerdeğiştirme istemi ile periyodun değişiminin benzeştiği görülebilir. Bunun yanı sıra plan içerisindeki kolon boyutları büyüdükçe perde duvar yerleşiminin periyod ve tepe yerdeğiştirme istemi üzerindeki etkisinin azaldığı söylenebilir.



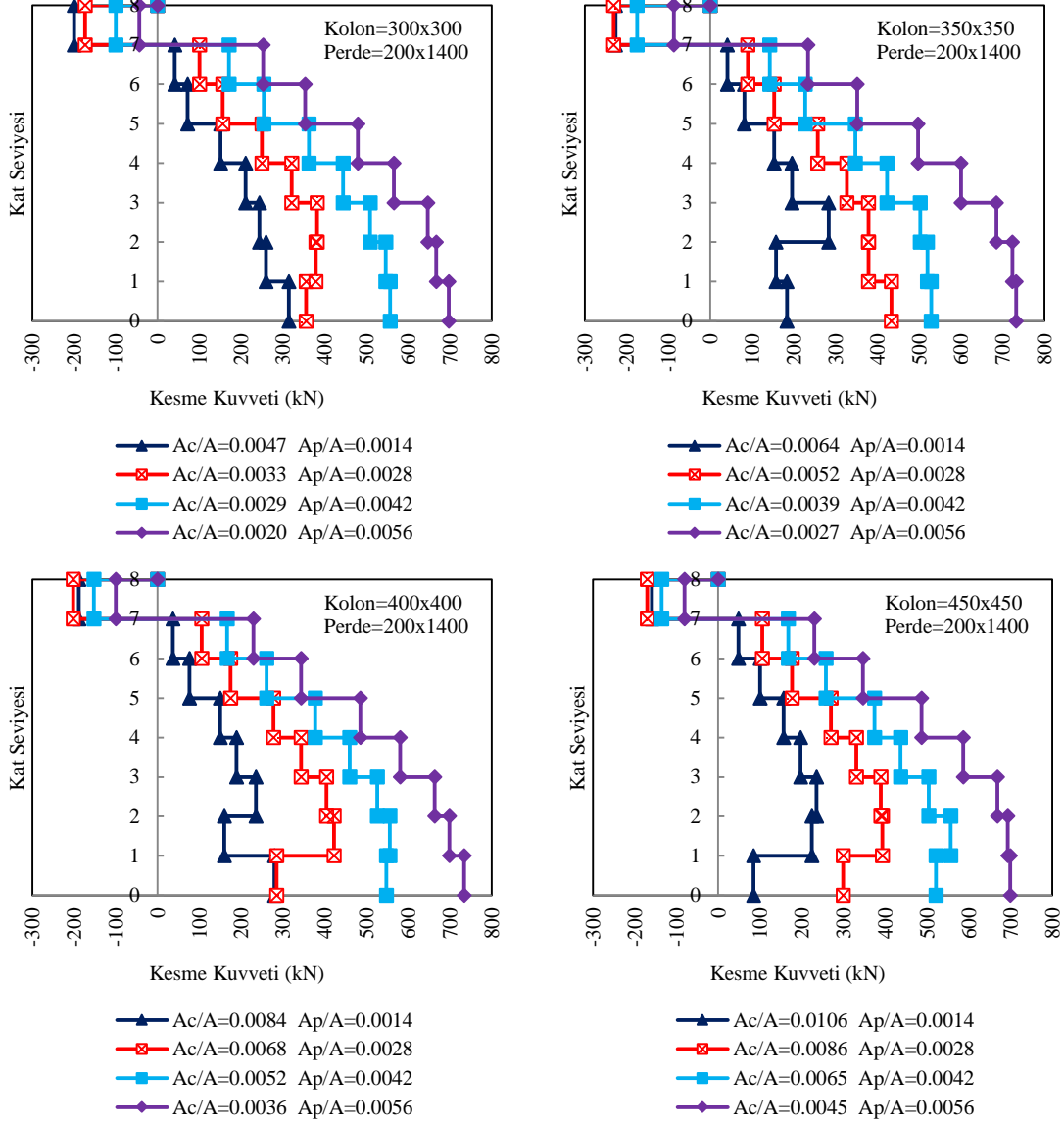
Şekil 7. Model binalara ait kapasite eğrileri (Capacity curves of model buildings)



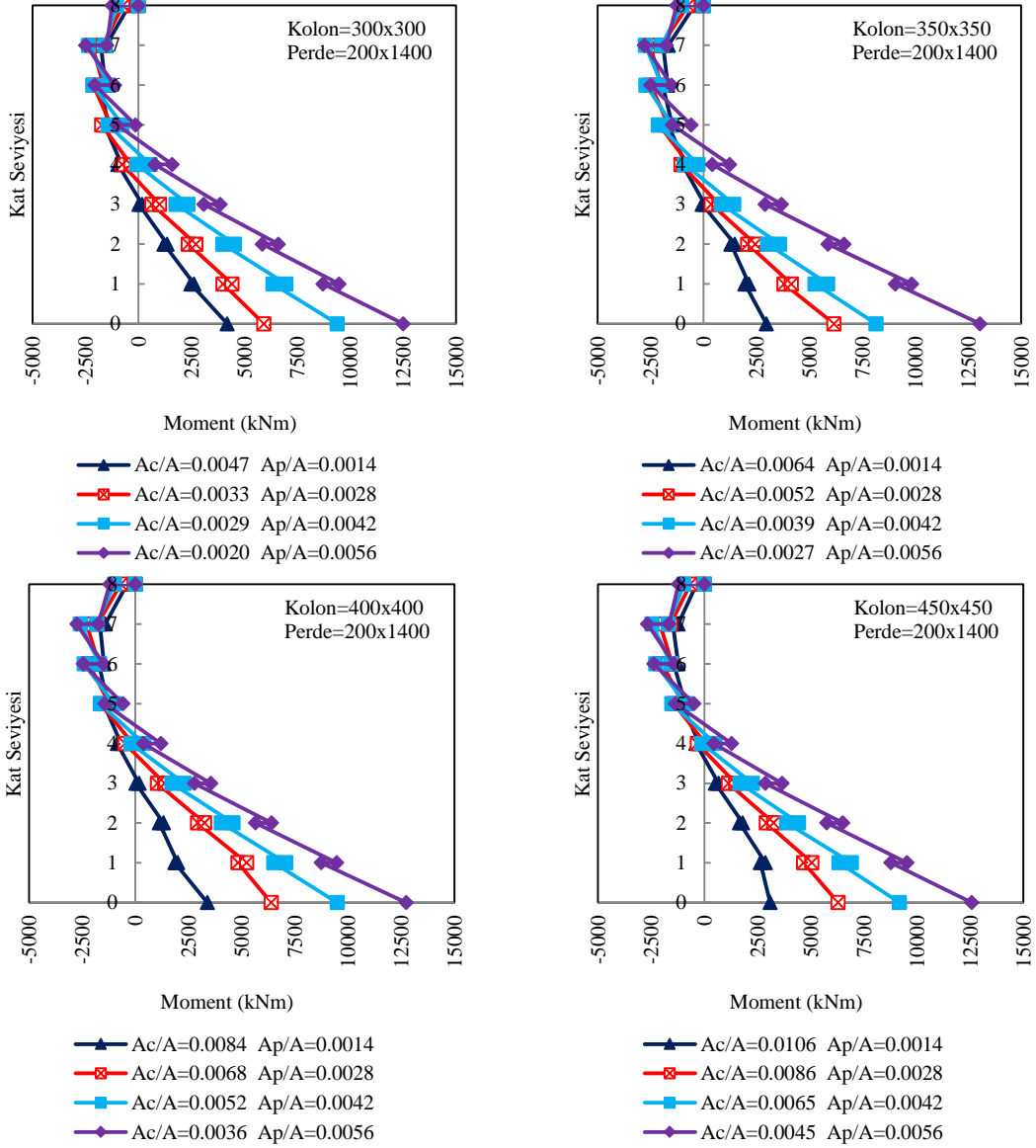
Şekil 8. Perde duvar oranının periyoda ve hedef yerdeğiştirme istemi/bina yüksekliği oranına etkisi (The effects on fundamental period and  $\Delta/H$  ratio of shear wall ratio)

Her bir model bina için hedef yerdeğiştirme istemi seviyesindeki tüm perdelerde oluşan toplam kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin kat seviyesine

bağlı olarak dağılımları sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Bir doğrultudaki perdeler için toplam kesme kuvveti dağılımı (Total shear force distribution of shear wall in one direction)



Şekil 10. Bir doğrultudaki perdeler için momentlerin katlara göre değişimi (Moment distribution of shear wall in one direction according to stories)

Yapılan doğrusal olmayan analizlerden her bir bina modeli için; hedef yerdeğiştirme seviyesindeki binanın taşıyabileceği kesme kuvveti kapasitesi ve bu seviyedeki bir doğrultudaki perde duvarların taşıdığı kesme kuvvetleri toplamı belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak temel kotu seviyesindeki perdelerin taşıdığı kesme kuvvetinin yüzdesi hesaplanmış ve Tablo 1’de verilmiştir. Sonuçlardan, kolon boyutlarının artması

durumunda perdenin taşıdığı kesme kuvvetinin yüzdesinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu tabloda çerçevesel bir binaya perde duvar yerleştirilmesi durumunda kesme kapasitesindeki artış yüzde değerleri de verilmiştir. Kolon boyutunun küçük olması durumunda perde duvar yerleştirilmesi kesme kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde çok daha etkili olmaktadır.



Tablo 1. Hedef yerdeğiştirme istemi seviyesindeki kesme kuvvetlerinin dağılımı (Shear force distribution in target displacement)

Model Numarası / Kolon boyutu	$A_c/A$	$A_p/A$	$V_{bina}$ (kN)	$V_{bina}$ artış %	$V_{perde}$ (kN)	$V_{perde}/V_{bina}$ (%)
Model 1-300×300	0.0056	0.0000	1066	-	-	-
Model 2-300×300	0.0047	0.0014	1347	26	313	23
Model 3-300×300	0.0034	0.0028	1496	40	355	24
Model 4-300×300	0.0029	0.0042	1690	59	556	33
Model 5-300×300	0.0020	0.0056	1890	77	697	37
Model 1-350×350	0.0077	0.0000	1111	-	-	-
Model 2-350×350	0.0064	0.0014	1468	32	183	12
Model 3-350×350	0.0052	0.0028	1593	43	433	27
Model 4-350×350	0.0040	0.0042	1710	54	529	31
Model 5-350×350	0.0028	0.0056	2005	80	732	37
Model 1-400×400	0.0100	0.0000	1345	-	-	-
Model 2-400×400	0.0084	0.0014	1500	12	280	19
Model 3-400×400	0.0068	0.0028	1713	27	285	17
Model 4-400×400	0.0052	0.0042	1852	38	548	30
Model 5-400×400	0.0036	0.0056	2008	49	733	37
Model 1-450×450	0.0141	0.0000	1495	-	-	-
Model 2-450×450	0.0106	0.0014	1648	10	84	5
Model 3-450×450	0.0086	0.0028	1763	18	299	17
Model 4-450×450	0.0066	0.0042	1886	26	521	28
Model 5-450×450	0.0046	0.0056	2030	36	699	34

Her bir bina modeli için hedef tepe yerdeğiştirme istemi belirlenmiş daha sonra bu seviyedeki tüm taşıyıcı elemanların hasar dağılımları dikkate alınarak bina performans seviyeleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Tablo 2'de hasara bağlı olarak birinci kat düşey taşıyıcı elemanların hedef yerdeğiştirme seviyesindeki kesme kuvveti dağılımının yüzdeleri ve bina performans seviyeleri verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde perde duvarın yerleştirilmesi ile kolon elemanlardaki hasar yüzdelerinin azaldığı, bina performansının arttığı, ancak kolon boyutunun büyümesiyle perde duvarın etkisinin daha sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür. Tabloda belirtilen HK, Hemen Kullanım; CG, Can Güvenliği; GÖ, Göçme Öncesi; GD, Göçme Durumu performans seviyelerini ifade etmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada çerçevesel betonarme sekiz katlı bir bina üzerinde farklı oranlarda perde duvar yerleştirilerek, her bir bina modelinin performans seviyeleri doğrusal elastik

olmayan değerlendirme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Perde duvarlı binaların kesme kuvveti kapasitesinin tamamen çerçevesel binaya göre artış yüzdeleri, 300×300 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 26 ile % 77, 350×350 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 32 ile % 80, 400×400 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 12 ile % 49, 450×450 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda ise % 10 ile % 36 arasında değişmektedir.
2. Perde duvar oranının ( $A_p/A$ ) artmasıyla binaya ait yatay yük taşıma kapasitesi %80'e kadar artış göstermektedir. Bu artış oranı kolon boyutunun büyümesiyle %36'ya kadar azalmaktadır. Dolayısıyla kolon boyutu büyüdükçe, perde duvarın miktarındaki artış oranının bina kesme kapasitesi üzerindeki etkisi azalmaktadır.

Tablo 2. Model binaların performans seviyeleri (Performance levels of model buildings)

Model numarası /Kolon boyutu	A <sub>c</sub> /A	A <sub>p</sub> /A	A <sub>c</sub> /A + A <sub>p</sub> /A	Performans seviyesi	Kesme kuvveti dağılım yüzdeleri			
					Minimum Hasar	Belirgin Hasar	İleri Hasar	Göçme Bölgesi
Model 1-300×300	0.0056	0.0000	0.0056	GD	0	0	0	100
Model 2-300×300	0.0047	0.0014	0.0061	GD	0	40	40	20
Model 3-300×300	0.0034	0.0028	0.0062	GD	24	0	72	4
Model 4-300×300	0.0029	0.0042	0.0071	GÖ	64	0	36	0
Model 5-300×300	0.0020	0.0056	0.0076	HK	100	0	0	0
Model 1-350×350	0.0077	0.0000	0.0077	GD	0	0	0	100
Model 2-350×350	0.0064	0.0014	0.0078	GD	8	0	88	4
Model 3-350×350	0.0052	0.0028	0.0080	GD	84	0	12	4
Model 4-350×350	0.0040	0.0042	0.0082	CG	88	0	12	0
Model 5-350×350	0.0028	0.0056	0.0084	HK	100	0	0	0
Model 1-400×400	0.0100	0.0000	0.0100	GD	72	0	0	28
Model 2-400×400	0.0084	0.0014	0.0098	GÖ	72	0	28	0
Model 3-400×400	0.0068	0.0028	0.0096	HK	100	0	0	0
Model 4-400×400	0.0052	0.0042	0.0094	HK	100	0	0	0
Model 5-400×400	0.0036	0.0056	0.0092	HK	100	0	0	0
Model 1-450×450	0.0141	0.0000	0.0141	HK	100	0	0	0
Model 2-450×450	0.0106	0.0014	0.0120	HK	100	0	0	0
Model 3-450×450	0.0086	0.0028	0.0114	HK	100	0	0	0
Model 4-450×450	0.0066	0.0042	0.0108	HK	100	0	0	0
Model 5-450×450	0.0046	0.0056	0.0102	HK	100	0	0	0

1. Perde duvar oranının ( $A_p/A$ ) artmasıyla doğal periyod ve hedef yerdeğiştirme istemi değerleri azalmaktadır. Kolon boyutunun küçük olması durumunda perde duvar oranı artışının bu parametreler üzerindeki etkisi çok daha belirgin olmaktadır.
2. Perde duvar oranı ( $A_p/A$ ) ile doğal periyod ilişkisinde,  $A_p/A$  oranının 0.004 değerinden sonra grafiklerin yataya yaklaştığı ve kolon boyutlarının değişiminin etkisinin azaldığı görülebilir. Aynı yorumlar hedef yerdeğiştirme istemi için de söylenebilir.
3. Hedef yerdeğiştirme istem seviyesinde perde duvarların taşıdığı kesme kuvveti; beklendiği gibi perde duvar oranı ile artmaktadır. Bina en üst katında çerçevenin etkisiyle negatif kesme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır.
4. Perdelerin taşıdığı kesme kuvveti alt kata doğru büyümektedir. Ancak perdelerin mafsallaşması ile birlikte perde duvar üzerindeki kesme kuvveti azalmakta ve alt katta üst kattan daha küçük kesme kuvveti değerleri ortaya çıkabilmektedir.
5. Hedef yerdeğiştirme istemi seviyesinde perde duvarların taşıdığı toplam moment değerleri, perde duvar oranı ile artmaktadır.
6. Hedef yerdeğiştirme istem seviyesinde perde duvarların taşıdığı kesme kuvvetleri toplamının binanın toplam kesme kapasitesine oranı; 300×300 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 23 ile % 37, 350×350 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 12 ile % 37, 400 mm×400 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda % 19 ile % 37, 450 mm ×450 mm<sup>2</sup> kolon alanına sahip binalarda ise % 5 ile % 34 arasında değişmektedir.
7. Çerçevesiz bina modeli üzerine yerleştirilen perde duvarların; bina performansını artırdığı, düşey taşıyıcı elemanlarda oluşan hasarı ve hasara bağlı olarak ortaya çıkan kesme kuvveti dağılım yüzdesini azalttığı görülmüştür.
8. Literatürdeki bazı çalışmalarda [14-17], orta katlı betonarme binalarda kullanılması gereken

perde duvar oranının en az % 1.0 olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu oran Atımtay [13] tarafından bina kat adedine bağlı olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada ise, sekiz katlı bina modeli üzerinde bina deprem performans seviyesine bağlı olarak gerekli perde duvar oranının belirlenmesinde kat alanı yanında kolon boyutlarının etkisi incelenmiştir.

9. Hemen Kullanım “HK” performans seviyesi;  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  ve  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  kolon alanına sahip modellerde perde duvar oranı 0.0056,  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  kolon alanına sahip modellerde perde duvar oranı 0.0028,  $450 \times 450 \text{ mm}^2$  kolon alanına sahip modellerde perde duvarsız binalarda sağlanmıştır. Perde duvarın plana bu oranlardan fazla yerleştirilmesi, bina performansının artırılması veya hasara bağlı kesme kuvveti dağılımının azalmasında önemli bir etkinlik sağlamamaktadır. Elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde; yerleştirilmesi gereken perde duvar miktarının belirlenmesinde, plandaki kolon boyutlarının da son derece etkili olduğu görülebilir.

#### 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya 4214-YL1-14 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (SDÜ-BAP) teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [2] S. Erken, “Betonarme yapıların taşıyıcı sistem seçiminde perde yerleşiminin davranışa etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [3] H. Şahin, K.E. Alyamaç, .S. Erdoğan, “Perdeli çerçeve yapılarında zemin sınıfı ve kat adedi dikkate alınarak gerekli perde oranının tespiti”, SDU International Technologic Science, 5(1), 74-86, 2013.
- [4] B. Yön, H. Şahin, “Çok katlı betonarme binalarda zemin sınıfına göre deprem perdesi oranının tespiti”, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2), 2009.
- [5] M.S. Körlü, İ.Ö. Deneme, Yerli H.R., “Betonarme yapıların perde takviyesi ile güçlendirilmesi”, Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19(1), 149- 157, 2004.
- [6] S. Aktan, N. Kırac, “Betonarme binalarda perdelerin davranışa etkileri”, Eskişehir

- Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(1), 15-32, 2010.
- [7] E. Aracı, “Betonarme perde konumlarının bina deprem performansına olan etkisinin bilgisayar destekli irdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [8] A. Karaduman, M.S. Döndüren, “Çok katlı betonarme yapıların dinamik analizi”, Türkiye Mühendislik Haberleri, 432/4, 55-62, 2004.
- [9] M.S. Döndüren, A. Karaduman, “Çok katlı binaların deprem analizi”, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, 6(1), 31-41, 2007.
- [10] T. Öztürk, “Betonarme binalarda deprem perdelerinin yerleşimi ve tasarımı”, İMO İstanbul Şubesi, Mesleki Eğitim Kursları, 2005.
- [11] Ö. Avşar, Ö. Yurdakul, O. Tunaboyu, “Betonarme perde duvar oranının binaların sismik performansına etkisi”, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül, Hatay, 2013.
- [12] T. Uçar, S.G. Toumatari, Y. Ertutar, “Çerçeve düzlemi içinde eklenen perdelerin betonarme binaların yapısal özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3(1), 56-68, 2014.
- [13] E. Atımtay, “Çerçeve ve Perdeli Betonarme Sistemlerin Tasarımı: Temel Kavramlar ve Hesap Yöntemleri”, Bizim Büro, Ankara, 2001.
- [14] H. G. Çömlekoğlu, “Effect of shear walls on the behavior of reinforced concrete buildings under earthquake loading”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2009.
- [15] B. Burak, H. G. Çömlekoğlu, “Effect of shear wall area to floor area ratio on the seismic behavior of reinforced concrete buildings”, Journal of Structural Engineering, 139(11), 1928-1937, 2013.
- [16] A. O. Günel, “Influence of the shear wall area to floor area ratio on the seismic performance of existing reinforced concrete buildings”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2013.
- [17] H. Tekel, “Betonarme yapılarında % 1 oranında perde kullanımının değerlendirilmesi”, TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, 444, 57-63, (2006).
- [18] Z. Celep, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 2015.
- [19] Y.M. Fahjan, Başak, K., J. Kubin, M.T. Tan, “Perdeli betonarme yapılar için doğrusal olmayan analiz metotları”, 7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 30 Mayıs-3 Haziran, İstanbul, 2011.

- [20] BESAM, Betonarme Elemanlarda Sargı ve Modelleme Programı, Tübitak 111M119, 2013.
- [21] SAP 2000, Computers and Structures, Inc., v.15.0.0, Structural Analysis Program, Berkeley, CA, USA, 2011.

## İkili yanıt değişkenine sahip modellerin yeterliliklerine ilişkin benzetim çalışması – parametrik olmayan yöntemler

Betül Kan Kılınç<sup>1\*</sup>, Mustafa Çavuş<sup>2</sup>

22.06.2016 Geliş/Received, 23.11.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.297002

### ÖZ

Regresyon modelleri; birçok açıklayıcı değişkenin önemini ortaya koyabilmek için tahmin, sınıflama, ve analitik veri araçlarını kullanarak, veri analizinde etkili bir rol oynamaktadır. Oldukça basit olmasına rağmen klasik doğrusal model, gerçek hayattaki örneklerin doğrusal olmaması nedeniyle sıkça yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, çoklu doğrusal regresyon analizi varsayımlarından biri olan; bağımlı değişkenin açıklayıcı değişkenler ile arasındaki ilişkinin belli bir matematiksel forma uymasının zorunlu olmadığı parametrik olmayan bir değerlendirme süreci ele alınacaktır. Bu anlamda bağımlı değişkenin iki düzeyli değerler aldığı, daha çok neden-sonuç ilişkilerinin ortaya koyulması amacıyla kullanılan klasik lojistik regresyon modelinin yerine, bağımlı değişken ile açıklayıcı değişkenlerin aralarında var olan ilişki bir benzetim çalışması kapsamında; genelleştirilmiş doğrusal model, toplamsal lojistik regresyon model ve karar ağaçları ile incelenecektir. Benzetim çalışmasında söz konusu olan yöntemler ile küçük, orta ve büyük ölçekli veri kümelerinde çoklu bağlantının etkileri incelenecek ve bu yöntemler birbirleriyle karşılaştırılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** toplamsal modeller, lojistik regresyon, toplamsal lojistik regresyon

## Comparative simulation study for model adequacy with binary response variable under multicollinearity – nonparametric approaches

### ABSTRACT

Regression models used to explore the importance of several explanatory variables in estimation, classification and analytical tools play an efficient role for many data analysis. Although the classical linear model is quite easy to use, it is often not sufficient for many real data sets as the relationships between variables do not hold the assumption of the linearity of the relationship between dependent and explanatory variables. Under this study, a nonparametric model fitting that does not require to form a strict mathematical relationship between dependent and explanatory variables will be discussed on the contrary the assumption in multiple linear regression. In this study, the relationship between a binary dependent variable and the explanatory variables will be examined in a conducted simulation study by using generalized linear, the additive logistic regression in case of classical logistic regression model and decision trees to explore the cause and effect relationship. The methods in question and the simulation study will be performed for small, medium and large data sets when multicollinearity problem exists and will be compared with each other.

**Keywords:** additive models, logistic models, additive logistic models

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Eskişehir - bkan@anadolu.edu.tr

<sup>2</sup> Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Eskişehir - mustafacavus@anadolu.edu.tr



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Açıklayıcı değişkenler arasında çoklu bağlantı sorununun varlığı durumunda sıradan en küçük kareler (EKK) yönteminin kullanımının sakıncaları literatürde oldukça yaygın olarak işlenmiştir [1]. Benzer şekilde lojistik regresyon için de bazı sakıncalar söz konusudur. Bu durumu ortadan kaldırmak için kullanılacak yöntemler (modelden değişken çıkarmak, birkaç değişkeni bir indeks olarak ifade etmek, örneklem hacmini büyütme vs) doğrusal regresyonda olduğu gibidir. Bu çalışmada benzer durumlar için klasik lojistik regresyon kullanmak yerine, bağımlı değişkeni açıklamak üzere toplamsal lojistik regresyon ile daha esnek bir model oluşturulacaktır. Bu modeller karar ağaçları algoritmaları ile karşılaştırılacaktır.

Bağımlı değişkenin ikili değerler aldığı ve değişkenler arasında çoklu bağlantının gözlemlendiği pek çok uygulama çalışmasına literatürde rastlanılabilir. Bunların arasında örneğin Shen ve ark. (2008) çalışmasında lojistik regresyon modellerinde çoklu bağlantı problemi söz konusu olduğunda en çok olabilirlik tahmininin yanı sıra hatta bazen sonuç vermemesi nedeniyle geliştirilmiş modellerde cezalı en çok olabilirlik yöntemi ile ridge regresyon yaklaşımını kullanmışlardır [2]. Çalışmanın uygulama kısmında Alzheimer rahatsızlığını ve bunamayı (demans) ortaya koymada yardımcı olan 33 soruluk bir testten alınan yanıtlar üzerinde bir çalışma yapılmıştır ve lojistik regresyon modellerinde çoklu bağlantı problemi söz konusu olduğunda çift cezalı en çok olabilirlik tahmini yönteminin, klasik en çok olabilirlik yönteminden daha iyi bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kaşko (2007), çalışmasında bağımlı değişken ile aralarında farklı düzeylerde ilişki bulunan açıklayıcı değişkenlerin yer aldığı lojistik regresyon modellerinin, Tip I hata olasılığını ve testin gücünü birbirleriyle karşılaştırarak çoklu bağlantı problemlerinden nasıl etkilendiklerini bir benzetim çalışması yardımıyla göstermiştir. Çalışmanın sonucunda çoklu bağlantı probleminin varlığı durumunun, tüm örneklem genişliklerinde Tip 1 hatasını değiştirmezken, testin gücünü büyük ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir [3]. Kovalchi ve ark. (2013) çalışmasında toplamsal lojistik modellerin genişletilmiş hali olan toplamsal binom modellerini tanıtmış ve mesane kanseri üzerine bir uygulama yapmıştır. Çalışma boyunca R programının “blm” paketinden yararlanılmış ve paket ile dahilindeki kodlar detaylı olarak tanıtılmıştır [4]. Ma ve ark. (2014)’nin çalışmasında, doğrusal model durumunda anlamlı bulunmayan sürücü yaşı değişkeninin trafik kazalarında çarpma ya da çarpılan taraf olma üzerine etkisinin olup olmadığı durumu, kübik splayn düzeltmesi kullanılarak toplamsal lojistik regresyon model ile incelenmiştir. İnceleme sırasında sürücü yaşı değişkeni anlamlı bir

etkiye sahip olup, sürücü yaşı küçüldükçe çarpma (hatalı) taraf olma olasılığının arttığı gözlemlenmiştir [5].

Bu çalışmada, çoklu bağlantının varlığında, genelleştirilmiş doğrusal model, toplamsal lojistik regresyon model ve sınıflandırma ağaçlarının bir benzetim çalışması ile karşılaştırılması söz konusudur. Bu kapsamda çoklu bağlantının var olduğu durumlar söz konusuysa, küçük, orta ve büyük veri kümeleri için modellerin yeterliliğini, bahsedilen yöntemler yardımıyla ortaya koymak amaçlanmaktadır.

## 2. GENELLEŞTİRİLMİŞ TOPLAMSAL MODELLER (GENERALIZED ADDITIVE MODELS)

Regresyon modelleri; farklı girdilerin önemini ortaya koyabilmek için tahmin ve sınıflama araçlarını kullanarak bir çok veri analizi için önemli bir araç haline gelmiştir. Geleneksel doğrusal model  $E(Y | X_1, X_2, \dots, X_k) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k$  oldukça basit olmasına rağmen, gerçek hayattaki örneklerin doğrusal olmaması nedeniyle, daha esnek bir yaklaşım olan istatistiksel yöntemlerden “genelleştirilmiş toplamsal modeller” alternatif olarak kullanılabilir.

Regresyon düzeninde, bir genelleştirilmiş toplamsal model şu şekilde gösterilir;

$$E(Y | X_1, X_2, \dots, X_k) = u + f_1(X_1) + \dots + f_k(X_k) \quad (1)$$

Bilindiği gibi burada  $X_1, X_2, \dots, X_k$  değişkenleri bağımsız değişkenleri ve  $Y$  bağımlı değişkeni,  $f_i, i = 1, 2, \dots, k$  olmak üzere  $f_k$  düzelticileri fonksiyonları (parametrik olmayan) gösterir. Burada  $X_i$ ’nin keyfi olarak seçilen fonksiyonunun terimleri  $f_i(X_i)$ , doğrusal denklemdeki  $\beta_i X_i$  terimlerine karşılık gelir. Buradaki yaklaşımın farklılığı, her fonksiyona serpilme diyagramı düzleştiricisinin uydurulması ve bu şekilde her  $f_i$  fonksiyonunu tahmin etmektir [6].

Toplamsal modeller cezalandırılmış regresyon splaynları ile gösterilebilir ve cezalandırılmış en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir. Cezalandırılmış regresyon, klasik en küçük kareler yöntemine göre daha esnek olduğundan yanıt değişkeni ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi daha iyi bir şekilde açıklar. Regresyon eğrisinin oluşturulmasında cezalandırılmış regresyon modeli ceza terimi denilen yeni bir terim kullanılır:

$$\sum_{i=1}^n [Y_i - \vartheta(X_i)]^2 - \lambda \int_a^b [\vartheta''(X)]^2 dx \quad (2)$$

burada  $\lambda \int_a^b [\vartheta''(X)]^2 dx$  ceza terimini gösterirken,  $\lambda$  düzeltme parametresi ise hata ve değişkenlik arasındaki değişim oranını gösterir. Düzeltme parametresinin düşük

değerleri regresyon eğrisinin daha kıvrımlı olmasına neden olurken yüksek değerleri daha az kıvrımlı bir hale gelmesine neden olur.

$\lambda \rightarrow \infty$  iken regresyon eğrisi düz bir çizgi halini alırken,  $\lambda = 0$  olduğunda ise cezalandırılmamış regresyon eğrisi tahminine dönüşür. Cezalandırılmış regresyon,  $\vartheta$  fonksiyonunu regresyon eğrisi olarak Eşitlik (2) yardımıyla tahminleme sürecidir [7].

## 2.1. Düzeltici Fonksiyonlar (Smooth Functions)

Düzeltici fonksiyonlar geliştirilmiş toplamsal modellerde, bağımsız değişkenin bir fonksiyonu ile bağımlı değişkendirdeki değişkenliği açıklamaya çalışır. Düzeltici fonksiyonlar (smooth functions) splaynlar olarak da bilinir. Splaynlar, yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılır. Farklı düzelticiler olmasına rağmen, bu çalışma kübik düzeltirici ile sınırlandırılmıştır.

## 2.2. Kübik Splaynlar (Cubic Splines)

Kübik splaynlar (KS) en basit şekliyle farklı kübik polinomlardan oluşan bir eğri olarak tanımlanabilir.  $[X_i, X_{i+1}]$  aralığındaki polinomlardan oluşan  $[a, b]$  aralığını ele alalım. Burada  $x_i$  değerleri düğüm noktalarını göstermektedir.  $[a, b]$  aralığında tanımlanan  $f$  fonksiyonu eğer aşağıdaki iki koşulu sağlıyorsa kübik splayn olarak tanımlanır:

- Her bir  $[X_i, X_{i+1}]$  aralığında  $f$  kübik polinom olmalıdır.
- Her bir düğüm noktasında  $f$  fonksiyonu, birinci türevi ve ikinci türevi  $[a, b]$  aralığında sürekli olmalıdır.

Kübik splayn yapısına bir örnek aşağıdaki gibi verilebilir:

$$f(X) = a_1(X - X_i)^3 + a_2(X - X_i)^2 + a_3(X - X_i) + a_4 \quad (3)$$

$X_i \leq X \leq X_{i+1}$ ,  $a_1, a_2, a_3, a_4$  değerleri splayn fonksiyonun şeklini belirleyen sabitlerdir. Bu tür splaynı kullanmanın dezavantajı tahmin edilmesi gereken çok sayıda parametreye sahip olmasıdır [7].

## 3. TOPLAMSAL LOJİSTİK REGRESYON MODELİ (ADDITIVE LOGISTIC REGRESSION MODEL)

Yalnızca iki sınıf olarak ifade edilen modelleri, iki sınıfa ayırmak için lojistik regresyon modeli kullanılır [6]. İkili yanıt değişkeninin beklenen değerini  $\mu(X) = P((Y = 1)|X)$ , tahminleyiciler ile ilişkilendirirken, doğrusal bir model kurar ve logit bağlantı fonksiyonu olarak:

$$\log\left(\frac{\mu(X)}{1 - \mu(X)}\right) = u + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (4)$$

alınır. Toplamsal lojistik regresyon modeli ise her doğrusal terim yerine daha genel bir yapı kullanır:

$$\log\left(\frac{\mu(X)}{1 - \mu(X)}\right) = u + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_k(X_k) \quad (5)$$

burada her  $f$  fonksiyonu belirlenmemiş düzeltici fonksiyonları ifade eder. Bu parametrik olmayan düzeltici fonksiyonlar, modeli daha esnek hale getirirken, toplamsallık yine aynı yöntemlerle model tahmininin yapılabilmesini sağlar. **Toplamsal lojistik regresyon modeli**, geliştirilmiş toplamsal modellerin bir özel bir halidir. Genel olarak  $Y$  yanıt değişkeninin koşullu ortalaması olan  $\mu(X)$ , tahmincilerin toplamsal fonksiyonu olan  $l$  bağlantı (link) fonksiyonu ile şu şekilde ifade edilir:

$$l[\mu(X)] = u + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_k(X_k) \quad (6)$$

Klasik bağlantı fonksiyonuna ait birkaç örnek verilirse:

- $l(\mu) = \mu$  : normal dağılıma sahip yanıt değişkeni söz konusu olduğunda doğrusal ve toplamsal modeller için kullanılır.
- $l(\mu) = \text{logit}(\mu)$  ya da  $l(\mu) = \text{probit}(\mu)$  : binomial olasılıkları modellemek için kullanılan probit bağlantı fonksiyonudur. Probit fonksiyonu Normal dağılım fonksiyonunun tersi ile ifade edilen bir fonksiyondur:  $\text{probit}(\mu) = l^{-1}(\mu)$ .
- $l(\mu) = \log(\mu)$  : poisson sayılabilir veri seti için logaritmik doğrusal ya da logaritmik toplamsal modeller için kullanılır.

Bu üçlü üstel dağılım ailesinin örneklem modellerine ek olarak gamma ve negatif binom dağılımlarından ortaya çıkmıştır. Bu dağılım ailelerinden çok iyi bilinen geliştirilmiş doğrusal modeller ortaya çıktığı gibi aynı yollardan geliştirilmiş toplamsal modeller de ortaya çıkar [6].

## 4. KARAR AĞACINA DAYALI YÖNTEMLER (DECISION TREES METHODOLOGY)

Karar ağacına dayalı yöntemler, ilgili değişkenler uzayını, dikdörtgenler seti olarak ifade eder ve sonrasında modeli her biri için tanımlamaya çalışır. Kavramsal olarak basit olmasına rağmen güçlü bir yöntemdir. Bir sonraki bölümde, popüler bir yöntem olan regresyon ve sınıflama ağaçları olarak isimlendirilen CART (Classification and Regression Trees) yöntemi açıklanacaktır [6].

#### 4.1. Regresyon Ağaçları (Regression Trees)

Varsayalım ki, veri seti  $p$  tane açıklayıcı değişken  $X_j = (X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jp})$  ve  $j = 1, 2, \dots, N$  olmak üzere, her  $N$  gözlem için bir tane yanıt değişkeni içersin,  $Y_j, X_j$ . Algoritma otomatik olarak değişkenlerin ayrılmasına, düğüm noktalarına ve ağacın şeklinin nasıl olması gerektiğine karar vermelidir. Bunun için öncelikle  $R_1, R_2, \dots, R_i$  olmak üzere  $i$  tane bölge olsun ve yanıt değişkeni her bölgede  $c_i$  sabiti ile ifade edilsin:

$$f(X) = \sum_{i=1}^R c_i I(X \in R_i) \quad (7)$$

Eğer en küçük kareler yönteminden hareket edersek en uygun  $\hat{c}_i$  tahmini  $R_i$  bölgesinde  $y_i$ ' lerin ortalamasıdır:

$$\hat{c}_i = \text{ave}(Y_j | X_j \in R_i) \quad (8)$$

En küçük kareler yaklaşımı ile en iyi ikili bölüntüyü (partition) hesaplamak mümkündür. Bunun için bir algoritma geliştirilebilir. Tüm veri setini ele alarak başlanırsa bölüntü değişkeninin  $m$  ve düğüm noktasının (split point)  $a$  olduğu varsayımı altında yarı düzlem çiftleri belirlenir:

$$R_1(m, a) = \{X | X_m \leq a\}, \quad R_2(m, a) = \{X | X_m > a\} \quad (9)$$

Daha sonra aşağıdaki denklem çözülerek bölüntü değişkeni  $m$  ve düğüm noktası  $a$  bulunur:

$$\min_{m,a} \left[ \min_{c_1} \sum_{X_j \in R_1(m,a)} (Y_j - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{X_j \in R_2(m,a)} (Y_j - c_2)^2 \right] \quad (10)$$

Herhangi bir  $m$  ve  $a$  değeri için minimizasyon şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{c}_1 = \text{ave}(y_j | Y_j \in R_1(m, a)), \quad \hat{c}_2 = \text{ave}(Y | X_j \in R_2(m, a)) \quad (11)$$

Her bölüntü değişkeni için düğüm noktası  $a$ ' nın belirlenmesi kolaydır. Bunun için tüm açıklayıcı değişkenler gözden geçirilir ve en iyi  $(m, a)$  ikilisinin belirlenmesine çalışılır.

En uygun bölüntüyü bulmak için, veri seti iki bölgeye ayrılır ve bu bölüntüleme her iki bölge için tekrar edilir. Daha sonra bu işlem her bölge için tekrar edilir.

Bir ağaç ne kadar genişlemelidir sorusu için açıkça söylenebilir ki, çok geniş bir ağaç veri seti için uygun olmayabilir (overfit sorunu), bunun yanında çok küçük

bir ağaç da verideki önemli yapıyı ortaya koyamayabilir [6].

Ağaç boyutu, modelin karmaşıklığını belirleyen bir ayarlama parametresidir (tuning parameter  $\alpha$ ) ve optimum ağaç boyutu veriden seçilmelidir. Bir yaklaşıma göre ağaç düğümleri, kareler toplamı bazı eşik değerini aştığı anda azalma gösteriyorsa ayrılmalıdır. Bu strateji oldukça sığ görünse de, görünüşte önemsiz olan bir bölüntünün altında daha iyi bir bölüntü olabilir.

Öncelikli strateji, en geniş bir ağaç ( $T_0$ ) geliştirmek ve bölüntü sürecini en küçük düğüm büyüklüğüne (örneğin 5) ulaşıncaya kadar devam ettirmektir. Daha sonra bu geniş ağaç cost-complexity budama yöntemi ile sonlandırılır [6].

Bunun için öncelikle bir alt ağaç belirlenir ( $T \subset T_0$ ). Bu ağaç belirli sayıda geçiş düğümlerinden (internal node) oluşabilir. Son düğümler  $i$  ile gösterilirse,  $R_i$ ' nci bölgeye ait  $i$  düğümünü gösterecektir.  $|T|$  son düğümlerin sayısını göstermek üzere,

$$N_i = \# \{X_j \in R_i\}$$

$$\hat{c}_i = \frac{1}{N_i}$$

$$Q_i(T) = \frac{1}{N_i} \sum_{x_j \in R_i} (Y_j - \hat{c}_i)^2 \quad (12)$$

cost-complexity kriteri;

$$CC_\alpha(T) = \sum_{i=1}^{|T|} N_i Q_i(T) + \alpha |T| \quad (13)$$

olarak elde edilir. Amaç, her  $\alpha$  için  $CC_\alpha(T)$  ile minimize edilen alt ağacı bulmaktır.  $\alpha \geq 0$ , ağaç boyutu ve veriye uygunluk arasındaki dengeyi gösterir. Büyük  $\alpha$  değerleri için ağaç boyutu küçülürken, tam tersi durumda büyür.  $\alpha = 0$  olduğunda ise en geniş ağaç ( $T_0$ ) durumu oluşur.  $\alpha$ ' nın seçimi ile ayrıntılı bilgilere ulaşmak için Breiman (1984) ve Ripley (1996) kaynakları önerilir [8,9].

#### 4.2. Sınıflama Ağaçları (Classification Trees)

Araştırmalarda en sık kullanılan bir diğer sınıflandırma yöntemi ise sınıflama ağaçlarıdır. Regresyon ağaçlarına göre farklı bir algoritma kullanarak değişkenleri sınıflandırma yoluna gider.

Eğer, amaç sonuçları  $1, 2, \dots, K$  şeklinde sınıflandırmak ise sadece ağaç algoritmasının düğüm ve bitiş kriterleri değiştirilmelidir. Regresyon için hata kareler düğüm uygunsuzluk ölçümü olarak  $Q_i(T)$  kullanılır, fakat bu ölçü sınıflandırma için uygun değildir. Bir  $i$  düğümünde

$R_i$  bölgesi  $N_i$  gözlemleri,  $I$  indikatör fonksiyon olmak üzere:

$$\hat{p}_{ik} = \frac{1}{N_i} \sum_{x_j \in R_i} I(Y_j = k) \quad (14)$$

$i$ .düğümdeki  $k$  gözlemin sınıf oranıdır.  $i$ .düğümdeki gözlemler ile  $k(i) = \arg \max_k \hat{p}_{ik}$   $i$ .düğümdeki çoğunluk sınıfına dahil edilir.  $Q_i(T)$  uygunsuzluk ölçüsü izleyen farklı ölçüleri içerir,

Yanlış Sınıflama Hatası:

$$\frac{1}{N_i} \sum_{j \in R_i} I(Y_j = k(i)) = 1 - \hat{p}_{ik(i)} \quad (15)$$

Gini İndeksi:

$$\sum_{k \neq k'} \hat{p}_{ik} \hat{p}_{ik'} = \sum_{k=1}^K \hat{p}_{ik} (1 - \hat{p}_{ik}) \quad (16)$$

Cross-Entropi veya Sapma:

$$- \sum_{k=1}^K \hat{p}_{ik} \log \hat{p}_{ik} \quad (17)$$

## 5. ÇOKLU BAĞLANTI SORUNU (MULTICOLLINEARITY PROBLEM)

Çalışmanın başında da söz edildiği gibi çoklu bağlantı probleminin ele alınan yöntemler üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu nedenle çoklu bağlantı problemi, ortaya çıkış nedenleri ve neden olduğu problemler bu bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

Çoklu bağlantı herbir gözlem için açıklayıcı değişkenler arasında bir ya da birden çok doğrusal bağlantının varlığı olarak açıklanır [10]. Çoklu bağlantının etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir [11]:

- Güçlü çoklu bağlantı  $(X'X)^{-1}$  köşegen öğelerinin böylece de  $\hat{\beta}$ ' ların standart hatalarının büyük çıkmasına neden olur. Bu da  $t$  istatistik değerlerini küçük göstereceğinden değişkenlerin anlamlılığında yanlış bulgular ortaya çıkabilir.
- Çoklu bağlantı regresyon katsayılarını değerce ve işaretçe etkilediğinden gerçektekinden oldukça ayrı kestirimler ortaya çıkabilir.
- Katsayı kestirimleri örneklem verilerine duyarlı olduğundan veri kümesine birkaç gözlem eklenmesi bu kestirimlerde büyük değişikliklere yol açar.

Çoklu bağlantının kaynakları şu şekilde özetlenebilir [11]:

- Geniş tanımlı model (değişken sayısının gözlem sayısından büyük olduğu model),
- Örnekleme teknikleri,
- Model ve anakütle üzerindeki fiziksel kısıtlar (anakütlede var olan gerçek ilişkinin örnekleme de korunması durumu).

Çoklu bağlantı sorununun giderilmesi için önerilen çözüm yolları arasında; gözlem sayısının artırılması, regresyon katsayılarıyla ilgili önbilgilerden önceden kestirimlerin elde edilmesi, değişkenlerin birleştirilerek tek değişken olarak alınması, yanlış kestirimlerin kullanılması ve değişken seçimi gelir [11].

Çoklu doğrusal regresyon çözümlerinde verileri en iyi tanımlayacak önemli değişkenlerin modele alınması, modele katkısı gerekli olmayan değişkenlerin modelden çıkartılması “değişken seçimi” ya da “en iyi alt küme denkleminin seçimi” olarak bilinir. Genel regresyon sürecinde, artıkların ve çoklu bağlantının incelenmesinden sonra en iyi modeli oluşturabilmede önemli bir aşama değişken seçimidir. Bu aşamaya yalnızca model kurmak için değil çoklu bağlantıya çözüm getirebilmek için de sık sık başvurulur. Değişken seçimi yapmanın iki ana nedeni vardır [12]:

- Pratik nedenler: Modelde az sayıda değişken olması uygulama ve ekonomik açıdan yararlar sağlar. Modeldeki değişkenleri sonradan izlemek gerekebileceğinden bu değişkenlere ilişkin verileri toplamadaki güçlükler ya da bunları elde etme maliyetinin yüksekliği, araştırmacıları az sayıda değişkenle çalışmaya zorlar (parsimony).
- Kuramsal nedenler: Bir model kurulurken kestirimlerin ve önkestirimlerin istenilir istatistik özelliklere sahip olmaları gerekir. Alt küme modeli ele alındığında, gereksiz değişkenlerin modelde bulunmasının veya bazı gerekli değişkenlerin modelden çıkarılmasının ortaya çıkardığı bulgular anlamlı sonuçlar verir.

Farklı nedenlere bağlı olarak ortaya çıkan bu sorun özellikle kestirim konusunda ciddi problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle çoklu bağlantı probleminin istatistiksel yöntemler üzerindeki etkileri incelenmeli, eğer önüne geçilemiyor ise en az etkilenen yöntem kullanılmalıdır. En az etkilenen yöntemin belirlenmesi benzetim çalışmaları ile mümkün olabilmektedir. Çalışmanın izleyen bölümünde buna uygun olarak yöntemler üzerinde çoklu bağlantı durumunun etkisini

gözlemleyebilmek için benzetim çalışmalarına başvurulmuştur.

## 6. MODEL YAPISI VE BENZETİM ÇALIŞMASI (MODEL STRUCTURE AND SIMULATION STUDY)

Bu aşamada, çalışmanın amacı doğrultusunda geliştirilen benzetim çalışmalarına ilişkin bilgiler verilmiştir. Buna göre birinci aşamada, çoklu bağlantının varlığında genelleştirilmiş doğrusal model ile toplamsal lojistik regresyon modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Son aşamada ise, önceki modeller  $R^2$  kavramı temelinde CART modelleriyle karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmasında çoklu bağlantının olduğu küçük, orta ve büyük ölçekli veri kümelerini temsil etmek üzere, 50, 100 ve 500 gözlem birimli oluşan rassal örneklemeler ele alınmıştır. Korelasyonun tahminleme üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için her veri kümesi için yüksek ve düşük dereceli olmak üzere iki farklı korelasyon düzeyi seçilmiştir. Yazılan algoritma kullanıcının belirleyebileceği herhangi bir korelasyon değeri için toplamsal lojistik regresyon modeli tahmini vermesine rağmen bu çalışmada korelasyon değerleri  $\mp 0.90$  ve  $\mp 0.10$  ile sınırlandırmanın yeterli olacağı varsayılmıştır.

İlk olarak link fonksiyonu  $l_1 = 0.5 + 3x_1 - 5x_2 + 6x_3$  ele alınmıştır. Burada  $x_1$  ve  $x_2$  açıklayıcı değişkenleri standart normal dağılımdan ve aralarında  $r = (0.10, 0.90)$  düzeyde korelasyon olacak şekilde üretilmiştir. İkinci durumda, link fonksiyonu olarak  $l_2 = 0.75 + 2x_1 + 0.5x_2 + 1.5x_3$  alınmıştır. Burada ilk modelden farklı olarak sadece  $x_i$  değişkeni bağımlı değişkeni pozitif yönde etkileyecek şekilde modelde yer almıştır. Üçüncü durumda ise  $x_1$  ve  $x_2$  arasında  $r = (-0.10, -0.90)$  düzeyde negatif korelasyon üretilmiş ve link fonksiyonu olarak  $l_3 = 0.75 + 2x_1 + 0.5x_2 + 1.5x_3$  alınmıştır. Son durumda link fonksiyonu  $l_4 = 0.75 - 2x_1 + 0.5x_2 + 1.5x_3$  olmak üzere  $x_1$  ve  $x_2$  standart normal dağılımdan ve aralarında  $r = (-0.10, -0.90)$  düzeyde negatif korelasyon olacak şekilde üretilmiştir. Tüm durumlar için  $x_3 = x_1 + N(0,1)$  olarak alınmıştır. Bunun yanında, yanıt değişkeni  $y_i \sim \text{binom}(n, z_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  olacak şekilde örneklem hacminin üç farklı değeri için üretilmiştir. Analizler için hazırlanan algoritma R yazılımında yazılmıştır ve 1000 tekrardan elde edilen sonuçlar verilmiştir [13].

### 6.1. Genelleştirilmiş Doğrusal Model ve Toplamsal Lojistik Regresyon Model Karşılaştırması (Comparison of Generalized Additive Model and Additive Logistic Regression Model)

Yanıt değişkeninin normallik varsayımını sağlamadığı durumlarda Genelleştirilmiş Doğrusal Model (GDM) sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Varsayımsal esneklik

bakımından kullanılan bir diğer yaklaşım ise toplamsal lojistik regresyon modelidir. Çoklu bağlantı probleminin varlığında doğrusal modeller ve GDM ile yapılan tahminler güvenilir sonuçlar vermemektedir. Bu yüzden çoklu bağlantı problemi ile karşılaşıldığında toplamsal lojistik regresyon modeli (TLRM) ile daha esnek bir model kurabilmenin daha uygun olacağı düşünülerek bir bilgisayar programı yazılmış, GDM ile toplamsal lojistik regresyon modellerinin performansları karşılaştırılmıştır.

Tablo 1’ de, çoklu bağlantının olduğu dört ayrı durum için, örneklem hacmine ve değişkenler arasındaki korelasyon düzeylerine bağlı olarak kurulan genelleştirilmiş doğrusal regresyon modelleri ve toplamsal lojistik regresyon modellerinin 1000 tekrardan elde edilen ortalama AIC değerleri verilmiştir.

Düzeltilici fonksiyonların farklılaştığı karşılaştırmalı çalışmalarda, çoğunlukla daha küçük AIC değerleri veren modeller, düzeltilici fonksiyon olarak CS’ nin kullanıldığı modellerden elde edilir [14]. Bu sonuçtan yararlanarak, toplamsal lojistik regresyon modelleri için düzeltilici fonksiyon olarak CS kullanılmıştır. Varsayılan korelasyonlar ve durumlar için yanıt değişkeni ile açıklayıcı değişkenler arasında kurulan modellerin performansları Tablo 1’ de özetlenmiştir.

Tablo 1.  $n = 50, 100, 500$  ve  $r = \mp 0.90, \mp 0.10$  için GDM ve TLRM AIC sonuçları (AIC for GDM and TLRM in case of  $n = 50, 100, 500$  and  $r = \mp 0.90, \mp 0.10$ )

Durum	n	r	GDM	TLRM
1	50	0.10	13.259	10.510
		0.90	18.394	13.535
	100	0.10	25.260	18.766
		0.90	35.495	27.773
	500	0.10	116.020	113.914
		0.90	163.443	161.671
2	50	0.10	32.449	21.799
		0.90	27.559	18.815
	100	0.10	62.732	55.491
		0.90	53.475	46.257
	500	0.10	297.230	295.425
		0.90	251.234	249.378
3	50	0.10	32.982	22.276
		0.90	38.967	26.937
	100	0.10	63.895	56.822
		0.90	75.913	70.608
	500	0.10	302.705	300.882
		0.90	362.143	360.453
4	50	0.10	51.528	36.379
		0.90	45.541	31.836
	100	0.10	99.832	95.558
		0.90	88.639	83.312
	500	0.10	484.690	483.064
		0.90	427.597	426.027

Tablo 1’ de ki sonuçlar incelendiğinde birinci durumda, örneklem hacmi sabit iken korelasyon parametresinin değeri arttığında, her iki yöntemden elde edilen modellerin AIC değeri yükselmiştir, ancak düşük AIC değeri toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir. Örneğin örneklem hacmi 50 için,  $r = 0.10$  iken en düşük AIC değeri 10.510 olarak toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir. Benzer şekilde, tüm örneklem büyüklükleri için korelasyon parametresinin değeri arttığında AIC değeri de artmaktadır, ancak toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilen AIC değerleri daha küçüktür.

İkinci durumda, tüm örneklem büyüklükleri için korelasyon parametresinin değeri arttığında, AIC değerinin azaldığı gözlenmiştir. Örneklem hacmi 50 için  $r = 0.90$  iken en düşük AIC değeri 18.815 olarak elde etmiştir. Örneklem hacminin artırılmasıyla AIC değerinin de arttığı gözlenmiştir. Örneklem hacmi sabit iken korelasyon parametresinin değeri artırıldığında, her iki yöntemden elde edilen modellerin AIC değeri azalmıştır ancak düşük AIC değeri toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir.

Üçüncü durumda ise, ikinci durumda alınan model aynı kalmak üzere, değişkenler arasında negatif korelasyon olacak şekilde düzenlenmiştir. Buna göre, tüm örneklem büyüklükleri için korelasyon parametresinin değeri artırıldığında, AIC değeri de artmaktadır. Örneklem hacmi 50 için,  $r = 0.10$  iken en düşük AIC değeri 22.276 olarak toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir. Örneklem hacmi sabit iken korelasyon parametresinin değeri artırıldığında, her iki yöntemden elde edilen modellerin AIC değerleri yükselmiştir, ancak en düşük AIC değeri toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir.

Son durumda, tüm örneklem büyüklükleri için korelasyon parametresinin değeri arttığında, AIC değerinin azaldığı gözlenmiştir. Örneklem hacmi 50 için  $r = -0.90$  iken en düşük AIC değeri 31.836 olarak elde etmiştir. Örneklem hacminin artırılmasıyla AIC değerinin de arttığı gözlenmiştir. Örneklem hacmi sabit iken korelasyon parametresinin değeri artırıldığında, her iki yöntemden elde edilen modellerin AIC değerleri azalmıştır ancak düşük AIC değeri toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir.

## 6.2. Genelleştirilmiş Doğrusal Model, Toplamsal Lojistik Regresyon Modeli ve CART Karşılaştırması (Comparison of Generalized Additive Model, Additive Logistic Regression Model and CART)

Bu aşamada, GDM, TLRM ve CART ile uyumu yapılmış modellerin performanslarının karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bunun için ortak bir ölçüt kullanılması

önemlidir. Genellikle toplamsal lojistik modeller için bu ölçüt GCV kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır [15]. Ancak bu kriter diğer yöntemler için kullanılmadığından karşılaştırma ölçütü olarak kullanılabilmesi mümkün olmamıştır. Bunun yerine, bağımsız değişkenlerin modeli açıklamadaki yeterliliklerinden yola çıkarak,  $R^2$  istatistikleri üzerinde durulabilir. Modelin yeterliliği, lojistik regresyon için olabilirlik oran indeksi olarak da bilinen sözde (pseudo)  $R^2$  ile ifade edilebilir [16]. Benzer şekilde ağaçlandırma algoritmalarında ve toplamsal modellerde de belirlilik katsayısı modelin açıklayıcılığına ilişkin olarak yorumlamalarda kullanılabilir [7].

Bu amaçla çoklu bağlantının var olduğu küçük, orta ve büyük ölçekli veri grupları için her üç yöntemin performansları  $R^2$  anlamında karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2.  $n = 50, 100, 500$  ve  $r = \mp 0.90, \mp 0.10$  için GDM, TLRM ve CART için  $R^2$  sonuçları ( $R^2$  for GDM, TLRM and CART in case of  $n = 50, 100, 500$  and  $r = \mp 0.90, \mp 0.10$ )

Durum	n	r	GDM	TLRM	CART
1	50	0.10	1	1	0.789
		0.90	0.846	0.999	0.666
	100	0.10	0.874	0.966	0.830
		0.90	0.799	0.926	0.779
	500	0.10	0.839	0.855	0.823
		0.90	0.775	0.787	0.763
2	50	0.10	0.637	0.961	0.745
		0.90	0.711	0.957	0.785
	100	0.10	0.596	0.734	0.745
		0.90	0.666	0.788	0.785
	500	0.10	0.576	0.587	0.667
		0.90	0.645	0.655	0.725
3	50	0.10	-0.10	0.629	0.955
		0.90	-0.90	0.536	0.914
	100	0.10	-0.10	0.546	0.702
		0.90	-0.90	0.495	0.618
	500	0.10	-0.10	0.672	0.672
		0.90	-0.90	0.534	0.551
4	50	0.10	-0.10	0.180	0.999
		0.90	-0.90	0.430	0.889
	100	0.10	-0.10	0.386	0.450
		0.90	-0.90	0.394	0.536
	500	0.10	-0.10	0.311	0.314
		0.90	-0.90	0.390	0.394

Tablo 2’ de çoklu bağlantının olduğu dört ayrı durum için, örneklem hacmine ve değişkenler arasındaki korelasyonun düşük ve yüksek düzeyine bağlı olarak kurulan genelleştirilmiş doğrusal regresyon modeli, toplamsal lojistik regresyon modeli ve sınıflandırma modelinin (CART) 1000 tekrardan elde edilen ortalama  $R^2$  değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde birinci



durum için, en yüksek  $R^2$  toplamsal lojistik regresyon modelinden elde edilmiştir. Örneklem değeri 500 iken,  $R^2$  değerinin 50 ve 100 birimlik örneklemelerden elde edilen değerine göre daha azaldığı gözlenmiştir. Ancak 500 birimlik örneklemelerde, her üç yöntemle elde edilen modellerin  $R^2$  oranlarının birbirlerine yaklaştığı gözlenmiştir (0.78; 0.77; 0.76).

İkinci durumda, tüm örneklem hacimleri için korelasyon değerinin artması,  $R^2$  değerini azaltmıştır. Örneklem hacmi 50 iken  $r = (0.10, 0.90)$  için en yüksek  $R^2$  değeri toplamsal lojistik regresyon modeliyle sırasıyla %96 ve %95 olarak elde edilmiştir. Örneklem değeri 500 iken,  $R^2$  değerinin, 50 ve 100 birimlik örneklemelere göre azaldığı gözlenmiştir. Ancak toplamsal lojistik regresyon modeli ve genelleştirilmiş doğrusal regresyon modelinden elde edilen  $R^2$  değerinin 500 birimlik örneklemelerde birbirlerine yaklaşırken, CART modelinden elde edilen  $R^2$  değerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Üçüncü durumda, tüm örneklem hacimleri için korelasyon değerinin artması, her üç yöntemden elde edilen modellerin  $R^2$  değerini azaltmıştır. Örneklem değeri 500 iken,  $R^2$  değerinin, 50 ve 100 birimlik örneklemelere göre daha azaldığı gözlenmiştir. Ancak toplamsal lojistik regresyon modeli ve genelleştirilmiş doğrusal regresyon modelinden elde edilen  $R^2$  değerinin 500 birimlik örneklemelerde birbirine yaklaşırken, CART modelinden elde edilen  $R^2$ 'nin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Son durumda, korelasyon değerinin artması ve örneklem hacminin de artırılması, her üç yöntemden elde edilen modellerin  $R^2$  değerini belirgin ölçüde azaltmıştır. Örneğin örneklem değeri 50 için,  $r = -0.10$  iken  $R^2$  değeri %99 olarak toplamsal lojistik regresyon modelinde gözlenirken, örneklem sayısı 500 iken bu oran %31'e düşmüştür. Korelasyon değeri arttığında CART modelinden elde edilen  $R^2$  değeri, diğer iki yöntemden elde edilen  $R^2$  değerlerine göre az değişim göstermiştir.

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

Bu çalışmada, çoklu bağlantının varlığında ikili yanıt değişkeni ve açıklayıcı değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak için genelleştirilmiş doğrusal regresyon, toplamsal lojistik regresyon ve karar ağaçları kullanılmıştır. Bunlardan toplamsal modellerde, değişkenler arasındaki ilişkiyi daha esnek bir hale getirmek için düzeltme fonksiyonları kullanılmıştır. Çoklu bağlantının varlığında, toplamsal lojistik regresyon yöntemi ile farklı örneklem büyüklükleri ve korelasyon düzeylerinde modeller kurarak bir benzetim çalışması düzenlenmiştir. Çalışmada her üç yöntemin

karşılaştırılması sonucunda, CART modellerinden elde edilen  $R^2$  değerinde, örneklem büyüklükleri ve korelasyon düzeyleri değiştiğinde önemli ölçüde düşüş veya yükseliş gözlenmemiştir. CART modelleri çoklu bağlantının varlığından daha az etkilenmiştir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] A. Erar, “Çoklu bağlantı varlığında doğrusal regresyon modellerinde değişken seçimi” Ankara, Hacettepe Üniversitesi, İstatistik Bölümü, 1994.
- [2] A. Erar, “Bağlanım (Regresyon) Çözümlemesi Ders Notları” İstanbul, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, 2006.
- [3] B. Kan Kılınc, “Yanıt Yüzeği Modellerine MARS Yaklaşımı”, Eskişehir, Anadolu Üniversitesi, İstatistik Bölümü, 2010.
- [4] Y. Kaşko, “Çoklu Bağlantı Durumunda İkili Lojistik Regresyon Modelinde Gerçekleşen 1.Tip Hata ve Testin Gücü”, Ankara, Ankara Üniversitesi, Biyometri ve Genetik Anabilim Dalı, 2007.
- [5] G. Wahba and J. Wendelberger, “Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross validation”, Monthly Weather Review, vol.108, pp. 1122-1145, 1980.
- [6] S. Wood, “Generalized Additive Models: An introduction to R”, Chapman and Hall/CRC, 2006.
- [7] L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, and C. Stone, “Classification and Regression Trees”, Wadsworth, 1984.
- [8] H. Christian, “Smoothing by spline functions”, Journal of Numerische Mathematic, vol.10, no.3, pp. 177-183, 1967.
- [9] J. Duchon, “Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces”, Constructive Theory of Functions of Several Variables, Springer, 1977.
- [10] R. De Veaux and L. Ungar, “Multicollinearity: A tail of two nonparametric regressions”, Lecture Notes in Statistics: Selecting Models from Data, pp. 393-402, 2007.
- [11] M. Hutchinson and R. Bischof, “A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Huner Valley, New South Wales”, Australian Meteorological Magazine, vol.31, no.3, pp.179-184, 1983.
- [12] T. Hastie, R. Tibshirani and F. Friedman, “The Elements of Statistical Learning”, Springer, 2009.
- [13] S. Kovalchik and R. Varadhan, “Fitting additive binomial regression models with the R package blm”, Journal of Statistical Software, vol.54, no.1, pp.1-18, 2013.

- [14] L. Ma and X. Yan, “Examining the nonparametric effect of drivers' age in rear-end accidents through an additive logistic regression model”, *Accident Analysis and Prevention*, vol.67, pp.129-136, 2014.
- [15] D. McFadden, “Conditional logit analysis of qualitative choice behavior”, *Frontiers in Econometrics*, Academic Press, pp.105-142, 1974.
- [16] J. Meinguet, “Multivariate interpolation at arbitrary points made simple”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol.30, pp.370-384, 1979.
- [17] C. Montgomery, E. Peck and G. Vining, “Introduction to Linear Regression Analysis”, Wiley, 2012.
- [18] W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky and W. Vetterling, “Cubic Spline Interpolation. The Art of Scientific Computing”, Cambridge University Press, 1992.
- [19] S. Silvey, “Multicollinearity and imprecise information”, *Journal of Royal Statistics Society* vol.31, pp.539-552, 1969.
- [20] J. Shen and S. Gao, “A solution to separation and multicollinearity in multiple logistic regression”, *Journal of Data Science*, vol.6, no.4, pp.515-531, 2008.
- [21] B. Ripley, “Pattern Recognition and Neural Networks”, Cambridge University Press, 1996.

## **Fotokopi merkezlerinde partikül madde konsantrasyonlarının ve element kompozisyonlarının belirlenmesi**

Simge Çankaya<sup>1\*</sup>, Beyhan Pekey<sup>2</sup>

*28.04.2016Geliş/Received, 28.11.2016Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.297003

### **ÖZ**

Bu çalışmada, Kocaeli’nde seçilen 9 farklı fotokopi merkezinde, fotokopi kullanımından kaynaklı iç ortam partikül madde kirliliğinin belirlenmesi amacıyla partikül madde örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler, 5 aşamalı Sioutas sıralı örnekleyici kullanılarak toplanmış ve element içerikleri ICP-MS analiz tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Toplanan partikül maddelerin kütle konsantrasyonları ve element kompozisyonları, 5 farklı boyut aralığı ( $PM_{>2.5}$ ,  $PM_{2.5-1.0}$ ,  $PM_{1.0-0.5}$ ,  $PM_{0.5-0.25}$  ve  $PM_{<0.25}$ ) için belirlenmiş ve çalışmanın sonuçları bu kapsamda değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Partikül madde, fotokopi, Sioutas sıralı örnekleyici, ICP-MS 5

## **Determination of the concentrations and elemental compositions of particulate matter in photocopy centers**

### **ABSTRACT**

In this study, particulate matter sampling was carried out in order to determine the indoor air particle pollution arising from photocopying. For that purpose, 9 different photocopy centers were selected in Kocaeli. The samples were collected with using a 5-stage Sioutas Cascade Impactor and the elemental compositions were analysed with ICP-MS analysis technique. Mass concentrations and elemental compositions of particulate matter collected was determined for 5 different size fractions ( $PM_{>2.5}$ ,  $PM_{2.5-1.0}$ ,  $PM_{1.0-0.5}$ ,  $PM_{0.5-0.25}$  ve  $PM_{<0.25}$ ) and the results of this study were evaluated within this context.

**Keywords:** Particulate matter, photocopy, Sioutas cascade impactor, ICP-MS

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği, Kocaeli - [simge.taner@kocaeli.edu.tr](mailto:simge.taner@kocaeli.edu.tr)

<sup>2</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği, Kocaeli - [bpekey@kocaeli.edu.tr](mailto:bpekey@kocaeli.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilgisayar, yazıcı, fotokopi makinesi, faks gibi elektronik ekipmanların ev, ofis, matbaa ve fotokopi merkezi gibi çeşitli kapalı ortamlarda kullanım alanı bulunmaktadır. Özellikle, bu cihazların sık kullanıldığı çalışma ortamlarında gününün önemli bir kısmını geçiren çalışanlar, bu cihazlardan ortama verilen çeşitli kirleticilere maruz kalmaktadır. Fotokopi makineleri, kuru proses ve ıslak prosesle çalışanlar olmak üzere temel olarak 2 türde olmakla birlikte; kuru proses fotokopi makineleri kirlilik önleme araştırmaları için yüksek öncelikli olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu çalışmanın esas konusunu oluşturan ve sıkça kullanılan ofis ekipmanlarından biri olan kuru proses fotokopi makinelerinden ortama verilen kirleticiler arasında uçucu organik bileşikler, ozon, azot oksit, formaldehit ve solunabilir partiküller bulunmaktadır [1]-[5]. Literatürde, fotokopi işleminden kaynaklanan partikül maddeler ile ilgili çeşitli bilimsel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar partikül maddelerin miktarlarının belirlenmesi [2] [3] [6] [7]; oluşum mekanizmaları [8]; çeşitli analizlere dayanarak belirlenen kimyasal kompozisyonları [9] ve toksikolojik etkileri [10]-[12] gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır. Kuru proses fotokopi makineleri ve bunlarla benzer teknolojiyi kullanan lazer yazıcılar, yazma işleminin bir parçası olarak toner kullanmaktadır ve tonerin en fazla %7'si karbon siyahından oluşmaktadır [1] [13]. Siyah tonerler karbon siyahı ya da demir oksit içerirken; renkli tonerler çeşitli organik pigmentleri içermektedir. Bu temel bileşenlere ek olarak tonerler, parafin, silis gibi çeşitli katkı maddeleri ve az miktarlarda metal tuzları da içermektedir [14]. Aerosolleşmiş toner tozunun (polimerik bağlayıcılar, karbon siyahı, katkı maddeleri ve pigmentler) fotokopi makinelerinden ortama verilebildiği bilinmektedir [15]. Bello ve diğ. 2013, fotokopi makinelerinin yazıcılara oranla daha yüksek miktarlarda nanopartikül (1-100 nm arasındaki partiküller) oluşumuna neden olabildiğini belirtmişlerdir [16]. Wang ve diğ. 2011 ise yaptıkları çalışmada, nanopartiküllerin ana kaynağının kağıttaki toner tozunun evaporasyonu olabileceğini ifade etmiştir [17].

Uçucu ve yarı uçucu bileşikler ile partiküllerin ayrıca, yazdırma ve kopyalama işlemi sırasında işlenen kağıttan ortama verildiği de belirtilmiştir [15] [18]. Yazıcı, fotokopi makinesi gibi yazılı kopya cihazlarından ortama verilen farklı boyutlardaki partikül maddeler bakım-onarım sırasındaki kağıt ve toner tozlarından da kaynaklanabilmektedir [14] [18] [19]. Emisyonların türü ve miktarı ise, yazılı sayfa sayısı, kağıt ve tonerin çeşidi, cihazın yaşı ve yapısı, toner kartuşunun yaşı gibi parametrelerin çeşitliliğine bağlıdır [20].

Fotokopi makinelerinin sık kullanımıyla ilişkili olarak ofis çalışanlarında göz, solunum yolu ve boğazlarda tahriş gibi spesifik semptomlar ve baş ağrısı, yorgunluk ve mide bulantısı gibi genel semptomlar rapor edilmiştir [21]. Özellikle, toner kartuşlarını değiştiren ve cihazların bakım-onarım işlemlerini gerçekleştiren çalışanların, cilt teması ve solunum yoluyla önemli miktarda toner tozuna maruz kaldıkları belirtilmiştir [12] [22]. Barthel ve diğ. 2011 tarafından yapılmış bir çalışmada, 10 farklı lazer yazıcıdan ortama verilen ince ve ultraince partiküllerin elementel kompozisyonu incelenmiştir. Toner kartuşlarından alınan toner tozlarında Fe elementinin baskın element olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Mn, Cr, V ve Zn elementlerinin de toner tozunda bulunduğu belirtilmiştir [23]. Bir başka çalışmada, yazıcı toner tozunun temel olarak demir oksit, plastik reçine, karbon siyahı ve diğer katkı maddelerinden (TiO<sub>2</sub> veya SiO<sub>2</sub> gibi) oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca, element analizleri As, Ni, Zn, Mn ve Si elementlerinin varlığını da ortaya koymuştur [19]. Bello ve diğ. 2013, fotokopi işlemi ile ilgili olarak ortama verilen partikül maddelerin ve toner formülasyonunun fizikokimyasal ve morfolojik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Demir, Ti, Si ve Mn elementleri iki toner örneğinde tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, Sn, Al, Zn ve Mg gibi çeşitli elementler de toner örneklerinde 100-500 ppm aralığında belirlenmiştir. Kalsiyum, Na ve K elementleri de çıkış filtresi tozunda yüksek konsantrasyonlarda bulunmuştur [16].

Fotokopi işlemleri sırasında ortama verilen partiküller orijinal tonerlerden farklı olduğundan ve birçok parametreden etkilendiğinden; toner kompozisyonu, fotokopi kaynaklı partiküllerin tehlikelerini açıklamada tek gösterge olarak kullanılamamaktadır [7]. Bu nedenle, ortama verilen farklı boyutlardaki partiküllerin konsantrasyonlarının ve karakteristiklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, fotokopi işleminin baskın olarak yapıldığı fotokopi merkezlerinde, iç ortam havasında farklı boyutlardaki partikül maddelerin kütle konsantrasyonlarının ve elementel kompozisyonlarının belirlenmesidir. Bu kapsamda, farklı fotokopi merkezlerinde iç ortam örneklemeleri gerçekleştirilmiş ve ulaşılan sonuçlar literatürde ilgili alanda yapılmış bilimsel çalışmalar ve kabul görmüş standartlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Fotokopi işlemi sırasında kullanılan toner ile ilgili analizler bu çalışmanın kapsamı dışında olup; çalışmada temel olarak fotokopi merkezlerinde iç ortam havasındaki partikül madde kirliliği için genel bir bakış ve farkındalık yaratması amaçlanmıştır.

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

### 2.1. Örnekleme bölgesi (Sampling site)

Bu çalışmada, Kocaeli ilinin merkez ilçesi olan İzmit'te, Mayıs-2010 tarihinde, 9 farklı fotokopi merkezinde iç ortam partikül madde örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örneklemelerin gerçekleştirildiği fotokopi merkezlerinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için anketler

oluşturulmuş ve bu anketlere göre düzenlenmiş bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

P5 olarak numaralandırılan fotokopi merkezi dışında, diğer fotokopi merkezlerinde sigara içilmemektedir. P1 ve P3 numaralı fotokopi merkezleri dışında, tüm fotokopi merkezleri giriş katta bulunmakta ve doğal yollarla havalandırma sağlanmaktadır. P1 ve P3 numaralı fotokopi merkezleri ise, kapalı alanda bulunmakta, herhangi bir havalandırma sistemine

Tablo 1. Fotokopi merkezlerinin genel özellikleri (General characteristics of photocopy centers).

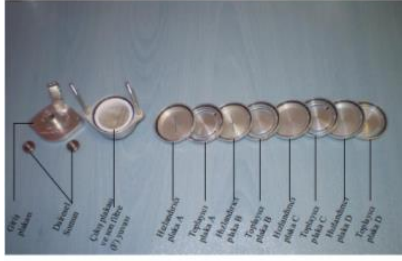
Örnekleme noktası	Örnekleme hacmi, L	İç ortam alanı, m <sup>2</sup>	Bina konumu	Çalışan sayısı	Fotokopi makinesi sayısı	Diğer ofis araçları ve sayısı	Havalandırma	Isıtma sistemi
P1	4251	14	Kapalı alanda. Caddeye 250 m uzaklıkta	2	3	Faks (1)	Doğal	Doğalgaz
P2	5827	30	Caddeye 250 m uzaklıkta	3	2	Faks (1) Yazıcı(1) Bilgisayar(1)	Doğal	Doğalgaz
P3	5711	30	Kapalı alanda. Caddeye 250 m uzaklıkta	6	8	Yazıcı (1)	Doğal	Yok
P4	6930	50	Caddeye 10 m uzaklıkta	5	7	Bilgisayar (2) Yazıcı (2)	Doğal	Elektrikli ısıtıcı
P5	3759	35	Caddeye 10 m uzaklıkta	2	6	Bilgisayar (2) Yazıcı (2)	Doğal	Elektrikli ısıtıcı
P6	3442	45	Cadde üzerinde	2	2	Bilgisayar (1)	Doğal	Doğalgaz
P7	3567	55	Cadde üzerinde	4	6	Bilgisayar (3) Yazıcı (1)	Doğal	Elektrikli ısıtıcı
P8	5243	25	Cadde üzerinde	4	4	Bilgisayar (1) Yazıcı (1)	Doğal, Klima	Doğalgaz
P9	4715	300	Caddeye 20 m uzaklıkta	17	10	Bilgisayar (12) Yazıcı (1) Faks (1)	Doğal, Klima	Doğalgaz

sahip olmamakta ve direkt dış ortam ile teması bulunmamaktadır. Buna bağlı olarak, bu örnekleme noktalarının havalandırmasının yeterli olmadığı düşünülmektedir. Sadece, P1 ve P3 numaralı fotokopi merkezlerinin bulunduğu bölgede, trafik kaynaklı kirlilik yok denecek kadar azdır. Bunlar dışında kalan örnekleme noktalarında ise iç ortamdaki ana kirletici kaynak fotokopi işlemi olmakla birlikte, örnekleme noktalarının birçoğunun kentsel alanda bulunması nedeniyle araç trafiği de diğer bir önemli kirletici kaynağıdır. Özellikle P6, P7 ve P8 numaralı fotokopi merkezleri, trafiğin yoğun olduğu cadde üzerinde bulunması nedeniyle önemlidir. Tüm fotokopi merkezlerinde metal, plastik ve ahşap materyaller bulunmaktadır. Ayrıca bazı örnekleme bölgelerinde fotokopi cihazına ek olarak, lazer yazıcılar da kullanılmakla birlikte, bunların kullanımı kısıtlıdır.

### 2.2. Örneklemelerin gerçekleştirilmesi (Sampling procedure)

Partikül madde örnekleri, 5 aşamalı Sioutas sıralı örnekleme ve Leland Legacy pompa kullanılarak, teflon (PTFE) filtreler üzerinde toplanmıştır. Pompa akış hızı, BIOS DryCal DC-2 kalibratör (Bios International Corporation, NJ, USA) kullanılarak 9 L/dk olarak ayarlanmıştır. Örneklemede, gözenek boyutu 2.0 µm olan 37 mm çaplı ve gözenek boyutu 0.5 µm olan 25 mm çaplı, 2 farklı boyutta teflon (PTFE - politetrafluoroetilen) filtreler kullanılmıştır. PM<sub>>2.5</sub>, PM<sub>2.5-1.0</sub>, PM<sub>1.0-0.5</sub> ve PM<sub>0.5-0.25</sub> boyut aralıkları için 25 mm'lik filtreler kullanılırken; PM<sub><0.25</sub> boyut aralığı için, 37 mm'lik filtreler kullanılmıştır. Sioutas sıralı örnekleme cihazının aşamaları Şekil 1'de gösterilmektedir.

İç ortam örneklemeleri, 10-12 saat arasında değişen sürelerde, fotokopi merkezlerinin çalışma saatlerine göre düzenlenmiştir. Örnekleme cihazları, kirletici kaynağına en yakın noktaya ve yetişkinler için solunum seviyesi olan 1.5 m yüksekliğe yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Sioutas sıralı örnekleyicinin aşamaları (Stages of Sioutas cascade impactor)

### 2.3. Element analizlerinin gerçekleştirilmesi (Element analysis)

Partikül madde örnekleri, çeşitli element içeriklerinin belirlenmesi amacıyla Cetax ADX-500 otomatik örnekleyici ile donatılmış Perkin-Elmer ELAN DRC-e model indüktif olarak eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS; Perkin-Elmer SCIEX Instruments, Concord, Canada) kullanılarak analiz edilmiştir. 18 element analiz edilmiştir: Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, V ve Zn.

Her örneklemeden önce ve sonra, teflon filtreler 24 saat desikatörde bekletilmiş, nemi ( $55\% \pm 5$ ) ve sıcaklığı ( $19\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ ) kontrol altında olan temiz odada hassas teraziye (Sartorius CP225D - 0.01/0.1 mg duyarlılıkta) tartılmıştır. Son olarak, partikül maddelerin kütle konsantrasyonları Denklem (1)'de verilen formül kullanılarak gravimetrik olarak hesaplanmıştır.

$$PM(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{B-A}{V_s} \times 10^6 \quad (1)$$

Denklemden; A filtrenin örneklemeden önceki ağırlığı (mg), B filtrenin örneklemeden sonraki ağırlığı (mg),  $V_s$  ise örnekleme hacmidir (L).

PM örneklerinin analize hazırlanması için, mikrodalga asitle çözündürme sistemi kullanılmıştır (Ethos D; Milestone, US). PTFE filtreler, 5 mL  $\text{HNO}_3$  (65% Merck, Suprapure, Germany), 1 mL  $\text{HCl}$  (30% Merck, Suprapure, Germany) ve 0.5 mL  $\text{HF}$  (40% Merck, Analytical grade, Germany) eklenerek kapalı kaplara konulmuştur. 2 aşamalı çözündürme prosedürü uygulanmıştır [24]. Çözündürme prosedürüne ait detaylar Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda verilen ısı güç (W) parametresi, mikrodalga asitle çözündürme ünitesinde çözüldürülecek filtre örneği sayısına göre ayarlanmıştır. 10 örnek için 1000 watt seçilirken; daha az sayıda örnek için farklı değerlerde ısı güç tercih edilmiştir. Çözündürme işleminden sonra, kapların oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve 25 mL deiyonize su

(Millipore Synergy 185, Millipore, Billerica, MA, USA) ile seyreltilmiştir. Son olarak, örnekler polietilen kaplara aktarılarak ICP-MS analizi öncesi  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiştir. Filtre ve asit için şahit örnekler de aynı metot ile hazırlanmıştır [24] [25].

Tablo 2. Mikrodalga çözündürme prosedürü (Microwave acid digestion procedure)

Aşama	Süre (dk)	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Isıl Güç (W)
1	5	25 $\rightarrow$ 180	1000
2	10	180	1000
Havalandırma	30	0	1000

Analizlerin doğruluğunun tespit edilmesi için, Amerika Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nden temin edilen standart referans madde 1648a (SRM - 1648a) kentsel partikül madde örneği kullanılmıştır. Yapılan analize göre, elementlerin geri kazanım değerleri %67 (Cr) ve %121 (Co) arasında değişmektedir. Elementlerin metot belirleme limitleri ise Ca için 100 ppb; Fe ve Mg için 10 ppb; Al, V, Ni, Cu, Zn ve Se için 1 ppb; Cr, Pb ve Ti için 0.1 ppb; Be, Mn, As ve Mo için 0.01 ppb; Co ve Cd için ise 0.001 ppb olarak belirlenmiştir.

## 3. BULGULAR (RESULTS)

### 3.1. Kütle konsantrasyonları (Mass concentrations)

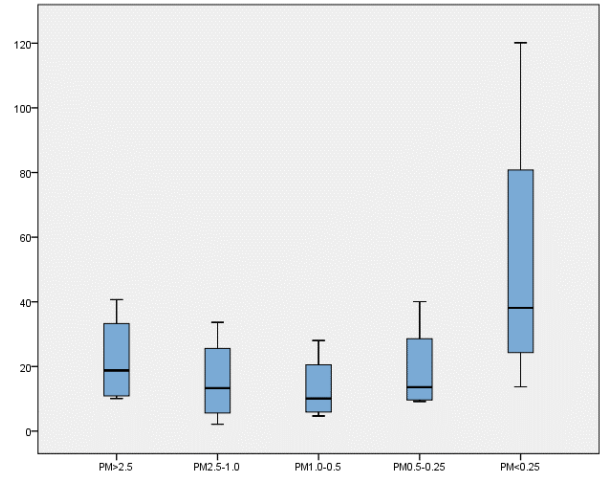
Dokuz farklı örnekleme noktasında ölçülen partikül maddelerin kütle konsantrasyonları Tablo 3' de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{0.5-0.25}$  ve  $\text{PM}_{<0.25}$  için en yüksek kütle konsantrasyonları P8 olarak isimlendirilen fotokopi merkezinde ölçülmüştür (sırasıyla;  $184.4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $40.05\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $120.2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Diğer boyut aralıkları dikkate alındığında ise, en yüksek  $\text{PM}_{2.5-1.0}$  ve  $\text{PM}_{1.0-0.5}$  konsantrasyonlarının P7'de ( $33.64\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  ve  $28.03\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  $\text{PM}_{>2.5}$  konsantrasyonunun ise P6 olarak isimlendirilen fotokopi merkezinde ölçüldüğü gözlenmiştir ( $40.67\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Her bir fotokopi merkezinde ölçülen  $\text{PM}_{2.5}$  konsantrasyonları değerlendirildiğinde, konsantrasyonların  $38.18\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  ile  $198.4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değiştiği belirlenmiştir. Konsantrasyonların örnekleme noktasına göre bu kadar geniş bir aralıkta değişmesi; iç ortam havasının çeşitli faktörlerden etkilenmesi ile ilişkili olabildiğini düşündürmektedir. Çekilen fotokopi sayısı, hava değişim hızı ve diğer emisyon faktörleri gibi çeşitli faktörler iç ortam havasını etkileyebilen faktörlerdendir [7]. Bu çalışmada da, örnekleme için seçilen fotokopi merkezleri, gerek havalandırma şartları gerekse aktif olarak kullanılan fotokopi makinesi sayısı olarak birbirinden farklı özellikler taşımaktadır.



Tablo 3. Beş farklı boyut için belirlenen partikül madde ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) kütle konsantrasyonları (Mass concentrations of particulates for five different size fractions).

Örnekleme Noktası	PM <sub>&gt;2.5</sub>	PM <sub>2.5-1.0</sub>	PM <sub>1.0-0.5</sub>	PM <sub>0.5-0.25</sub>	PM <sub>&lt;0.25</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>&lt;0.25/PM<sub>&gt;2.5</sub></sub>	*TSP
P1	32.93	14.11	4.70	11.76	70.57	101.2	2.14	134.1
P2	10.30	17.16	8.58	12.01	13.73	51.48	1.33	61.78
P3	35.02	14.01	15.76	12.26	22.76	64.79	0.65	99.81
P4	10.10	11.54	15.87	10.10	14.43	51.95	1.43	62.05
P5	21.28	15.96	7.98	15.96	45.22	85.13	2.13	106.4
P6	40.67	26.15	14.53	20.34	31.96	92.97	0.79	133.6
P7	16.82	33.64	28.03	16.82	39.25	117.8	2.33	134.6
P8	38.15	22.89	15.26	40.05	120.2	198.4	3.15	236.5
P9	27.57	2.12	6.36	14.85	14.85	38.18	0.54	65.75

Şekil 2’de, tüm fotokopi merkezlerinde ölçülen 5 farklı boyuttaki partikül maddelerin ortalama, minimum ve maksimum konsantrasyonları ile standart sapmaları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, 250 nm’den küçük partiküllerin (PM<sub><0.25</sub> boyut aralığı), en yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu belirlenmiştir (ortalama 41.44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). PM<sub>>2.5</sub>, PM<sub>2.5-1.0</sub>, PM<sub>1.0-0.5</sub> ve PM<sub>0.5-0.25</sub> boyut aralıklarındaki ortalama konsantrasyonlar ise sırasıyla; 25.87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 17.51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 13.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ve 17.13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca 250 nm’den küçük partiküllerin, toplam partiküllerin %76’sını oluşturduğu belirlenmiştir. Her bir fotokopi merkezinde ölçülen ince partiküller kaba partiküller ile oranlandığında, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>>2.5</sub> oranının tüm fotokopi merkezlerinde 1’in üstünde olduğu belirlenmiştir. Örnekleme noktalarında en yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen 250 nm’den küçük partiküller ile kaba partiküller arasındaki oran incelendiğinde ise P3, P6 ve P9 numaralı fotokopi merkezleri dışında kalan tüm fotokopi merkezlerinde 250 nm’den küçük boyutlu partiküllerin kaba partiküllere oranının 1’in üstünde olduğu tespit edilmiş; ayrıca bu oranın 1.33 ile 3.15 arasında değiştiği göze çarpmıştır. Bu sonuçlar, daha önce partikül boyut karakterizasyonu sonucunda, fotokopi makinesi ve lazer yazıcı gibi cihazlardan kaynaklanan partiküllerin daha çok 10 - 200 nm boyut aralığındaki nanopartiküllerden oluştuğu bulgusu ile desteklenmektedir [4] [7]. Dolayısıyla bu üç fotokopi merkezi dışındaki örnekleme noktalarında baskın partikül madde kaynağının fotokopi ve yazıcı faaliyetleri olduğu söylenebilir.

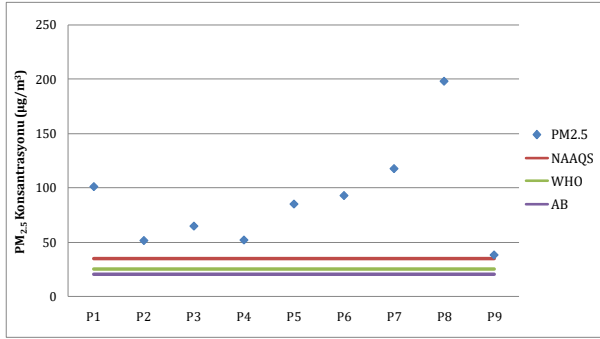


Şekil 2. Farklı boyut aralıklarındaki ortalama, minimum ve maksimum konsantrasyonlar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ve standart sapmalar (Mean, minimum and maximum concentrations and standard deviations in different size fractions)

Literatürde, fotokopi işleminden kaynaklanan partikül maddeler ile ilgili çalışmalar da insan sağlığı üzerindeki önemli etkilerinden dolayı, genellikle ince ve ultraince partikül boyutları üzerine yoğunlaşmıştır [7] [27] [28]. Lee ve Hsu 2007 tarafından yapılmış bir çalışmada, 12 farklı fotokopi merkezinde ölçülen PM<sub>2.5</sub> değerleri 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ile 83  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değişirken, ortalama PM<sub>2.5</sub> değeri 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak belirlenmiştir [7]. Elango ve diğ. ise, 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada 5 farklı fotokopi merkezinde iç ortam hava kalitesini belirlemiş ve ortalama PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu 78.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak bulmuştur [26]. Bu çalışmada ise 9 farklı fotokopi merkezinde ölçülen PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları 38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ile 198  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değişirken; ortalama PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonu 89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak hesaplanmıştır.

İç ortamlarda bulunan ince partiküller (PM<sub>2.5</sub>), o ortamlarda günün büyük kısmını geçiren kişilerin sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle,

bu çalışmada belirlenen  $PM_{2.5}$  kütle konsantrasyonları, uluslararası standartlar ile karşılaştırılmış ve sonuç grafik olarak Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 3'de görüldüğü gibi, örnekleme yapılan fotokopi merkezlerinin tümünde ölçülen  $PM_{2.5}$  konsantrasyonları, EPA NAAQS (Avrupa Çevre Koruma Ajansı-Ulusal Hava Kalitesi Standardı), WHO (Dünya Sağlık Örgütü) ve AB (Avrupa Birliği) tarafından kabul edilen limit değerleri, 1 ile 10 kat arasında değişen oranlarda aşmaktadır. Ayrıca, bu limit değerlerin 24 saatlik PM örnekleme için kabul edilen limit değerler oldukları; bizim çalışmamızda ise örnekleme sürelerinin 10-12 saat arasında değiştiği dikkate alındığında, ölçülen konsantrasyonların yüksekliği bir kez daha göze çarpmaktadır.



Şekil 3.  $PM_{2.5}$  konsantrasyonlarının standartlar ile karşılaştırılması (Comparison of  $PM_{2.5}$  concentrations with standards)

### 3.2. Element içerikleri (Elemental compositions)

Beş farklı boyut aralığındaki partikül maddelerde analiz edilen 18 elemente ait konsantrasyonlar ( $ng/m^3$ ) Ek A' da verilmiştir. Nikel, Cu, Zn ve Mo elementleri, tüm örnekleme noktalarında özellikle ultraince partiküllerde belirlenmiştir ( $PM_{1.0-0.5}$ ,  $PM_{0.5-0.25}$  and  $PM_{<0.25}$ ). P1 ve P2 numaralı fotokopi merkezlerinde, Ni, Cu ve Zn elementleri sadece 250 nm' nin altındaki partiküllerde tespit edilmiştir. P3 numaralı fotokopi merkezinde ise Cu ve Zn elementleri, 250 nm' den küçük partikül boyutlarında tespit edilmiştir. Arsenik ve Se elementleri, bazı örnekleme noktalarında (P1, P2, P5, P6 ve P7), kaba partiküllerde ( $PM_{>2.5}$ ) tespit edilmemiştir.

Kalsiyum, Fe ve Al elementleri, tüm örnekleme noktalarında hem kaba hem ince partiküllerde en yüksek konsantrasyonlarda bulunan elementlerdir. Özellikle Ca, bu çalışmada seçilen fotokopi merkezlerinin çoğunda en yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen elementtir. Örnekleme yapılan tüm fotokopi merkezleri arasında 5 farklı boyut aralığında, Ca elementinin konsantrasyonu  $176 ng/m^3$  ile  $7185 ng/m^3$  değişmekle birlikte, maksimum konsantrasyon P7 numaralı fotokopi merkezinde,  $PM_{2.5-1.0}$  boyut aralığında tespit edilmiştir. Tespit edilen yüksek konsantrasyonlar, literatürde genellikle toprak elementi olarak tanımlanan Ca

elementinin [29]-[31], bizim çalışmamızda antropojenik kaynağının da olabileceğine işaretler. Morawska ve diğ. 2009, yazıcı partiküllerinin mikroanalizlerini gerçekleştirmiş ve bizim çalışmamızdaki sonuç ile benzer şekilde Ca elementinin partiküllerde en çok bulunan element olduğunu gözlemlemiştir. Aynı çalışmada bu durum, partiküllerde belirlenen Ca ve Fe elementlerinin çoğunlukla, kalsiyum karbonatla kaplı olan kağıt ve tonerden kaynaklanan demir oksitlerle ilişkili olduğu şeklinde açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada gerçekleştirilen toner tozunun mikroanalizi, toner partiküllerinin ultraince (50-150 nm boyutundaki) demir oksit partiküllerinden oluştuğunu göstermiştir [8]. Barthel ve diğ. 2011'de, Ca varlığının büyük ihtimalle mineral dolgu olarak kullanılan  $CaCO_3$ 'tan dolayı olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, özellikle Fe elementi, kartuşlardan alınan toner tozu örneklerinde en baskın element olarak bulunmuştur. Bunun nedeni, çoğu tonerin temel olarak demir (III) oksit ( $Fe_2O_3$ ), polimer reçineleri, pigmentler ve katkı maddelerinden oluşması şeklinde açıklanmıştır [23].

As, V, Se, Cd, Ni, Pb, ve Zn gibi iz elementler, ince partiküllerde kaba partiküllere oranla daha yüksek konsantrasyonlarda bulunmuştur. Literatürde de bu elementler genellikle antropojenik kaynaklarla ilişkilendirilmiştir [32]-[34]. Barthel ve diğ. 2011, 4 farklı toner örneğinin element içeriklerini belirledikleri çalışmalarında, toner örneklerinde Ca, Sn, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni ve Zn elementlerini tespit etmiştir. Cr, Mn ve V elementleri ayrıca, toner tozu örneklerinde de tespit edilmiştir [19] [23]. Bu elementler, tonerlerde kullanılan polimerlerin oksidasyon ve polimerizasyon reaksiyonları için katalitik özelliklerinden dolayı eklenmektedir [23] [35]. Ayrıca, Gminski ve diğ. 2011'de, As ve Pb elementlerinin karbonlu kısım ile ilişkili olduğuna dair şüphelerinin olduğundan bahsetmişlerdir [12].

Özellikle 250 nm'den küçük boyutlardaki partiküllerde yüksek miktarlarda bulunan elementlerin daha iyi tespit edilmesi için, Ek A'da verilen tabloda ayrıca, elementlerin  $PM_{<0.25}/PM_{>2.5}$  oranları verilmiştir. Tabloda, Cd, Ni, Pb ve Zn elementlerinin  $PM_{<0.25}/PM_{>2.5}$  oranlarının tüm örnekleme noktalarında 1'in üstünde olduğu göze çarpmaktadır. Cd elementine ait  $PM_{2.5}/PM_{>2.5}$  oranları, 32 ile 2488 arasında değişmektedir. P4, P5 ve P7 numaralı fotokopi merkezlerinde, bu oran 1000'in üstündedir. İlk anda, Cd elementinin bahsedilen örnekleme noktalarında baskın kaynak olan fotokopi işleminden kaynaklanabileceği düşünülse de; P4, P5 ve P7 olarak numaralandırılan bu fotokopi merkezlerinin birbirlerine oldukça yakın konumda oldukları (yaklaşık 100 m mesafede) ve Kocaeli'nde trafiğin oldukça yoğun olduğu bir merkezde buldukları göz önünde bulundurulması gereken önemli bir noktadır. Cd elementinin 250 nm'den küçük

partiküllerde bulunma oranı genel olarak tüm örnekleme bölgelerinde yüksek çıkmakla birlikte; ultraince partiküllerdeki Cd elementinin fotokopi işleminden kaynaklandığını söyleyebilmek için, konu ile ilgili daha fazla araştırma gerekmektedir. Literatürde konu ile ilgili yapılan ve Cd elementinin de analiz edildiği çalışmalarda, bu element genellikle metot belirleme limitinin altında bulunmuştur. [12] [19]. Ni ve Zn elementlerinin de toner örneklerinde bulunduğu literatürde belirtilmiştir [12]. Cd elementine ek olarak;

Ca, V, Cr, Co, Cu, As, Se ve Mo elementlerinin  $PM_{<0.25}/PM_{>2.5}$  oranlarının da bazı fotokopi merkezlerinde yüksek olduğu belirlenmiştir. Mg ve Ti elementlerine ait  $PM_{<0.25}/PM_{>2.5}$  oranı ise tüm fotokopi merkezlerinde 1'in altındadır. Morawska ve diğ. 2009 tarafından yapılmış çalışmada da, Ti elementinin ortam havasında bulunduğu ve çevresel kaynaklı olduğu belirtilmiştir [8].

Tablo 4. İnce partiküllerdeki ( $PM_{2.5}$ ) element konsantrasyonlarının standartlar ile karşılaştırılması (Comparison of elemental concentrations in  $PM_{2.5}$  with standards)

Elementler	Standartlar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			$PM_{2.5}$ boyut aralığında ölçülen değerler ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )								
	<sup>a</sup> OSHA	<sup>b</sup> WHO	<sup>c</sup> HSE	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<b>Al</b>	5000	-	4000	1.336	2.359	0.686	1.164	1.261	2.559	1.848	0.508	0.972
<b>Cr</b>	1000	-	500	0.079	0.077	0.221	0.056	0.085	0.072	0.073	0.235	0.076
<b>Mn</b>	5000	-	500	0.016	0.011	0.044	0.006	0.024	0.021	0.037	0.030	0.018
<b>Fe</b>	-	-	1000	2.085	1.980	2.272	0.816	1.690	1.897	1.942	2.849	1.466
<b>Co</b>	100	-	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
<b>Ni</b>	1000	-	100	0.012	0.017	0.038	0.023	0.030	0.126	0.032	0.022	0.023
<b>Cu</b>	1000	-	1000	0.018	0.012	0.006	0.266	0.019	0.013	0.033	0.071	0.019
<b>Zn</b>	5000	-	1000	0.078	0.052	0.026	0.066	0.155	0.161	0.173	0.045	0.098
<b>As</b>	10	-	100	0.042	0.035	0.840	0.048	0.067	0.041	0.085	1.195	0.102
<b>Se</b>	200	-	100	0.132	0.108	2.842	0.165	0.215	0.121	0.284	4.053	0.350
<b>Cd</b>	0.2	0.005	25	0.002	0.006	0.010	0.031	0.050	0.012	0.030	0.003	0.027
<b>Pb</b>	50	0.5	-	0.022	0.017	0.009	0.006	0.018	0.022	0.022	0.020	0.019

İnce partiküllerde ( $PM_{2.5}$ ) belirlenen elementlerin konsantrasyonları, İngiliz Sağlık ve Güvenlik Dairesi (HSE –Health and Safety Executive), A.B.D. İş Sağlığı ve Güvenliği Dairesi (OSHA – Occupational Safety and Health Administration) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO – World Health Organisation) tarafından kabul edilen sınır değerler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, elementlere ait konsantrasyonların genelinde HSE ve OSHA standartlarındaki limit değerlerden oldukça düşük olduğu göze çarpmaktadır. Fakat bu çalışmada örnekleme yapılan iş yerlerinde herhangi bir üretim faaliyetinin olmadığı, baskın kaynağın sadece fotokopi işlemi olduğu; bahsedilen standartların ise lastik, kauçuk, boya endüstrisi gibi çeşitli üretim faaliyetlerinin gerçekleştirildiği büyük ölçekli iş yerleri için geliştirildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, çalışmamız kapsamında

yapılan örneklemelemlerden elde edilen sonuçların çoğunun limit değerlerin altında kalması beklenen bir sonuçtur. Buna rağmen, ince partiküllerde ( $PM_{2.5}$ ) belirlenen Cd konsantrasyonunun, P1 ve P8 dışındaki tüm fotokopi merkezlerinde WHO tarafından belirlenen limit değer olan  $5 \text{ ng}/\text{m}^3$ ’ü aştığı göze çarpmıştır.

#### 4. TARTIŞMALAR (DISCUSSIONS)

Literatürde, fotokopi makinelerinden kaynaklanan iç ortam partikül madde kirliliğiyle ilgili fazla çalışmaya ulaşılamamakla birlikte, fotokopi makineleriyle benzer teknolojiyi kullanan lazer yazıcılarla ilgili çalışmalar derlenmiş ve bu çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Çalışmanın sonucunda en yüksek kütle konsantrasyonlarının  $250 \text{ nm}$ ’den küçük partiküllerde

olduğu ve bu partiküllerin toplam partiküllerin %76'sını oluşturduğu tespit edilmiştir. 10 µm'den küçük partiküller solunabilir partiküller olarak dikkate alınır, 2.5 µm'den küçük partiküller akciğerlere nüfuz ederek alveollere kadar ulaşır; 100 nm'den küçük partiküllerin (ultraince partiküller) ise kan dolaşımına katılıp beyine ve diğer organlara ulaştığına dair şüpheler vardır [12]. İnsan sağlığı açısından önemli olduğu literatürde belirtilen PM<sub>2.5</sub> boyutundaki partiküllerin kütle konsantrasyonları, uluslararası standartlardaki limit değerler ile karşılaştırılmış ve tüm örnekleme noktalarında limit değerinin aşıldığı görülmüştür. Nitekim, belirtilen standartlar özellikle üretim faaliyetlerinin gerçekleştirildiği işletmeler için geliştirilmiş ve kabul edilmiştir. Fotokopi merkezleri gibi küçük ölçekli çalışma alanlarında, PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonu ile ilgili henüz bir standart olmadığı dikkat çekmektedir.

Farklı boyutlardaki partiküllerin element içerikleri değerlendirildiğinde ise, Ca, Fe ve Al elementlerinin hem ince hem de kaba partiküllerde oldukça yüksek konsantrasyonlarda olduğu belirlenmiştir. As, V, Se, Cd, Ni, Pb ve Zn gibi iz elementlerin ise ince partiküllerde, kaba partiküllere oranla yüksek konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmamızın esas amacı fotokopi işlemlerinin baskın olduğu fotokopi merkezlerindeki iç ortam partikül madde kirliliğine genel bir bakış ve farkındalık yaratmak olmakla birlikte; bu sonuç daha fazla araştırma ve farklı ölçüm metotları kullanılarak geliştirilmesi gereken önemli bir çalışma konusudur. Literatürde bu amaçla yapılmış bilimsel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, fotokopi işlemlerinden kaynaklanan partikül maddelerin boyutlarının genellikle 100 nm'den küçük ve özellikle 50 nm civarında olduğu belirtilmiştir [4] [7]. Bir başka çalışmada, yazdırma işlemi sırasında, 5.6-100 nm boyutundaki partiküllerin sayı konsantrasyonlarında ciddi artış olduğu gözlenmiştir [36]. Özellikle 50-100 nm boyutlarındaki partiküllerin kütle ve sayı konsantrasyonlarının belirlenmesi, fotokopi kaynaklı partikül madde kirliliğinin araştırılması açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla, bundan sonra gerçekleştirilecek olan çalışmalarda farklı bir metot belirlenerek 100 nm ve daha küçük partiküllerin kütle ve/veya sayı konsantrasyonlarının belirlenebileceği bilimsel yolların izlenmesi, literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] R. Hetes, M. Moore, C. Northeim, "Office Equipment: Design, Indoor Air Emissions, and Pollution Prevention Opportunities". *U.S.EPA*, EPA/600/SR-95/045, 1995.
- [2] S.K. Brown, "Assessment of Pollutant Emissions from Dry-Process Photocopiers". *Indoor Air*, vol. 9, pp. 259-267, 1999.
- [3] J.H. Byeon, J.-W. Kim, "Particle Emission From Laser Printers With Different Printing Speeds". *Atmos. Environ.*, vol. 54, pp. 272-276, 2012.
- [4] H. Jiang, L. Lu, "Measurement of the surface charge of ultrafine particles from laser printers and analysis of their electrostatic force". *Atmos. Environ.*, vol. 44, pp. 3347-3351, 2010.
- [5] K.W. Leovic, L.S Sheldon, D.A. Whitaker, R.G. Hetes, J.A. Calcagni, J.N. Baskir, "Measurement of Indoor Air Emissions from Dry-Process Photocopy Machines," *J Air Waste Manage*, vol. 46:9, pp. 821-829, 1996.
- [6] D. Saraga, S. Pateraki, A. Papadopoulos, C. Vasilakos, T. Maggos, "Studying The Indoor Air Quality in Three Non-Residential Environments of Different Use: A Museum, a Printery Industry and an Office," *Build Environ*, vol. 46, pp. 2333-2341, 2011.
- [7] C.-W. Lee, D.-J. Hsu, "Measurements of fine and ultrafine particles formation in photocopy centers in Taiwan," *Atmos Environ*, vol. 41, pp. 6598-6609, 2007.
- [8] L. Morawska, C. He, G. Johnson, R. Jayaratne, T. Salthammer, H. Wang, E. Uhde, T. Bostrom, R. Modini, G. Ayoko, P. McGarry, M. Wensing, "An Investigation into the Characteristics and Formation Mechanisms of Particles Originating from the Operation of Laser Printers," *Environ Sci Technol*, vol. 43, pp.1015-1022, 2009.
- [9] G. Sangiorgi, L. Ferrero, B.S. Ferrini, C.L. Porto, M.G. Perrone, R. Zangrando, A. Gambaro, Z. Lazzati, E. Bolzacc, "Indoor airborne particle sources and semi-volatile partitioning effect of outdoor fine PM in offices," *Atmos Environ*, vol. 65, pp 205-214, 2013.
- [10] M. Khatri, D. Bello, A.K. Pal, S. Woskie, T.H. Gasset, P. Demokritou, P. Gaines, "Toxicological effects of PM<sub>0.25</sub>-2.0 particles collected from a photocopycenter in three human cell lines," *Inhal Toxicol*, vol. 25(11), pp. 621-632, 2013.
- [11] O. Hanninen, I. Brüske-Hohlfeld, M. Loh, T. Stoeger, W. Kreyling, O. Schmid, A. Peters, "Occupational and Consumer Risk Estimates for

- Nanoparticles Emitted by Laser Printers,” *J Nanopart Res*, vol. 12, pp. 91–99, 2010.
- [12] R. Gminski, K. Decker, C. Heinz, A. Seidel, M. Könczöl, E. Goldenberg, B. Grobety, W. Ebner, R. Giere, V. Mersch-Sundermann, “Genotoxic Effects of Three Selected Black Toner Powders and Their Dimethyl Sulfoxide Extracts in Cultured Human Epithelial A549 Lung Cells In Vitro,” *Environ Mol Mutagen*, vol. 52, pp. 296–309, 2011.
- [13] The University of Edinburgh, Health and Safety Department (2010, April). Photocopiers and Laser Printers Health Hazard. [Online]. Available: <http://www.docs.csg.ed.ac.uk/Safety/general/photocopiers.pdf>.
- [14] U. Ewers, D. Nowak, “Health hazards caused by emissions of laser printers and copiers?,” *Gefahrstoffe– Reinhaltung der Luft*, vol. 66, pp. 203–210, 2006.
- [15] P. Wolkoff, “Photocopiers and indoor air pollution,” *Atmos Environ*, vol. 33, pp. 2129–2130, 1999.
- [16] D. Bello, J. Martin, C. Santeufemio, Q. Sun, K.L. Bunker, M. Shafer, P. Demokritou, “Physicochemical and Morphological Characterisation of Nanoparticles from Photocopiers: Implications for Environmental Health,” *Nanotoxicology*, vol. 7(5), pp. 989–1003, 2013.
- [17] Z.-M. Wang, J. Wagner, S. Wall, “Characterization of Laser Printer Nanoparticle and VOC Emissions, Formation Mechanisms, and Strategies to Reduce Airborne Exposures,” *Aerosol Sci Tech*, vol. 45, pp. 1060–1068, 2011.
- [18] H. Destailat, R.L. Maddalena, B.C. Singera, A.T. Hodgsona, T.E. Mckona, “Indoor Pollutants Emitted by Office Equipment: A Review of Reported Data and Information Needs,” *Atmos Environ*, vol. 42, pp. 1371–1388, 2008.
- [19] M. Könczöl, A. Weißa, R. Gminski, I. Merfort, V. Mersch-Sundermann, “Oxidative Stress and Inflammatory Response to Printer Toner Particles in Human Epithelial A549 Lung Cells,” *Toxicol Lett*, vol. 216, pp. 171–180, 2013.
- [20] E. Uhde, C. He, M. Wensing, “Characterization of Ultra-fine Particle Emissions from a Laser Printer”. *Proceedings of Healthy Buildings*, pp. 479–482, 2006.
- [21] H. Jiang, L. Lu. “Measurement of the Surface Charge of Ultrafine Particles from Laser Printers and Analysis of Their Electrostatic Force,” *Atmos Environ*, vol. 44, pp. 3347–3351, 2010.
- [22] Occupational Safety and Health Council (OSHC), “A Simple Guide to Health Risk Assessment; Photocopying”. *Office Environment Series*, OE 3/2005; 5/2005-3-OHB52: 2005.
- [23] M. Barthel, V. Pedan, O. Hahn, M. Rothhardt, H. Bresch, O. Jann, S. Seeger, “XRF-Analysis of Fine and Ultrafine Particles Emitted from Laser Printing Devices,” *Environ Sci Technol*, vol. 45, pp. 7819–7825, 2011.
- [24] S. Yenisoy-Karakaş, E.O. Gaga, O. Cankur, D. Karakaş, “Uncertainty of high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry based aerosol measurements”. *Talanta*, vol. 79, pp. 1298–1305, 2009.
- [25] S. Taner, B. Pekey, H. Pekey. “Fine particulate matter in the indoor air of barbeque restaurants: Elemental compositions, sources and health risks,” *Sci Total Environ*, vol. 454–455, pp. 79–87, 2013.
- [26] N. Elango, V. Kasi, B. Vembhu, J.G. Poornima, “Chronic exposure to emissions from photocopiers in copy shops causes oxidative stress and systematic inflammation among photocopier operators in India,” *Environ Health*, vol. 12, pp. 1–12, 2013.
- [27] M. Wensing, T. Schripp, E. Uhde, T. Salthammer, “Ultra-fine particles release from hardcopy devices: Sources, real-room measurements and efficiency of filter accessories,” *Sci Total Environ*, vol. 407(1), pp. 418–427, 2008.
- [28] D.E. Saraga, L. Volanis, T. Maggos, C. Vasilakos, K. Bairachtari, C.G. Helmis, “Workplace personal exposure to respirable PM fraction: a study in sixteen indoor environments,” *Atmos Pol Res*, vol. 5, pp. 431–437, 2014.
- [29] Y.-Z. Tian, J.-H. Wu, G.-L. Shi, J.-Y. Wu, Y.-F. Zhang, L.-D. Zhou, Y.-C. Feng. “Long-term Variation Of The Levels, Compositions And Sources Of Size-Resolved Particulate Matter in a Megacity in China,” *Sci Total Environ*, vol. 463–464, pp. 462–468, 2013.
- [30] R. Zhang, J. Cao, Y. Tang, R. Arimoto, Z. Shen, F. Wu, Y. Han, G. Wang, J. Zhang, G. Li, “Elemental Profiles And Signatures Of Fugitive Dusts From Chinese Deserts,” *Sci Total Environ*, vol. 472, pp. 1121–1129, 2014.
- [31] L. Xu, Y. Yu, J. Yu, J. Chen, Z. Niu, L. Yin, F. Zhang, X. Liao, Y. Chen Y, “Spatial distribution and sources identification of elements in PM2.5

- among the coastal city group in the Western Taiwan Strait region, China,” *Sci Total Environ*, vol. 442, pp. 77–85, 2013.
- [32] X. Wang, X. Bi, G. Sheng, J. Fu, “Hospital indoor PM10/PM2.5 and associated trace elements in Guangzhou, China,” *Sci Total Environ*, vol. 366, pp. 124–135, 2006.
- [33] N. Daher, N.A. Saliba, A.L. Shihadeh, M. Jaafar, R. Baalbaki, M.M. Shafer, J.J. Schauer, C. Sioutas, “Oxidative potential and chemical speciation of size-resolved particulate matter (PM) at near-freeway and urban background sites in the greater Beirut area,” *Sci Total Environ*, vol. 470–471, pp. 417–426, 2014.
- [34] S. Castillo, J.D. de la Rosa, A.M. Sanchez de la Campa, Y. Gonzalez-Castanedo, J.C. Fernandez-Caliani, I. Gonzalez, A. Romero, “Contribution of mine wastes to atmospheric metal deposition in the surrounding area of an abandoned heavily polluted mining district (Rio Tinto mines, Spain),” *Sci Total Environ*, vol. 449, pp. 363–372, 2013.
- [35] M. Rozic, M. Rozmaric Macefat, V. Orescanin, “Elemental Analysis of Ashes of Office Papers by EDXRF Spectrometry”, *Nucl Instrum Meth B*, vol. 229, pp. 117-122, 2005.
- [36] R. Betha, V. Selvam, D.R. Blake, R. Balasubramanian, “Emission Characteristics of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds in a Commercial Printing Center,” *J Air Waste Manage*, vol. 61, pp. 1093–1101, 2011.



S. Çankaya ve B. Pekey / Fotokopi merkezlerinde partikül madde konsantrasyonlarının ve element kompozisyonlarının belirlenmesi

Ek A – Farklı boyut aralıklarındaki partiküllerin element kompozisyonları; ng/m<sup>3</sup>(Elemental compositions of different particle size fractions).

SP / SD	Al	Be	Mg	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Pb	
P1	PM>2.5	333.2	0.037	171.8	654.4	67.54	bla	7.697	8.523	466.7	0.177	bla	bla	bla	bla	bla	0.032	0.554	
	PM2.5-1.0	346.6	0.041	265.3	2907	66.36	60.73	31.16	2.336	566.7	0.243	bla	bla	16.48	50.52	bla	0.034	2.924	
	PM1.0-0.5	533.2	0.017	561.7	795.5	81.06	67.79	26.05	2.718	719.6	0.180	bla	bla	17.65	59.93	bla	0.044	2.066	
	PM0.5-0.25	409.7	0.041	399.4	3060	87.53	46.62	6.579	3.312	625.5	0.328	bla	bla	3.539	9.944	bla	0.196	4.983	
	PM<0.25	46.24	0.016	121.2	3260	bla	10.16	15.34	7.994	172.7	0.347	12.30	18.20	78.40	4.127	11.12	0.046	1.622	12.33
	PM2.5	1336	0.116	1348	10021	234.9	185.3	79.13	16.36	2085	1.099	12.30	18.19	78.40	41.79	131.5	0.046	1.896	22.31
	PM<0.25/>PM2.5	0.14	0.43	0.71	4.98	<1	>1	1.99	0.94	0.37	1.96	>1	>1	>1	>1	>1	>1	50.69	22.26
P2	PM>2.5	157.3	bla	92.29	bla	34.68	bla	4.113	0.816	91.66	0.032	bla	bla	bla	bla	bla	0.011	0.868	
	PM2.5-1.0	235.4	0.035	302.5	1215	41.55	30.58	19.17	1.794	344.8	0.160	bla	bla	4.298	13.26	bla	0.034	0.765	
	PM1.0-0.5	252.5	0.024	251.5	936.5	43.69	52.03	21.10	1.365	413.4	0.118	bla	bla	13.31	42.44	bla	0.041	1.627	
	PM0.5-0.25	1788	0.050	469.8	1584	146.2	35.73	21.02	3.601	1049	0.442	bla	bla	6.443	14.98	0.196	0.101	4.665	
	PM<0.25	83.93	0.025	74.71	1880	bla	22.86	16.08	4.158	173.2	0.264	14.94	12.46	51.62	11.16	37.29	0.080	5.761	10.29
	PM2.5	2360	0.134	1099	5617	231.5	141.2	77.38	10.92	1980	0.985	16.79	12.46	51.62	35.21	107.9	0.276	5.938	17.34
	PM<0.25/>PM2.5	0.53	>1	0.81	>1	<1	>1	3.91	5.10	1.89	8.25	>1	>1	>1	>1	>1	>1	523.7	11.85
P3	PM>2.5	580.7	0.042	180.8	2435	55.96	613.4	70.56	15.98	1170	0.600	6.927	bla	bla	247.4	848.3	3.404	0.021	3.972
	PM2.5-1.0	163.5	0.036	3.557	320.8	40.20	617.8	50.86	7.176	820.2	0.155	bla	bla	305.9	1041	bla	bla	bla	
	PM1.0-0.5	155.4	0.039	bla	176.3	17.66	670.3	126.6	12.34	1197	0.539	16.25	bla	bla	377.4	1255	2.743	0.026	bla
	PM0.5-0.25	83.36	0.018	bla	bla	11.70	412.6	25.53	3.421	bla	0.054	6.028	bla	bla	138.4	481.7	0.721	0.023	1.342
	PM<0.25	283.5	0.029	118.2	1997	7.458	32.95	18.42	21.01	255.5	0.316	15.51	5.973	25.52	18.39	63.87	0.056	9.555	7.517
	PM2.5	685.7	0.122	121.8	2494	77.02	1734	221.4	43.95	2272	1.064	37.79	5.973	25.52	840.2	2842	3.520	9.604	8.860
	PM<0.25/>PM2.5	0.49	0.69	0.65	0.82	0.13	0.05	0.26	1.31	0.22	0.53	2.24	>1	>1	0.07	0.08	0.02	455.0	1.89
P4	PM>2.5	392.0	0.032	110.8	bla	49.00	44.83	15.91	2.090	369.2	0.080	bla	bla	16.24	56.97	bla	0.015	bla	
	PM2.5-1.0	265.7	0.011	105.7	bla	42.15	59.26	18.29	1.274	376.5	0.239	bla	42.69	20.21	65.62	0.360	bla	bla	
	PM1.0-0.5	223.5	0.040	120.5	bla	45.76	55.65	15.91	0.870	318.8	0.163	bla	bla	16.96	57.34	2.080	0.009	bla	
	PM0.5-0.25	174.1	bla	96.00	bla	36.02	bla	9.736	1.076	bla	0.206	8.847	211.2	30.42	bla	bla	1.287	bla	1.902
	PM<0.25	500.2	0.013	54.16	2093	10.98	19.94	12.41	2.811	120.4	0.350	13.93	11.85	35.47	11.19	42.54	0.038	30.64	4.030
	PM2.5	1164	0.063	376.4	2093	134.9	134.9	56.33	6.032	815.6	0.958	22.78	265.7	65.89	48.36	165.5	3.764	30.65	5.933
	PM<0.25/>PM2.5	1.28	0.41	0.49	>1	0.22	0.44	0.78	1.34	0.33	4.38	>1	>1	>1	0.69	0.75	>1	2043	>1
P5	PM>2.5	868.9	0.033	668.5	6287	110.3	bla	4.514	15.82	926.9	0.632	bla	bla	63.39	bla	bla	0.093	0.020	1.518
	PM2.5-1.0	476.6	0.081	468.9	3599	77.71	59.37	24.13	6.247	667.5	0.350	bla	bla	3.204	11.98	29.20	0.244	0.036	1.066
	PM1.0-0.5	384.8	0.028	582.0	2902	85.02	107.9	20.28	3.746	707.4	0.303	bla	bla	6.264	31.94	102.4	bla	0.026	0.487
	PM0.5-0.25	235.8	bla	383.1	4817	55.09	bla	1.654	4.498	bla	0.318	7.332	6.016	80.02	bla	bla	0.144	0.075	5.169
	PM<0.25	163.4	bla	111.8	2223	bla	44.07	39.23	9.705	315.0	0.404	22.63	13.13	65.39	23.29	83.07	0.650	49.77	11.22
	PM2.5	1261	0.110	1546	13541	217.8	211.3	85.30	24.19	1690	1.375	29.96	19.15	154.9	67.21	214.6	1.037	49.9	17.94
	PM<0.25/>PM2.5	0.19	<1	0.17	0.35	<1	>1	8.69	0.61	0.34	0.64	>1	>1	1.03	>1	>1	6.99	2489	7.39
P6	PM>2.5	1712	0.080	882.5	5485.7	145.1	6.735	16.19	16.92	1216	0.792	1.761	bla	bla	bla	bla	bla	0.085	4.701
	PM2.5-1.0	731.1	0.041	424.9	851.8	102.3	67.75	41.25	8.420	910.5	0.438	88.27	bla	bla	15.99	50.05	0.688	0.136	5.936
	PM1.0-0.5	716.6	0.118	471.5	1128	158.20	78.64	13.57	4.447	845.2	0.491	0.962	bla	bla	15.99	39.16	bla	0.038	2.166
	PM0.5-0.25	437.7	0.008	308.8	1273	73.24	bla	7.763	5.050	bla	0.224	14.69	6.497	128.8	bla	Bla	bla	0.103	8.696
	PM<0.25	673.9	0.006	98.99	1813	3.758	25.31	8.944	3.272	140.9	0.260	21.62	6.684	32.57	9.001	32.22	0.179	11.25	5.691
	PM2.5	2559	0.173	1304	5065	337.5	171.7	71.53	21.18	1897	1.412	125.5	13.18	161.36	40.99	121.4	0.867	11.53	22.49
	PM<0.25/>PM2.5	0.39	0.08	0.11	0.33	0.03	3.76	0.55	0.19	0.12	0.33	12.28	>1	>1	>1	>1	>1	132.35	1.21
P7	PM>2.5	614.4	0.058	454.9	2378	95.91	26.82	9.523	9.176	801.5	0.357	bla	bla	bla	bla	bla	bla	0.019	1.298
	PM2.5-1.0	614.4	0.091	1055	7186	109.2	63.97	21.23	7.634	787.5	0.497	bla	bla	57.69	11.93	40.59	bla	0.106	2.371
	PM1.0-0.5	579.4	0.077	830.6	4347	93.10	106.0	22.98	8.615	766.5	0.432	bla	bla	12.98	29.45	98.06	bla	0.044	1.523

S. Çankaya ve B. Pekey / Fotokopi merkezlerinde partikül madde konsantrasyonlarının ve element kompozisyonlarının belirlenmesi

	PM0.5-0.25	96.12	0.023	223.7	1785	20.20	bla	1.471	2.222	bla	0.136	3.405	2.885	35.81	bla	bla	0.016	0.014	2.417
	PM<0.25	558.3	0.044	110.8	2869	13.27	96.21	27.61	18.49	388.0	0.533	28.47	30.45	66.11	43.47	145.0	0.586	29.46	16.03
	PM2.5	1848	0.234	2220	16186	235.8	266.2	73.28	36.97	1942	1.598	31.88	33.34	172.6	84.84	283.7	0.603	29.62	22.34
	PM<0.25/>PM2.5	0.91	0.76	0.24	1.21	0.14	3.59	2.90	2.02	0.48	1.49	>1	>1	>1	>1	>1	>1	1551	12.35
P8	PM>2.5	842.4	0.055	262.3	3592	64.29	677.7	57.79	21.55	1542	0.902	bla	81.70	37.34	330.5	1119	6.855	0.073	4.707
	PM2.5-1.0	248.3	0.036	64.43	935.9	39.98	653.9	66.85	8.055	1075	0.294	bla	55.00	1.248	362.9	1224	0.189	0.029	1.422
	PM1.0-0.5	131.4	0.036	13.41	bla	4.357	720.6	83.53	6.529	1113	0.358	bla	bla	bla	430.1	1453	5.234	0.038	bla
	PM0.5-0.25	68.48	bla	10.55	bla	33.30	730.2	63.51	6.624	335.5	0.155	4.446	0.212	bla	373.4	1282	0.049	0.181	5.900
	PM<0.25	59.42	0.001	71.58	1165	4.452	54.01	20.97	9.056	325.9	0.336	17.61	15.81	43.54	29.09	93.42	0.203	2.398	12.34
	PM2.5	507.6	0.073	159.9	2101	82.09	2159	234.9	30.26	2849	1.143	22.05	71.01	44.79	1195	4053	5.675	2.645	19.66
	PM<0.25/>PM2.5	0.07	0.02	0.27	0.32	0.07	0.08	0.36	0.42	0.21	0.37	>1	0.19	1.17	0.09	0.08	0.03	32.85	2.62
P9	PM>2.5	607.9	0.019	318.2	2520	83.68	83.92	25.29	12.67	855.6	0.386	bla	bla	bla	28.64	96.98	bla	0.097	4.916
	PM2.5-1.0	289.3	0.030	265.2	208.2	68.84	72.26	17.86	3.909	457.9	0.115	bla	bla	bla	20.16	65.70	bla	0.039	1.825
	PM1.0-0.5	302.0	0.033	275.2	176.4	59.83	113.1	21.41	3.485	680.6	0.129	bla	bla	bla	38.19	127.7	bla	0.064	2.032
	PM0.5-0.25	233.6	0.004	222.2	897.5	55.06	220.7	24.70	4.927	123.9	0.168	9.133	5.008	19.79	39.78	139.9	0.104	0.145	7.249
	PM<0.25	147.2	0.030	252.5	3527	bla	12.87	11.82	5.457	203.4	0.355	13.38	14.29	78.11	4.251	16.39	0.026	27.16	8.257
	PM2.5	972.2	0.097	1015	4809	183.7	418.9	75.80	17.78	1466	0.768	22.51	19.29	97.89	102.4	349.8	0.130	27.4	19.4
	PM<0.25/>PM2.5	0.24	1.58	0.79	1.40	<1	0.15	0.47	0.43	0.24	0.92	>1	>1	>1	0.15	0.17	>1	280.0	1.68
Minimum	46.24	0.001	3.557	176.3	3.758	6.735	1.471	0.816	91.658	0.032	0.962	0.212	1.248	3.539	9.944	0.016	0.009	0.487	
Maksimum	1788	0.118	1055	7186	158.2	730.2	126.6	21.55	1542	0.902	88.26	211.2	128.8	430.1	1453	6.855	49.77	16.03	

\*bla: belirlenme limitinin altında



## **Şiddetli sıcak hava dalgaları: dinamik-fiziksel etkenler ve bu sıcak hava dalgalarının özellikleri**

Meral Demirtaş<sup>1\*</sup>

*18.08.2016 Geliş/Received, 28.11.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.297005

### **ÖZ**

Sıcak hava dalgası (SHD) oluşumunu tetikleyen, idamesini yapan dinamik ve fiziksel etmenler incelenmiştir. Yüksek basınç sistemlerinin SHD işlemlerindeki rolünden dolayı, atmosferik bloklamanın belirlenmesi için bir metot tanımlanmıştır. SHD teşhisinde, yere ve zamana göre değişen referans sıcaklığını bularak, SHD parametrelerini hesaplayan bir metot kullanılmıştır. 2003, 2012 ve 2015 Haziran-Temmuz-Ağustos dönemlerine ait 500hPa jeopotansiyel yüksekliği, 850hPa sıcaklığı, toprak nemi ve deniz yüzeyi sıcaklıklarının iklim ortalamalarından olan sapmaları analiz edilmiştir. Bu dönemlerdeki dinamik ve fiziksel etmenler, atmosferik bloklama ve SHD bulgularıyla birlikte irdelenmiştir. Sonuçlar, SHD en çok Ege Bölgesi'nde etkili olduğunu göstermektedir. Yaz aylarında yıldan yıla görülen değişkenlikler iklim değişkenliğinin göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıcak hava dalgaları, atmosferik bloklama, iklim değişkenliği

## **Intense heat waves: dynamical-physical factors and characteristics of these heat waves**

### **ABSTRACT**

Dynamical and physical factors that trigger and maintain heat waves (HW) were examined. Since high pressure systems play a role in HW processes, an atmospheric blocking method was introduced. A HW detection method which employs spatially and temporally changing reference temperature to compute HW parameters was used. Departures from climate averages of 500-hPa geopotential height, 850-hPa temperature, sea-surface-temperatures and soil wetness of 2003, 2012 and 2015 June-July-August were analyzed. HWs were examined together with dynamical and physical factors, atmospheric blocking and HW characteristics. Results indicate that HWs were influential over the Aegean region. Year-to-year variability in summer temperatures is considered as signs of climate variability.

**Keywords:** Heat waves, atmospheric blocking, climate variability

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Dr Meral Demirtaş

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü - [mdemirtas@omu.edu.tr](mailto:mdemirtas@omu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sıcak hava dalgaları; insan sağlığına, yaşam konforuna, verimliliğine etki eder, ölümcül durumlara ve ölüme, orman yangınlarına, kötü hava kalitesine, aşırı elektrik ve su tüketimine sebep olurlar [1-3]. Ayrıca, ekosisteme, kuraklaşmaya, tarımda üretim kaybına ve turizm üzerinden ekonomiye etkileri olmaktadır [4].

Yüksek etkili sıcak hava dalgaları (YESHD) artan miktar ve uzunluklarda, Avrupa'yı [5] ve ülkemizi [6] yakından etkilemektedir. Etki düzeyine göre bu sıcak hava dalgalarına göz attığımızda; 2003 ve 2010 yazlarında meydana gelen muazzam sıcak hava dalgalarının öne çıktığını görürüz. Avrupa'da gösterdiği yüksek etkisi nedeniyle 2003 yılı yazında gerçekleşen muazzam sıcak hava dalgası [7-9], 40,000 kişinin ölümüne, çok geniş orman yangınlarına, tarımda üretim kaybına, aşırı enerji tüketimine sebep olmuştur. 2010 yılında Rusya'nın batı bölgesinde ve civar ülkelerde aşırı etkili olan ve yansımaları yurdumuza kadar uzanan muazzam sıcak hava dalgası [10] ise, Rusya'da 15,000 kişinin ölümüne ve 600 orman yangınına sebep olmuştur. Bunlar kadar etkili olmasa da 2000, 2006 [11], 2007 [12], 2012 ve 2015 sıcak hava dalgaları, Avrupa'da, Akdeniz'de ve yurdumuzda etkili olmuşlardır.

Çeşitli araştırma çalışmaları [7, 13-15] önümüzdeki onarlı yıllarda sıcak hava dalgası olaylarının daha sık ve şiddetli olacağını işaret etmektedirler. Hükümetlerarası İklim Değişimi Panel'inin (*Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC*) [16] sentez raporuna göre, geçtiğimiz 1400 yıl içinde, 1983-2012 dönemi en sıcak 30 yıllık dönem olarak vurgulanmıştır. Raporda ayrıca, sıcak hava dalgalarının daha sık oluşacağı ve daha uzun süreceği, küresel ortalama yer sıcaklığının 2016-2025 döneminde, 1986-2005 dönemine göre, 0.3-0.7°C daha fazla olması beklendiği belirtilmektedir. Küresel sera gazları (KSG) üretim durumu devam ederse, çeşitli KSG seviyelerine göre yapılan iklim projeksiyon çalışmaları, küresel sıcaklığın bu yüz yılın sonunda 2.6-4.8°C kadar artacağını işaret etmektedir. KSG etkisiyle oluşabilecek sıcaklık stresi üzerine yapılan bölgesel iklim çalışmaları [14, 17], Akdeniz bölgesinin iklim sistemi içinde en fazla etki gören yerlerden olduğunu ve artan sıcaklıkları, azalan yağışları ve yıl içindeki sıcak sezon değişikliklerindeki artışı vurgulamaktadır.

Etkileri bu denli yüksek olan sıcak hava dalgalarının oluşum ve idamesinin sebepleri, dinamik ve fiziksel yönleriyle ele alındığında, ilgili süreçlerde eş zamanlı olarak etki eden ve birbirlerini pozitif yönde besleyen başlıca etmenlere ve konuda yapılan araştırmalara bakmak faydalı olacaktır:

- i. Uzun ömürlü yüksek basınç sistemleri: Sıcak hava dalgalarını tetikleyen ve idame eden en temel ve en önemli dinamik etkidir [9, 18, 19]. Uzun ömürlü yüksek basınç sistemleri atmosferdeki genel akışa etki edip, akışın önünü kapatıp, onun yönünü değiştirmesi nedeniyle "atmosferik bloklama" adı verilir [20-23]. Bu tip yüksek basınç sistemleri, buldukları bölgede, batılı akışın önünü kapatarak, gelen yeni sistemlerin daha kuzeyli ve/veya güneyli enlemlere yönelmelerine sebep olduklarından, kendi üzerlerinde buldukları bölgedeki hava koşullarına orada kaldıkları sürece doğrudan nüfuz ederler. Uzun süreli yüksek basınç sistemleri fiziksel etkileriyle, yaz aylarında sıcak hava dalgasının oluşumuna ve idamesine aşağıda belirtilen yönleriyle sebep olurlar:
  - a. Yüksek basınç sistemlerinin dinamik özellikleri arasında yer alan aşağı yönlü (inici) hareket nedeniyle, adyabatik olarak ısınma meydana gelir.
  - b. İnici hareketler ayrıca; bulut oluşumunun önüne geçer, böylece açık gökyüzü durumu oluşur ve kuru hava koşullarını destekler.
  - c. Açık gökyüzü nedeniyle, güneşten gelen kısa dalga boylu ışınımın çok büyük bir kısmı yere kadar ulaşır.
  - d. Güneşten gelen yüksek ışınımın etkisiyle, yer seviyesinde hem ısınma artar ve hem de buharlaşma ile su kaybı, bu da toprak neminin azalmasına yol açar.
  - e. Aşırı derece ısınan yer yüzeyinden olan uzun dalga boylu ışınım artar ve bu da atmosferin aşağı kesiminde (atmosferik sınır tabakada) ısı birikiminin artmasına neden olur.
  - f. Suyla kaplı alanlarda ise, bulutsuz gökyüzü nedeniyle güneşten yere ulaşan yüksek ışınım, su sıcaklıklarının artışına neden olur. Sıcaklığı artan su, zaman içinde üzerinde tesir eden yüksek basınç sistemine pozitif yönde katkıda bulunarak, onu daha da güçlendirebilir.
  - g. Sıcak bölgelerden sıcak havanın taşınması (adveksiyonu).
- ii. Atmosferik Sınır Tabaka: Atmosferin yer ile temas eden en alt kesimi olan ve atmosferik sınır tabaka (AST) denilen, bizim de içinde yaşadığımız kısım, gün içinde ısıyı toplar. Aşırı ısınan AST'nin durumu gece pek değişmeyebilir, çünkü gündüz aşırı ısınan yerden, gece yukarıya doğru uzun dalga boylu ışınım olur, bu da gece serinlemesinin önüne geçer [9, 19, 24]. Bu nedenle, ertesi sabah, güne yüksek sıcaklık ile başlanır. Birbirini sürekli olarak besleyen bu pozitif etki süreci devam ettikçe, AST hem daha sıcak

ve hem de daha derin olur. 2003 ve 2010 YESHD üzerine yapılan çalışmalarda, AST'nin 500-m'den 4-km'ye kadar çıktığı not edilmiştir [9, 19]. Bu durum, sıcak hava dalgası döneminde, hava sıcaklığının neden artarak devam ettiğini fiziksel olarak açıklar. Oldukça ısınan AST, temas halinde olduğu altındaki yüzeye tesir eder ve buharlaşmayı tetikleyerek, toprak neminin buharlaşma ile azalmasına ve tükenmesine yol açarak, toprağın kurummasına ve zamanla çatlamasına sebep olur. Bu durumun, 2003 ve 2010 YESHD dönemlerinde, sıcaklıkların rekor seviyeye ulaşmasına neden olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [19, 25].

iii. Toprak Nemi: Toprak nemi oldukça yavaş seyirde değişir, haftalar hatta aylar sürebilir, bu nedenle de önceki ayların/mevsimlerin toprak nem kapasitesi, yaz aylarındaki hava koşullarını etkileme potansiyeline sahiptir [26, 14]. Kış ve/veya ilkbahardaki yağış azlığı, toprak nemi eksikliğine neden olur. Bunun üzerine, bir de uzun ömürlü yüksek basınç sistemlerinin sebep olduğu açık gökyüzü koşulları eklendiğinde, ısınan havanın etkisiyle, toprak nemi azalmaya ve zamanla tükenmeye başlar. Topraktaki nem kayb olduğunda, yerden olan ısı akışı artar [14] ve nem olmadığından, ona dayalı buharlaşma işleminin sağladığı serinleme de azalır [27]. Bulut oluşumu gerçekleşemez ve güneşten yere ulaşan ışınım daha da artar, bu pozitif geri besleme AST'nin daha fazla ısınmasına ve dolayısıyla günlük sıcaklığın daha da artmasına neden olur [19]. Yapılan model simülasyonları, 2003 ve 2010 YESHD esnasındaki toprak neminin sıcak hava koşullarına pozitif yöndeki etkisini göstermiştir [19, 24, 26, 28].

iv. Deniz Yüzeyi Sıcaklıkları: Deniz yüzeyi sıcaklıkları (DYS), atmosfer ve okyanus arasındaki enerji değişim sürecinde çok önemli bir role sahiptir. Aşırı DYS anormalleri (en az 30 yıllık ortalamalarından olan sapmalar), hemen üzerindeki atmosfer sıcaklığına etki ederek, enlemsel sıcaklık dağılımını değiştirebilir. Bu da kuzeyli enlemlerle orta enlemler arasında yer alan kutupsal akımın (*Polar Jet*), alışıla gelen konumundan daha kuzey enlemlere çıkmasına ve güneyli enlemlerde yer alan tropik akımların (*Subtropical Jet*) orta enlemlere kadar uzanmasına neden olur. Bunun sonucunda, ilgili yüksek basınç sistemlerinin tesir alanı genişler ve bu da akabinde DYS anormallerinin daha da artmasına yol açar. Yüksek basınç sistemi bölgede kaldığı sürece, Atlantik Okyanusu üzerinden gelebilecek daha serin atmosfer akımlarının önü kapatıldığından, Akdeniz DYS'nin serinlemesinin önüne geçilmiş olur [29]. Yüksek basınç sistemi etkisini sürdürdükçe, aşağı doğru hareketler nedeniyle ısınma ve açık gökyüzü durumu devam

eder, bu da yine güneşten gelen ışınımın günlerce devam etmesine ve DYS'nin artarak devamını sağlar. Aşırı sıcak DYS de üzerindeki atmosfer tabakasını etkilediğinden, ilgili bölgedeki yüksek basınç sisteminin güçlenmesine ve idamesine katkıda bulunur. 2003 YESHD oldukça sıcak olan Akdeniz DYS değerleri ile yakından ilgili olduğu yapılan modelleme çalışmaları göstermektedir [9, 29, 30].

Avrupa, Akdeniz ve yurdumuz üzerine yapılan çalışmalar, sıcaklıktaki genel ve bölgesel değişimlere dikkati çekmektedir. Yurdumuzda günlük sıcaklıkların artan yöndeki değişimi [31-33], batı bölgelerimizdeki sıcak hava dalgalarındaki artış trendi [6] ve ülkemizi de içine alan Akdeniz bölgesi sıcak hava dalgası araştırma çalışmaları [14, 34, 35], artan yöndeki değişime dair önemli bulgular sunmaktadır. Balkanlar'ın batısı, Türkiye'nin batısı ve Karadeniz kıyıları sıcak hava dalgası oluşum noktaları olarak saptanmış ve bunlardaki artışa vurgu yapılmıştır [34]. Yurdumuzun batı kesimlerine yönelik yapılan bir çalışmada [6], 1965-2006 dönemi incelenmiş, özellikle 1998'den itibaren bu bölgedeki sıcak hava dalgalarının sayısında ve süresinde artış olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada ayrıca, ülkemizi çevreleyen denizlerin sıcak hava dalgalarıyla olan ilişkisi de incelenmiş ve Karadeniz ile doğu Akdeniz'in deniz suyu sıcaklıklarıyla yakından ilişkili olduğu not edilmiştir.

Yukarıda değinilen çalışmaların büyük bir kısmı istasyon bazında ve istatistiksel analizlere dayanmaktadır. Bu yeni çalışma ise, atmosfer modeli analiz datası kullanarak, grid bazında, etkili sıcak hava dalgalarını, onların oluşumunda ve idamesinde çok önemli rol oynayan dinamik ve fiziksel etmenlere, özellikle atmosferik bloklama analizini de dahil ederek irdelemeyi ve ilgili dönemlerde meydana gelen sıcak hava dalgalarının sayısı, toplam süresi, şiddeti ve etki yoğunluğu hakkında elde edilen bulguları sunmayı amaçlamaktadır.

## 2. VERİ VE METOTLAR (DATA AND METHODS)

Bu çalışmada Avrupa Orta Vade Hava Tahminler Merkezi (*European Centre for Medium-Range Forecasts-ECMWF*) tarafından hazırlanan atmosfer analiz veri seti ERA-Interim (EI) [36] kullanılmıştır. Bu veri setinden alınan meteorolojik parametreler, yatay düzlemde  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  derece sıklıkla yer almaktadır.

Sıcak hava dalgalarının oluşumunda ve idamesinde önemli rol oynayan dinamik ve fiziksel etmenlerin analizi için kullanılan bazı parametrelerin (500 hPa jeopotansiyel yüksekliği, 850 hPa seviyesindeki sıcaklık, DYS ve toprak ıslaklığı) uzun yıllar (1979-2009) ortalamasından

olan sapmaları (anomali) için ECMWF-EI veri seti kullanılmıştır. Yaz dönemi olarak Haziran-Temmuz-Ağustos (HTA) ayları göz önüne alındığından, bu aylara ait uzun yıllar ortalaması hesaplanmış ve üzerinde çalışılan yılların ilgili dönemleri ile aralarındaki farklar alınmak suretiyle, uzun yıllar ortalamalarından olan sapmalar (anomali) hesaplanmıştır.

## 2.1. İki Boyutlu Atmosferik Bloklama Teşhis Metodu (Two Dimensional Atmospheric Blocking Detection Method)

Atmosfer akımlarının önünü kapatan uzun süreli ve etkili yüksek basınç sistemlerinin objektif olarak teşhisi için çeşitli metotlar kullanılmakta ve bunlar başlıca iki grupta toplanmaktadır:

- 500-hPa basınç seviyesinin jeopotansiyel yüksekliğine dayanan metotlar [21, 23, 37]
- Potansiyel vortisiti [38, 39] parametresine dayanan metotlar [22, 40, 41]

Bu çalışmada ilk grupta yer alan 500 hPa jeopotansiyel yüksekliğine dayanan metot [21] uygulanmaktadır. Bu metot, güneyde ve kuzeyde seçilen enlemlerdeki, 500hPa jeopotansiyel yüksekliklerinin, merkezi enleme göre değişimini hesaplar ve bunlardan elde edilen sonuçlara göre, bloklamayı saptar. Metotta yer alan güney enlemindeki (*GHGS*) ve kuzey enlemindeki (*GHGN*) hesaplama Denklem (1)'de verilmektedir:

$$GHGS = \frac{Z(\lambda, \phi_c) - Z(\lambda, \phi_s)}{\phi_c - \phi_s} \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z(\lambda, \phi_n) - Z(\lambda, \phi_c)}{\phi_n - \phi_c} \quad (2)$$

Burada; ele alınan boylamda ( $\lambda$ ) ve enlemden bulunan 500hPa jeopotansiyel yüksekliğini ifade etmektedir. merkezi enlemi, en yukarıdaki kuzey enlemini, en aşağıdaki güney enlemini, ise ilgili enlem ve boylam değerlerinin değişebileceği sınırları gösterir. Buna göre, Denklemler (1-2)'de yer alan bazı parametreler aşağıdaki şekilde açıklım gösterir:

$$\begin{aligned} \phi_c &= 60^\circ N + \Delta \\ \phi_n &= 80^\circ + \Delta \\ \phi_s &= 40^\circ N + \Delta \\ \Delta &= -3.0^\circ, 0^\circ, 3.0^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

Verilen bir boylamda, ilgili günde, atmosferik bloklamanın olması aşağıdaki koşulların sağlanmasına dayanır:

$$GHGS > 0 \text{ ve } GHGN < -5 \text{ m her bir enlemden} \quad (4)$$

Süre  $\geq 4$  gün

Bu metodun iki boyutlu versiyonunda [23], *GHGS* ve *GHGN* parametreleri, Denklem (3)'te verilen kıstaslar içinde değil, tüm enlem ve boylamlar için 30°K enleminden, 70°K enlemine kadar olan aralıkta hesaplanmıştır. Denklem (4)'te belirtilen koşullar, iki boyutlu metotta da uygulanmaktadır. Atmosferik bloklamanın zaman ölçek koşulu, [21] çalışmasında olduğu gibi dört gündür. Yapılan atmosferik bloklama hesaplamalarında ECMWF-EI 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği kullanılmıştır.

## 2.2. Sıcak Hava Dalgası Teşhis Metodu (Heat Wave Detection Method)

Öncelikli olarak vurgulanması gereken, sıcak hava dalgası olması için ille de tarihi sıcaklık rekorlarının kırılmasına gerek olmadığıdır. Zira, sadece bir tek günde birçok sıcaklık rekoru kırılabilir, yüksek sıcaklık değerleri takip eden günlerde devam etmezse, sıcak hava dalgası teşkil etmeyebilir. Sıcak hava dalgasının teşhisinde kullanılacak ölçütler konusunda, uluslararası çalışmalarda üstünde uzlaşılan kesin bir metot yoktur [13, 42]. Yapılan çalışmaların bazıları, statik bir referans sıcaklık değeri kullanırken [43, 44], ortalama maksimum sıcaklıktan 5°C daha büyük ve en az beş gün süre ile devam etmesini ve bazıları da bölgeye göre değişebilen dinamik sıcaklık değerleri için yüzdellik yöntem kullanmaktadır [6, 34, 45, 46]. Belirtilen bu metotlardan ilki her bölgenin klimatolojik (uzun yıllar ortalaması, en az 30 yıl) özellikleri aynı olmadığından uygulamalarda sorun çıkarabilmektedir. Buna yurdumuz üzerinden basit bir şekilde değinmek istersek; Ege Bölgesi ve civarında sıcaklıklar 25-35°C iken, doğu Karadeniz ve alt kesimleri daha düşük sıcaklıklar vardır, daha güney kesimlere geçildiğinde ise sıcaklıklar artar, çünkü güneşten gelen ışınımın artması nedeniyle aşağı enlemler daha fazla ısınmaktadır. Ege üzerinde kullanılan bir sıcaklık eşik değeri, Karadeniz için çok yüksek, güneydoğu Anadolu içinse düşük olabilir. Bu nedenle, çalışmada, bulunan enlem, boylama ve güne göre değişen, yüzdellik metot kullanılmaktadır. Çalışmada yer verilen nesnel ölçütler ve hesaplanılan parametreler aşağıda sunulmaktadır:

- Yere ve güne göre değişen referans sıcaklık değerinin yüzdellik metot ile tayini:

HTA dönemine ait her bir gün için, 1979-2009 dönemindeki yıllara ait 2 m seviyesindeki hava sıcaklığı, her bir nokta için, yüzde 90 seviyesine



tekbül eden en yüksek sıcaklık değeri, ilgili takvim günü (*itg*) merkeze konularak, 7 günlük bir zaman çerçevesi içinde hesaplanır. Bunu yaparken, ilgili günden üç gün öncesi ( $g-3$ ) ve üç gün sonrası ( $g+3$ ) değerleri hesaba katılarak, ilgili değer bulunur.

$$S_{referans90} = \bigcup_{y=1979}^{2009} \bigcup_{itg=g-3}^{g+3} S_{y,itg} \quad (5)$$

Burada:  $S_{referans,90}$  yüzdeleri metotta 90. seviyedeki referans maksimum sıcaklığı, U kullanılan veri setindeki sıcaklığın yıl (*y*) ve ilgili takvim günü (*itg*) bileşimini,  $S_{y,itg}$  ilgili yıl ve takvim günündeki sıcaklığı ifade etmektedir.

- ii. Zaman ölçütü: İncelenen noktadaki sıcaklık değerlerinin, ilgili takvim günlerine ait referans sıcaklıklarını en az 3 gün aralıksız aşması.
- iii. Sıcak hava dalgalarının sayısı: HTA dönemi içinde, (i) ve (ii)'de belirtilen koşulları sağlayan sıcak hava dalgalarının sayısıdır.
- iv. Sıcak hava dalgası dönemlerinin süresi ( $SHDDS$ ): İncelenilen HTA dönemi içinde muhtelif sayıda sıcak hava dalgası (i) ve (ii)'de belirtilen koşulları sağlamak suretiyle oluşabilir. Bunların her birisi sıcak hava dalgası dönemi olarak göz önüne alınır ve hüküm sürdükleri günler her biri için hesaplanır.
- v. Sıcak hava dalgası toplam süresi ( $SHDTS$ ): (iv)'te hesaplanılan her bir sıcak hava dalgası dönemine ait günlerin toplamıdır.

$$SHDTS = \sum SHDDS \quad (6)$$

- vi. Sıcak hava dalgasının yoğunluğu: Her bir noktadaki sıcaklık değeri ile (i)'de hesaplanılan referans sıcaklık değeri arasındaki farkın, ilgili sıcak hava dalgası döneminde geçen her gün için hesaplanması ve bunların toplamıdır. =

- a. Sıcak hava dalgası döneminin yoğunluğu ( $SHDDY$ ):

$$SHDTS = \sum_{n=1}^{shdds} (S_{maksimum} - S_{referans}) \quad (7)$$

- b. Toplam yoğunluk: HTA döneminde görülen  $SHDDY$  değerlerinin toplamıdır.

$$SHDTY = \sum SHDDY \quad (8)$$

- vii. Sıcak hava dalgasının şiddeti: Sıcak hava dalgasının yoğunluğunun, o sıcak hava dalgasının süresine olan oranıdır.

- a. Sıcak hava dalgası döneminin şiddeti ( $SHDDY$ ):

$$SHDDŞ = \frac{SHDDY}{SHDDS} \quad (9)$$

- b. Toplam şiddet: HTA döneminde görülen  $SHDDŞ$  değerlerinin toplamıdır.

$$SHDŞH = \sum SHDDŞ \quad (10)$$

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

Bu çalışmada; Avrupa'da, Akdeniz'de ve ülkemizde etkisi görülen 2003, 2012 ve 2015 HTA dönemlerine ait sıcak hava dalgaları seçilmiş, bunların oluşumuna ve idamesine etki eden dinamik ve fiziksel faktörler, atmosferik bloklama ve gerçekleşen sıcak hava dalgalarının özellikleri analiz edilmiştir. Aşağıda her bir sıcak hava dalgası dönemine ait sonuçlar sunulmaktadır.

#### 3.1 Yaz 2003 Sıcak Hava Dalgaları (The 2003 Summer Heat Waves)

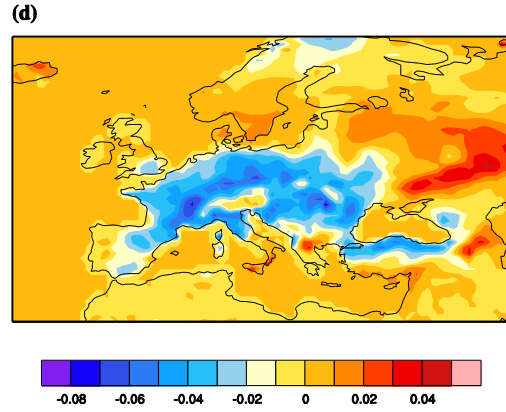
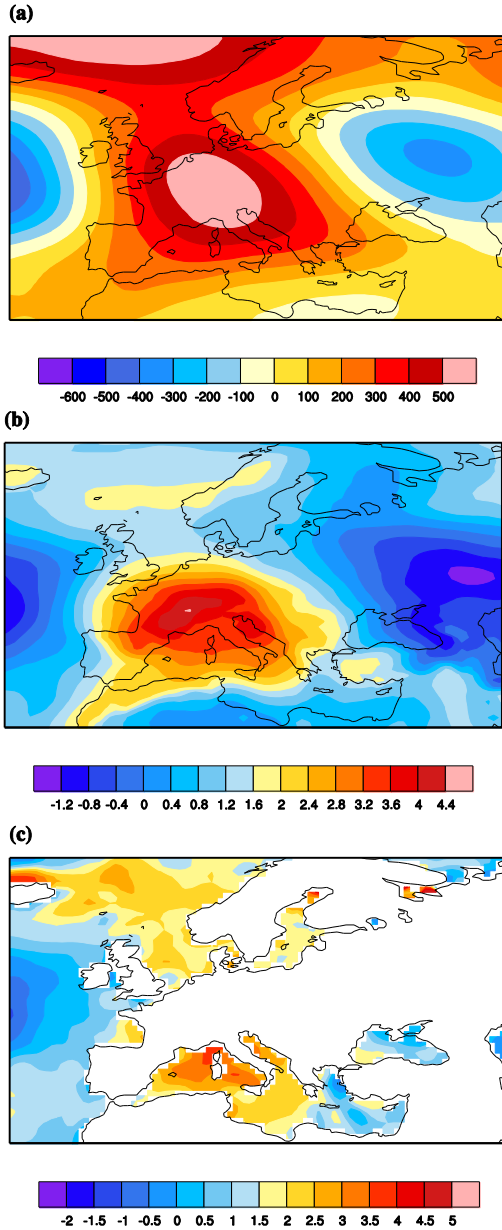
2003 YESHD, atmosfer bilimleri arasından oldukça önemli bir yere sahiptir, çünkü hem göstermiş olduğu iklim ortalamalarından olan beklenmedik muazzam sapmalar ve hem de sebebiyet vermiş olduğu toplumsal ve çevresel etkiler nedeniyle. Yapılan ayrıntılı bir değerlendirme çalışmasına [48] göre: İspanya ve Portekiz'de günlük en yüksek sıcaklıklar 40°C dereceyi, Fransa'nın güneyinde 36-38°C dereceleri, kuzeyinde ise 32-36°C dereceleri aşmıştır. Genel olarak sıcaklıklar ortalamaların 7.5-12.5°C üzerinde olmuştur. Portekiz, İspanya, İtalya ve Yunanistan'da toplamda 739,000 ha orman alanı yanmıştır. Bu denli etkili olan sıcak hava dalgasının dinamik, fiziksel ve istatistiksel çalışmaları çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmıştır [7-9, 24]. Özellikle batı ve merkez Avrupa'da çok etkili olan 2003 YESHD, ülkemizde o kadar etkili olmamış, ancak Ege kıyı kesimlerinde kendisini hissettirmiştir.

2003 HTA dönemine ait 500hPa jeopotansiyel yükseklik anomalisinin alansal dağılımına bakıldığında (Şekil 1a), Britanya da dahil olmak üzere bütün Avrupa'ya kapsadığını ve güney doğuda Marmara'ya kadar uzandığını görülmektedir ve bu sonuçlar önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir [48]. En yüksek değerlerin olduğu merkez ise Avrupa'nın ortasında yer almaktadır. Aynı bölgenin 850hPa sıcaklık anomalisine göz atıldığında (Şekil 1b), ortalamadan 4.4°C derece üzerinde olduğu, yurdumuzda ise Ege'nin güneyinde 2°C civarında olduğu dikkat çekmektedir.

Sıcak hava dalgalarının idamesinde önemli rol oynayan bir başka parametre olan DYS anomalisi göz önüne alındığında ise, kuzey batı Akdeniz'de ortalamalardan

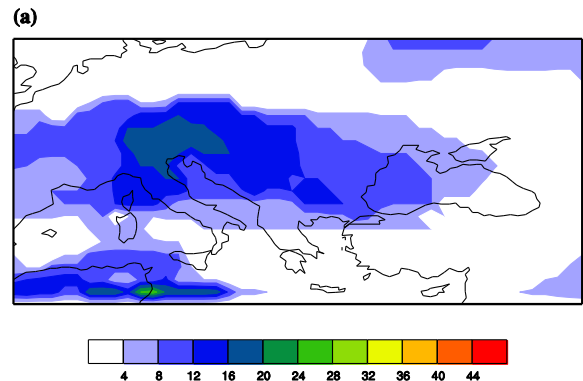
4°C derece üzerindedir (Şekil 1c), ve bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalara oldukça yakındır [9, 29, 30]. Yüksek DYS anomali değerleri, sıcak hava dalgasının idamesinde ve şiddetinde DYS rol oynadığına işaret etmektedir.

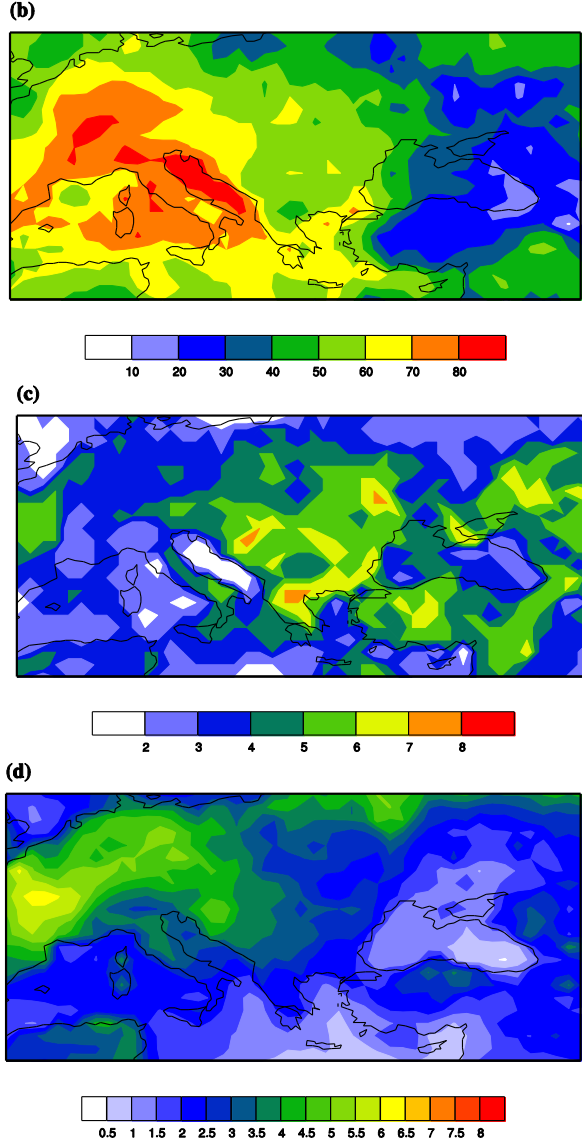
YESHD olaylarında, bir diğer önemli fiziksel etken olan toprak nemliliği durumu incelendiğinde, İspanya'nın kuzey doğusundan, yurdumuzun kuzey kesimlerine kadar uzanan oldukça geniş bir alanda kuraklık değerleri dikkat çekmektedir (Şekil 1d). Bu durum toprağın ne denli kuruduğunu ve yere yakın seviyedeki atmosferik sınır tabakayı etkileyebileceğini göstermektedir.



Şekil 1. 2003 HTA dönemi değerlerinin, uzun yıllar (1979-2009) klimatolojik ortalamalarından olan farkı (anomali): a) 500 hPa jeopotansiyel yükseklik anomali (gpm); b) 850 hPa sıcaklık anomali (°C); c) Deniz suyu sıcaklığı anomali (°C); d) Toprak ıslaklığı (m) (Figure 1. 2003 JJA anomalies (with respect to 1979-2009) for: a) 500 hPa geopotential height (in gpm); b) 850 hPa temperature (in °C); c) Sea surface temperature (in °C); d) Soil wetness (in m) (water equivalent).)

2003 HTA döneminin dinamik olarak idamesinde yüksek basınç sisteminin ne kadar süre kaldığına bakmak için atmosferik bloklama analizi yapıldığında, Avrupa'nın iç kesimlerinde en yüksek bloklama gün sayıları tespit edilmiştir (Şekil 2a). Bu ilgili alan Şekil 1c ve Şekil 1d ile de örtüşerek, uzun süreli yüksek basınç sistemleri ile toprak ıslaklık durumunun birbirini etkilediklerine işaret etmektedir. 2003 HTA döneminde meydana gelen sıcak hava dalgası toplam süresi hesaplandığında, özellikle Avrupa'nın iç kesimlerinde 70-80 güne varan uzunlukta olduğunu, yurdumuzda ise Ege ve çevresinde 40-50 güne vardığı görülmektedir (Şekil 4b). İlgili dönemde meydana gelen toplam sıcak hava dalgası sayısı dağılımına bakıldığında, batı Avrupa'da 5-6, Balkanlar'da 7-8 kadar olduğu, ülkemizde Marmara civarında 6-7 sayılarına vardığı not edilmiştir (Şekil 2c). Sıcak hava dalgası şiddetine göz atıldığında, en yüksek değerlerin Avrupa merkezde olduğunu ve günlük sıcaklık artış oranının 6°C derecenin üstünde ve yurdumuzda ise 0.5-1.5°C. olduğunu işaret etmektedir (Şekil 2d).





Şekil 2. 2003 HTA dönemine ait a) Atmosferik bloklaşma toplam gün sayısı; b) Sıcak hava dalgası toplam gün sayısı; c) Sıcak hava dalgası toplam sayısı; d) Sıcak hava dalgasının toplam şiddeti (°C). (Figure 2. For the 2003 JJA period: a) Total atmospheric blocking days; b) Total heat wave days; c) Total number of heat waves; d) Total heat wave intensity (°C).)

### 3.2 Yaz 2012 Sıcak Hava Dalgaları (The 2012 Summer Heat Waves)

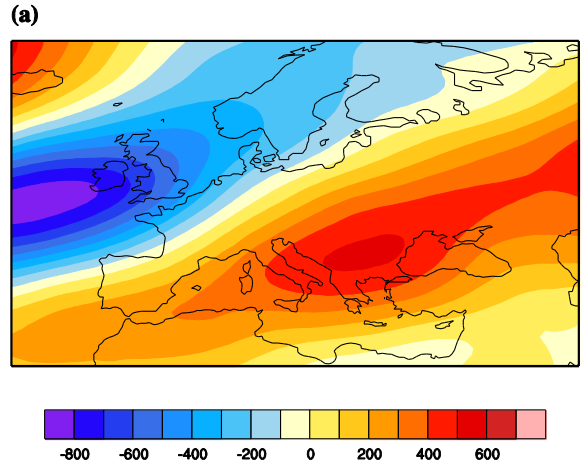
2012 HTA döneminde özellikle etkisini gösteren sıcak hava dalgaları, güney-doğu Avrupa’da, bazı Akdeniz ülkelerinde ve yurdumuzda etkili olmuştur [49]: İspanya’da üç ayrı sıcak hava dalgası, Haziran ve Ağustos aylarında etkisini göstermiş ve birçok yerde sıcaklıklar 40°C derecenin üzerinde olmuştur. Sırbistan ve Bosna’da son 120 yılın en sıcak yaz dönemi yaşanmış ve ilgili sıcak hava dalgalarının en az 6 gün hüküm sürdüğü kayıt edilmiştir. Slovenya ve İtalya,

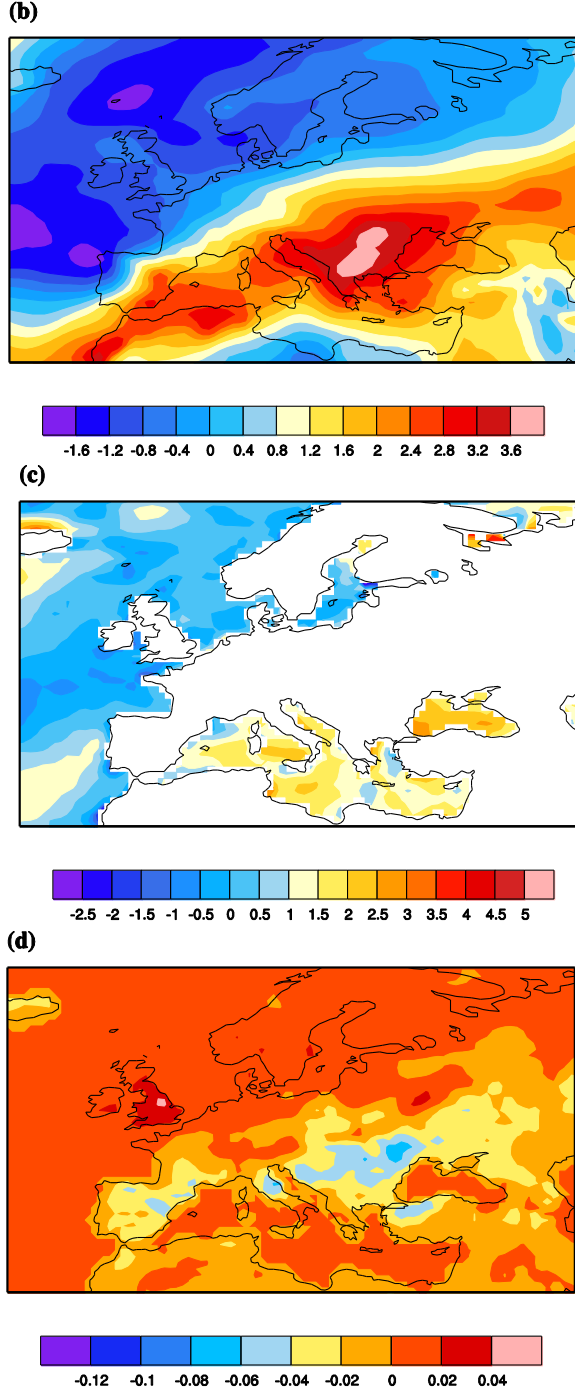
tarihlerindeki en sıcak ikinci yazı geçirmişlerdir. Türkiye’de ise en yüksek sıcaklıklar Haziran ve Temmuz döneminde kayıt edilmiş ve en yüksek sıcaklık 46.7°C ile Nusaybin’de gerçekleşmiştir. En yüksek sıcaklık değerleri incelendiğinde, yedi ilimizde tüm zamanların en yüksek sıcaklıklarının kırıldığı ve bunlardan beş tanesinin sıcaklığının 40°C derecenin üzerinde olduğu, beş tanesinde ise uzun yıllar en yüksek sıcaklık ortalamasından olan farkın 10°C derecenin üzerinde gerçekleştiği saptanmıştır. (Ayrıntılar için EK’te verilen ayrıntılı sıcaklık değerlerine bakınız.)

İlgili meteorolojik parametrelerin anomali değerleri analiz edildiğinde: 500hPa jeopotansiyel yüksekliği anomali alanının güney-batıdan kuzey-doğuya uzanan bir bant şeklinde olduğu ve en yüksek değerlerin merkezinin güney Avrupa’da konumlandığı (Şekil 3a) not edilmektedir. 850hPa seviyesindeki sıcaklık anomalisinin de aynı bölgede etkin olduğu ve en yüksek değerlerin 3.8°C civarında olduğu görülmektedir (Şekil 3b). Bu seviyede böylesine yüksek anomali değerlerinin olması, yer seviyesinde yüksek sıcaklıkların beklenebileceğini işaret etmektedir.

DYS anomali sonuçlarının analizi, Karadeniz’de 2-3°C dereceye varan, Ege ve Akdeniz’de ise 1-2°C derecelik uzun yıllar ortalamalarından sapmalar olduğunu göstermektedir (Şekil 3c). Etkilenen bölgeye daha yakın olması münasebetiyle Karadeniz üzerindeki DHS anomalisinin etkin olabileceği düşünülmektedir.

Toprak nemliliğinin anomali dağılımına bakıldığında, etkin bölgedeki değerlerin sıfırın altında olduğu, ona yakın alanların da oldukça kuru olduğunu görülmektedir (Şekil 3d). Yurdumuzda ise, özellikle kuzey batı kesimlerinin en çok etkilendiği ve diğer kesimlerin de oldukça kuru değerlere yaklaştığı not edilmektedir (Şekil 3d). Bu değerler 2012 sıcak hava dalgasının ilgili bölgelerdeki tarımsal sulamaya olan ihtiyacın fazla olabileceğini işaret etmektedir.



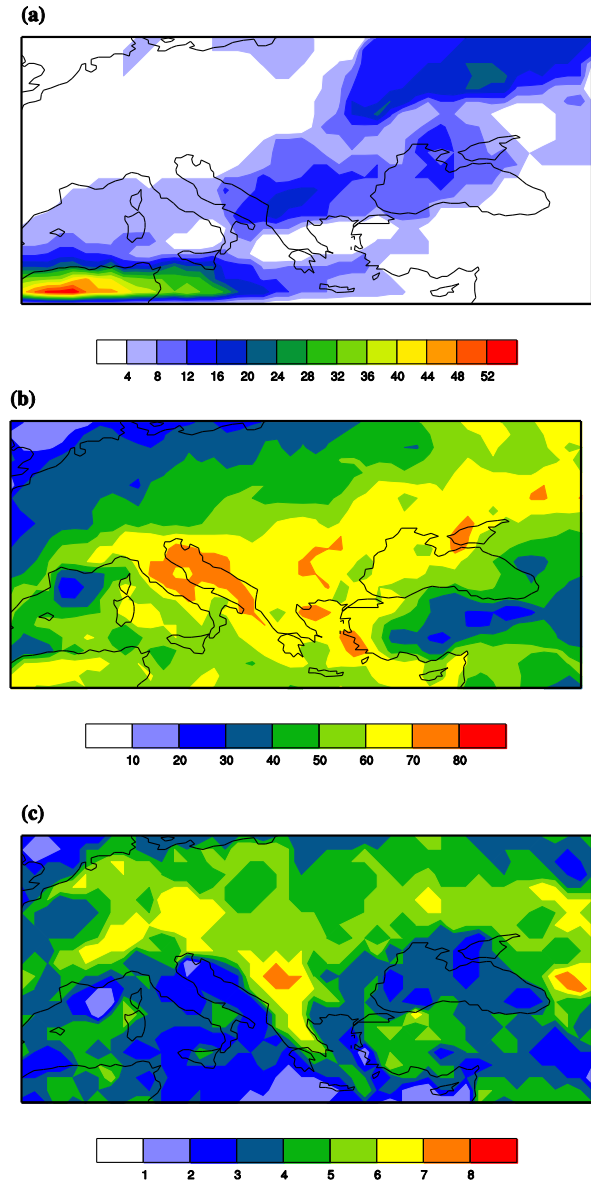


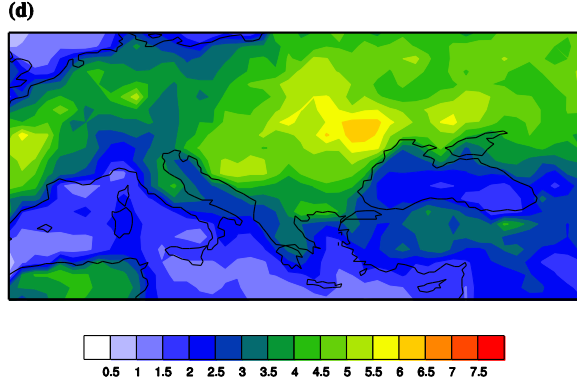
Şekil 3. 2012 HTA dönemi değerlerinin, uzun yıllar (1979-2009) klimatolojik ortalamalarından olan farkı (anomali): a) 500hPa jeopotansiyel yükseklik anomalisi (gpm); b) 850hPa sıcaklık anomalisi ( $^{\circ}\text{C}$ ); c) Deniz suyu sıcaklığı anomalisi ( $^{\circ}\text{C}$ ); d) Toprak ıslaklığı (m) (Figure 3. 2012 JJA anomalies (with respect to 1979-2009) for: a) 500hPa geopotential height (in gpm); b) 850hPa temperature (in  $^{\circ}\text{C}$ ); c) Sea surface temperature (in  $^{\circ}\text{C}$ ); d) Soil wetness (in m) (water equivalent).)

Atmosferik bloklama analiz sonuçlarına göz atıldığında, ülkemizin kuzeyinde ve kuzey batısındaki atmosferik

bloklama merkezleri ile güney batısındaki bloklama merkezleri dikkati çekmekte ve bunların batıdan gelebilecek sistemlerin önünü kapattığına dair ipucu vermektedir (Şekil 4a).

Bu döneme ait sıcak hava dalgası analizleri, İtalya'dan yurdumuzun özellikle batı kesimlerine kadar uzanan bir alanın sıcak hava dalgalarından en fazla etkilendiğini göstermektedir (Şekil 4b). Sıcak hava dalgası toplam sayısı hesaplamaları, en yüksek değerlerin (7-8 tane) güney Avrupa'da olduğunu ve yurdumuz üzerinde ise Marmara ve batı Karadeniz'de 5-6 tane olduğunu göstermektedir (Şekil 4c). Bu döneme ait sıcak hava dalgası sıcaklık yoğunluğuna bakıldığında, kuzey doğu Avrupa'da  $6-6.5^{\circ}\text{C}$  derecelere ve yurdumuzun doğu kesimlerinde  $4^{\circ}\text{C}$ 'ye vardığı not edilmektedir (Şekil 4d).





Şekil 4. 2012 HTA dönemine ait a) Atmosferik bloklaşma toplam gün sayısı; b) Sıcak hava dalgası toplam gün sayısı; c) Sıcak hava dalgası toplam sayısı; d) Sıcak hava dalgasının toplam şiddeti (°C). (Figure 4. For the 2012 JJA period: a) Total atmospheric blocking days; b) Total heat wave days; c) Total number of heat waves; d) Total heat wave intensity (°C).)

### 3.3 Yaz 2015 Sıcak Hava Dalgaları (The 2015 Summer Heat Waves)

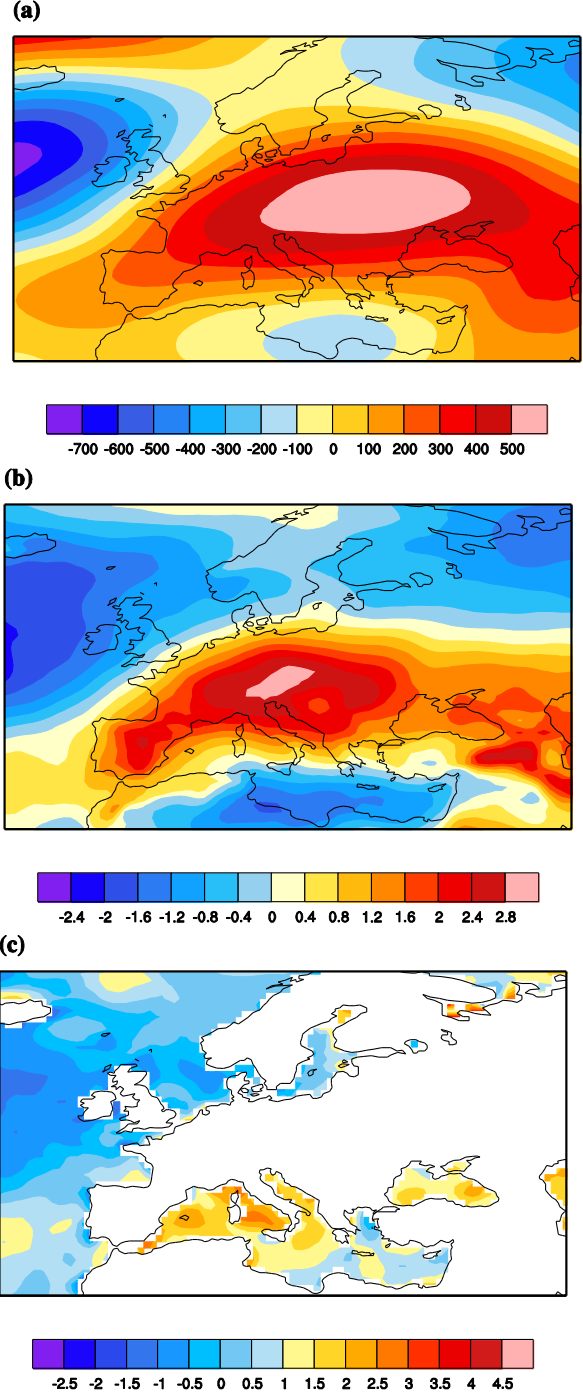
2015 sıcak hava dalgası etkinlikleri Mayıs'ta başlayıp, Eylül ortalarına kadar sürdü. İngiltere, İspanya, Finlandiya, Avusturya, Almanya, Fransa ve Hollanda'da oldukça yüksek sıcaklıklara neden oldu [50]. 20-30 Mayıs döneminde Hindistan'da sıcaklıklar 47°C dereceyi aştı ve 2,500 kişi hayatını kaybetti. 17-24 Haziran döneminde Pakistan'da etkili oldu ve 1,600 can kaybı meydana geldi.

Temmuz ayından itibaren Avrupa'da ve yurdumuz üzerinde etkili olmaya başladı ve Eylül ayına kadar uzadı. Ancak, ülkemizde rekor sıcaklıkların kırılmasına sebep olmadı. Bu da sıcak hava dalgalarının oluşumu için ille de rekorların kırılması gerekmediğini göstermektedir.

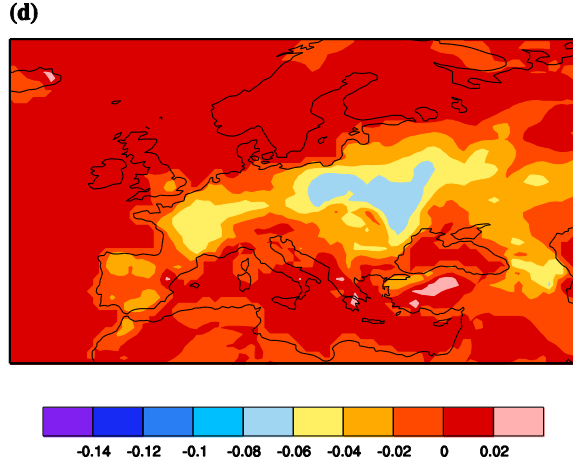
Dinamik ve fiziksel etmenler üzerine yapılan incelemeler, 500hPa jeopotansiyel yüksekliğine ait anomali merkezinin ülkemizin kuzey batısında oldukça yüksek değerlerde yer aldığını göstermektedir (Şekil 5a). Bu değerler 2003 ve 2012 YESHD ile mukayese edildiğinde, onlara yaklaştığını işaret etmektedir. 850hPa seviyesindeki sıcaklık anomalisinin alansal dağılımına bakıldığında, yine aynı bölge üzerinde bir merkezin oluştuğunu ve en yüksek değerlerin 3°C dereceye yaklaştığı ve ülkemizin kuzey kesimlerinde ise 1-1.5°C olduğu, güney kesimlerinde ise tersine, ortalamaların altında olduğu not edilmektedir (Şekil 5b).

Bir diğer önemli etmen olan DYS anomalisinin dağılımına bakıldığında, özellikle batı Akdeniz ve Karadeniz'de 2.5°C dereceye varan en yüksek değerlerin yer aldığı dikkat çekmektedir (Şekil 5c).

Kara üzerinde ise, toprak ıslaklığının ilgili dönemdeki değerlerinin uzun yıllar ortalamalarından olan sapmaları incelendiğinde (Şekil 5d), en düşük değerlerin olduğu bölgenin aslında Şekil 5a'daki alan içinde olduğu, diğer bölgelerin ise kuraklık göstermediği dikkat çekmektedir. Uzun ömürlü yüksek basınç sisteminin sebebiyet verdiği etkiler burada kendisini göstermektedir.





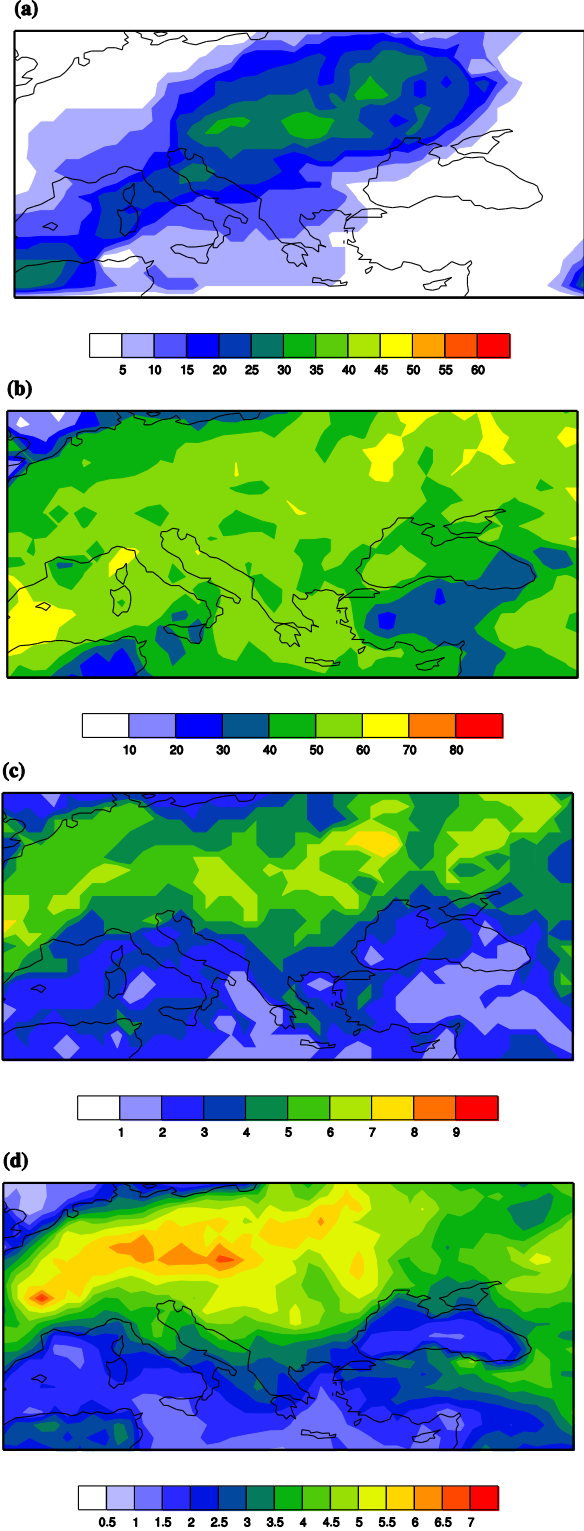


Şekil 5. HTA 2015 dönemi değerlerinin, uzun yıllar (1979-2009) klimatolojik ortalamalarından olan farkı (anomali): a) 500hPa jeopotansiyel yükseklik anomalisi (gpm); b) 850hPa sıcaklık anomalisi (°C); c) Deniz suyu sıcaklığı anomalisi (°C); d) Toprak ıslaklığı (m). (Figure 5. 2000 JJA anomalies (with respect to 1979-2009) for: a) 500hPa geopotential height (in gpm); b) 850hPa temperature (in °C); c) Sea surface temperature (in °C); d) Soil wetness (in m) (water equivalent).)

Atmosferik bloklaşma sonuçları, Şekil 5a'daki alanı da kapsayan bir alanda bloklaşmanın gerçekleştiğini ve en uzun sürenin Avrupa üzerinde 35-40 gün kadar olduğunu işaret etmektedir (Şekil 6a). Atmosferik bloklaşmanın konumu, kuzey Afrika'dan, kuzey Avrupa'ya kadar uzanan bir alanda, sıcak karakterli havanın güney batılı rüzgarlarla taşındığına ve ayrıca bloklaşmanın batıdan gelebilecek daha serin karakterli sistemlerin önünü kapattığına işaret etmektedir.

2015 HTA döneminde gerçekleşen sıcak hava dalgalarının toplam süresine bakıldığında, Türkiye'de en çok etkilenen bölgelerin 40-60 gün, diğer bölgelerin ise 20-30 gün sıcak hava dalgasının etkisi altında kaldığı not edilmektedir (Şekil 6b). Bu dönemde, yurdumuz üzerinde görülen en yüksek sıcak hava dalga sayısı 5 iken, Avrupa'da oldukça geniş bir alanda 6-8 arasındadır (Şekil 6c).

Sıcak hava dalgasının sebep olduğu sıcaklık şiddet değerleri incelendiğinde, sıcak hava dalgası toplam süresinin daha az olduğu yurdumuzun kuzey doğu kesimlerinde, en yüksek değerlere (5-7°C) ulaştığı dikkat çekmektedir (Şekil 6d). Sıcaklık şiddetinin, sıcak hava dalgası toplam gün sayısı ise ters orantılı olduğu göz önüne alındığında, bu doğal bir sonuçtur. Diğer taraftan, çok daha uzun süre sıcak hava dalgasının etkisinde kalan Avrupa'da, sıcaklık şiddetinin 5-7°C dereceye vardığı görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, 2015 HTA sıcak hava dalgasının yarattığı etkili sıcaklıklardan Avrupa'nın daha çok etkilendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. 2015 HTA dönemine ait a) Atmosferik bloklaşma toplam gün sayısı; b) Sıcak hava dalgası toplam gün sayısı; c) Sıcak hava dalgası toplam sayısı; d) Sıcak hava dalgasının toplam şiddeti (°C). (Figure 6. For the 2015 JJA period: a) Total atmospheric blocking days; b) Total heat wave days; c) Total number of heat waves; d) Total heat wave intensity (°C).)



#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRMESİ VE BAZI VURGULAR (CONCLUDING REMARKS)

2003, 2012 ve 2015 yılları HTA dönemine ait sıcak hava dalgalarının analizi, dinamik ve fiziksel yönlerinin yanı sıra, atmosferik bloklama ve sıcak hava dalgası özellikleri bakımından da incelenmiştir. Dinamik ve fiziksel etmenlerin iklim ortalamalarından olan farkları birbirleriyle mukayese edildiğinde, özellikle 2003 ve 2012 yılına ait değerlerin en yüksek olduğu not edilmektedir. DYS açısından bakıldığında, Karadeniz'e ait DYS anomali değerlerinin 2-3°C uzun yıllar ortalamalarının üzerinde olduğu görülmektedir. Toprak neminin ilgili yıllardaki anomalilerine bakıldığında, özellikle 2003 ve 2012'de kuraklık seviyelerini işaret etmektedir. Güney batı ve kuzey batıda meydana gelen atmosferik bloklama, yurdumuzu en çok etkileyen atmosferik dolaşımın sıcak havayı kuzey Afrika ve Akdeniz üzerinden yurdumuza taşınmasına zemin hazırlamaktadır.

Atmosferik bloklama toplam gün sayısı açısından en yüksek değerler 2015 HTA dönemine aittir. Bloklamının konumlanması olarak baktığımızda ise, yurdumuzu en çok güney batıda yer alan ilgili uzun süreli yüksek basınç sistemlerinin etkilediği görülmektedir. En uzun süreli sıcak hava dalgası bölgeleri olarak baktığımızda, kuzey Afrika ve batı Avrupa'nın etkilendiği not edilmektedir. Ülkemizde ise, ilgili bölgeler kuzey batı ve güney batı kesimlerde ve daha çok kıyılarda yer almaktadır. Öte yandan, kuzey ve kuzey doğumuzda yer alan atmosferik bloklamaların hem Karadeniz üzerindeki sıcaklıklarda ve hem de yakın bölgelerde etkili olduğunu göstermektedir. Doğu ve güneydoğu bölgeleri zaten sıcak olmakla birlikte, güney-güneydoğuda yer alan yüksek basınç sistemlerinin etkisiyle sıcak hava dalgalarına maruz kaldıkları not edilmiştir.

Sıcak hava dalgası toplam gün sayısı bakımından ilgili yılların değerlerini birbirleri ile mukayese ettiğimizde, en uzun sürenin 2003 ve 2012'de olduğu görülmektedir. Sıcak hava dalgasının uzun süre devam etmesi durumu çok önemlidir, çünkü sürekli olarak zorlayıcı sıcak hava koşullarına maruz kalmak insan sağlığına ve ekosisteme çok daha fazla zarar vermektedir.

Sıcak hava dalgasına en fazla maruz kalan bölgeler olarak baktığımızda, merkez ve güney Avrupa önde gelmektedir. Yurdumuzda ise, özellikle Ege kıyılarının tüm çalışmalarında öne çıktığı dikkat çekmektedir ki bu yönüyle daha önce yapılan çalışmaların bulgularını da desteklemektedir [6, 34]. HTA dönemlerinde gerçekleşen toplam sıcak hava dalga sayısı analizleri, 2003 ve 2012'de oldukça fazla sayıda olduğunu göstermiştir. Sıcak hava dalgalarının yarattığı sıcaklık

şiddetine baktığımızda, 2003 ve 2012 yıllarının en üst değerlerde olduğu dikkat çekmektedir.

Çalışmanın sonuçları, yıldan yıla yaz aylarındaki sıcaklık değişkenliğini göstermektedir. Bu çalışmada, önümüzdeki onar yıllık dönemlerde sıcak hava dalgalarının yurdumuz üzerinde nasıl bir seyir izleyebileceğine ilişkin iklim projeksiyonu incelemesine yer verilmemiştir, gelecekte yapılacak çalışmalarda buna değinilecektir.

#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmada kullanılan ilgili veriyi temin eden Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ve *European Centre for Medium Range Forecasts* uluslararası kuruluşuna minnettarım. Bu makalenin değerlendirmesinde yer alan hakemlere yapıcı önerilerinden dolayı teşekkür ederim.

**EK (APPENDIX):** Meteoroloji Genel Müdürlüğü kayıtlarına göre, 2012 yazında oluşan sıcaklık rekorları. (The 2012 summer record breaking temperatures – based on the Turkish Meteorological Service's records.)

Tarih	İlin Adı	Maksimum Sıcaklık (°C)	1950-2015 ortalama maksimum sıcaklık (°C)	Fark
15.6.2012	Hatay	43.2	29.2	14.0
15.6.2012	Osmaniye	42.6	31.3	11.3
25.7.2012	Karabük	44.0	32.3	11.7
26.7.2012	Kırıkkale	41.8	31.0	10.8
27.7.2012	Ankara	41.0	30.2	10.8
27.7.2012	Niğde	38.5	29.3	9.2
01.8.2012	Aksaray	38.8	29.3	9.5

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] R. Basu, "High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008, *Environmental Health*", vol. 8, no. 4, DOI: 10.1186/1476-069X-8-40, 2009.
- [2] A. Fink, T. Brücher, A. Krüger, G. Leckebusch, J. Pinto, and U. Ulbrich, "The 2003 European summer heatwaves and drought – synoptic diagnosis and impacts", *Weather*, vol. 59, pp. 209–216, 2004.
- [3] R. Vautard, C. Honore', M. Beekmann, and L. Rouil, "Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios", *Atmos. Environ.*, vol. 39, pp. 2957-2967, 2005.
- [4] P. Ciais et al., "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, vol. 437, pp. 529–533, doi:10.1038/nature03972, 2005.

- [5] D. Coumou and S. Rahmstorf, “A decade of weather extremes”, *Nat. Clim. Change*, vol. 2, no. 7, 491–496, 2012.
- [6] Y. S. Unal, E. Tan, and S. S. Mentés, “Summer heat waves over western Turkey between 1965 and 2006”, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 112, pp. 339–350, doi:10.1007/s00704-012-0704-0, 2013.
- [7] C. Schär, P. L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M. A. Liniger, and C. Appenzeller, “The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves”, *Nature*, vol. 427, pp. 332–336, 2004.
- [8] P. A. Stott, D. A. Stone, and M. R., “M.R., Human contribution to the European heatwave of 2003”, *Nature*, vol. 432, pp. 610–614, doi:10.1038/nature03089, 2004.
- [9] E. Black, M. Blackburn, G. Harrison, B. J. Hoskins, and J. Methven, “Factors contributing to the summer 2003 European heatwave”, *Weather*, vol. 59, pp. 217–223, 2004.
- [10] R. Dole, M. Hoerling, J. Perlwitz, J. Eischeid, P. Pegion, T. Zhang, X-Y. Quan, T. Xu, and D. Murray, “Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave?”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, doi:10.1029/2010GL046582, 2011.
- [11] M. Rebetz, O. Dupont, and M. Giroud, “An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003”, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 95, pp. 1-7, 2009.
- [12] D. Founda and C. Giannakopoulos, “The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece. A typical summer in the future climate?”, *Glob. Planet Change*, vol. 67, no. 3, pp. 227-236, 2009.
- [13] G. A. Meehl and C. Tebaldi, “More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century”, *Science*, vol. 305, pp. 994–997, doi:10.1126/science.1098704, 2004.
- [14] N. S. Diffenbaugh, J. S. Pal, F. Giorgi, and G. Xuejie, “Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspots”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, no. L11706, doi:10.1029/2007GL030000, 2007.
- [15] J. Sillmann, V. V. Kharin, F. W. Zwiers, X. Zhang, and D. Bronaugh, “Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections”, *J. Geophys. Res.*, 118(6), 2473–2493, 2013.
- [16] IPCC., Summary for policymakers. In *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, pp. 1–32, 2014.
- [17] F. Giorgi, “Climate change hot-spots”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. L08707, doi:10.1029/2006GL025734, 2006.
- [18] S. Pfahl and H. Wernli, “Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, no. L12807, doi:10.1029/2012GL052261, 2012.
- [19] D. G. Miralles, A. J. Teuling, C. C. van Heerwaarden, and V. G. de Arellano, “Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation”, *Nat. Geosci.*, vol. 7, pp. 345–349, 2014
- [20] D. F. Rex, “Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action”, *Tellus*, vol. 2, pp. 196-211, 1950.
- [21] T. Tibaldi and F. Molteni, “On the operational predictability of blocking”, *Tellus*, vol. 42A, pp. 34-365, 1990.
- [22] J. Pelly and B. J. Hoskins, “A new perspective on Blocking”, *J. Atmos. Sci.*, vol. 60, pp. 74 -755, 2003.
- [23] M. Demirtaş, “Bidimensional diagnostics of atmospheric blocking and impact of blocking on regional weather, the 7th Atmospheric Sciences Symposium”, Istanbul-Turkey, 28-30 April 2015, pp. 50-59, (ISBN: 978-975-561-461-8).
- [24] E. M. Fische, S. I. Seneviratne, P. L. Vidale, D. Lüthi, and C. Schär, “Soil moisture–atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave”, *J. Clim.* Vol. 20, pp. 5081–5099, 2007.
- [25] E. M. Fischer, “Autopsy of two mega-heatwaves”, *Nature Geoscience*, vol. 7, pp. 332–333, doi:10.1038/ngeo2148, 2014.
- [26] R. Vautard, P. Yiou, F. D’Andrea, N. de Noblet, N. Viovy, C. Cassou, J. Polcher, P. Ciais, M. Kageyama, and Y. Fan, “Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, doi:10.1029/2006GL028001, 2007.
- [27] R. Lorenz, E. B. Jaeger, and S. I. Seneviratne, “Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, no. L09703, doi:10.1029/2010GL042764, 2010.
- [28] L. Ferranti and P. Viterbo, “The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions”, *J. Clim.*, vol. 19, pp. 3659-3680, 2006.

- [29] L. Feudale and J. Shukla, "Role of Mediterranean SST in enhancing the European heat wave of summer 2003", *Geophys Res Lett.*, vol. 34, no. L03811, 2007.
- [30] F. Grazzini and P. Viterbo, "Record-breaking warm sea surface temperature of the Mediterranean Sea", *ECMWF Newsletter 98*, ECMWF, Reading, United Kingdom, pp. 30-31, 2003. [ <http://www.ecmwf.int/publications/>.]
- [31] M. Türkeş, U. M. Sümer and I. Demir, "Re-evaluation of trends and changes in mean, maximum and minimum temperatures of Turkey for the period 1929–1999", *Int. J. Climatol.*, vol. 22, pp. 947–977, doi:10.1002/joc.777, 2002.
- [32] M. Türkeş and U. M. Sümer, "Spatial and temporal patterns of trends and variability in diurnal temperature ranges of Turkey", *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 77, pp. 195-227, 2004.
- [33] E. Erlat and M. Türkeş, "Observed changes and trends in numbers of summer and tropical days, and the 2010 hot summer in Turkey", *International Journal of Climatology*, vol. 33, no. 8, pp. 1898-1908, DOI: 10.1002/joc.3556, 2013.
- [34] F. G. Kuglitsch, A. Toreti, E. Xoplaki, P. M. Della-Marta, C. S. Zerefos, M. Türkeş, and J. Luterbacher, "Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, doi:10.1029/2009GL041841, 2010.
- [35] M. Stefanon, F. D'Andrea, and P. Drobinski, "Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region", *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, doi:10.1088/1748-9326/7/1/014023, 2012.
- [36] D. P. Dee et al., "The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, pp. 553–597, doi:10.1002/qj.828, 2011.
- [37] H. Lejenäs and H. Økland, "Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data", *Tellus*, vol. 35A, pp. 350-362, 1983.
- [38] B. J. Hoskins, M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, "On the use and significance of isentropic potential vorticity maps", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 111, pp. 877-946, 1985.
- [39] M. Demirtaş and A. J. Thorpe, "Sensitivity of short-range weather forecasts to local potential vorticity modifications", *Mon. Wea. Rev.*, vol. 127, no.5, pp. 922-939, 1999.
- [40] S. Scherrer, M. Croci-Maspoli, C. Schwierz, and C. Appenzeller, "Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region. *Int. J. Climatol.*, vol. 26, pp. 233–249, 2006.
- [41] M. Demirtaş, "Diagnostics and frequency of NH atmospheric blocking", *Climate Change and Climate Dynamics International Conference, İstanbul-Turkey*, 8-10 October 2014, pp. 54-58, (ISBN: 978-975-561-445).
- [42] P. J. Robinson, "On the definition of a heat wave", *J Appl Meteorol*, vol. 40, pp. 762-775, 2001.
- [43] P. Frich, L. V. Alexander, P.m Della-Marta, B. Gleason, M. Hayloc, A. M. G. Klein Tank, and T. Peterson, "Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century", *Clim. Res. Vol. 19*, no. 3, 193-212, 2002.
- [44] O. Shevchenko, H. Lee, S. Snizhkoa, and H. Mayerb, "Long-term analysis of heat waves in Ukraine", *Int. J. Climatol.*, vol. 34, pp. 1642-1650, DOI: 10.1002/joc.3792, 2014.
- [45] M. Beniston, "The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. L02202, doi:10.1029/2003GL018857, 2004.
- [46] J. Spinoni, M. Lakatos, T. Szentimrey, Z. Bihari, S. Szalai, J. Vogta, and T. Antofiea, "Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010", *Int. J. Climatol.*, vol. 35, pp. 4197–4209, DOI: 10.1002/joc.4279, 2015.
- [47] S. Russo, A. Dosio, R. G. Graversen, J. Sillmann, H. Carrao, M. B. Dunbar, A. Singleton, P. Montagna, P. Barbola, and V. J. Vogt, "Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world", *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, no. 12, pp.500–512, doi:10.1002/2014JD022098, 2014.
- [48] R. García-Herrera, J. Díaz, R. M. Trigo, J. Luterbacher, and E. M. Fischer, "A Review of the European Summer Heat Wave of 2003", *Critical Reviews in Environmental, Science and Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 267-306, DOI: 10.1080/10643380802238137, 2010.
- [49] J. Blunden and D. S. Arndt, "State of the Climate in 2012", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 94, no. 8, S1–S238, 2003.
- [50] World Meteorological Organization, Statement on the Status of the Global Climate in 2015, WMO-No. 1167, 28pp, 2015.

## **MgF<sub>2</sub> katkısının vermikülit esaslı cam-seramiklerin işlenebilirlik özellikleri üzerine etkisi**

Ediz Ercenk<sup>1</sup>

*28.10.2016 Geliş/Received, 01.12.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.297008

### **ÖZ**

Bu çalışmada doğal hammadde olan Vermikülitten cam-seramik malzemeler üretilmiştir. Çalışmada; Vermikülit ve MgF<sub>2</sub> oranına bağlı olarak işlenebilirlik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. VER80, VER85 ve VER90 şeklinde kodlanan üç ayrı bileşimde K<sub>2</sub>O oranı %5 olarak sabit tutulmuş, MgF<sub>2</sub> ve Vermikülit oranları karşılıklı değiştirilmiştir. Bileşimler bilyeli değirmende 2 saat süre ile karıştırılmıştır. Karıştırma sonrası tozlar elenmiş ve 100 MPa yük altında tek eksenli basma cihazı ile şekillendirilmiştir. Preslenen numuneler 900-1100 °C sıcaklıklarda 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterlenen numuneler X-ışını difraksiyon analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve işlenebilirlik testleri ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar üretilen numunelerin iyi işlenebilirlik özellikleri taşıdığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Vermikülit, Cam-seramik, Sinterleme, İşlenebilirlik

## **The effect of MgF<sub>2</sub> content on machinability properties of vermiculite based glass-ceramics**

### **ABSTRACT**

The study deals with production of the glass-ceramics from natural raw material vermiculite. The machinability properties of the glass-ceramic compositions were investigated depending on vermiculite and MgF<sub>2</sub> contents. The compositions containing 80 %, 85 %, 90 % vermiculite, 5 % K<sub>2</sub>O and MgF<sub>2</sub> as remainder were mixed by using a ball mill for 2 h and coded as VER80, VER85 and VER90. The mixed and milled powders were sieved and disc samples were prepared by pressing at 100 MPa. The shaped samples were sintered at 900-1100 °C for 1 h. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and machinability test were conducted. The results have indicated that the samples have good sintering and machinability properties.

**Keywords:** Vermiculite, Glass-ceramic, Sintering, Machinability

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü - ercenk@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam-seramikler; özel bileşimlere sahip camların kontrollü kristalizasyonu ile üretilen, camlardan daha yüksek mekanik mukavemete, darbe direncine, refrakterlik özelliğine ve daha düşük ısıl genleşme katsayısına sahip olabilen çok kristalli malzemelerdir. Camın cam-seramik malzemeye dönüşümü kristal fazların çekirdeklenme ve büyümelerini kapsayan bir kristalizasyon işlemi ile sağlanır. Bu kristallerin yanı sıra ısıl işlem koşullarına ve camın bileşimine bağlı olarak artık kalan kalıntı cam fazlar da bulunmaktadır [1-4]. Cam-seramiklerin davranışları genel olarak mikro-yapı ve bileşime bağlı olarak gelişen faz oluşumuna göre değişkenlik gösterir [5]. Bir başka deyişle, cam-seramik malzemeler; ısıl işlem rejimi ve bileşim gibi iki önemli parametrenin doğru şekilde uygulanması ile kontrollü şekilde kristallendirilebilirler ve bünyede farklı şekil/boyutlarda kristal fazlar oluşturulabilir. Böylece istenen özelliklerde cam-seramik malzeme üretmek mümkün olabilmektedir. Bu uygulamalardan biride işlenebilir cam-seramiklerdir. Seramikler sahip oldukları temel özelliklere bağlı olarak üretildikten sonra tekrar şekillendirme için uygun değildir. Bu durum seramiklerin metal ve plastiklere göre üstün özelliklerine rağmen belirli kullanımlarında kalmasına sebep olmuştur. Zaman içinde mika esaslı fazların keşif edilmesi ve cam-seramik bünyede kontrollü kristalizasyon ile bu fazların oluşturulması; işlenebilir cam-seramik denilen ve üretim sonrası kısmen tekrar şekil alabilen bir malzeme grubunun üretimine yol açmıştır.

Mika esaslı seramikler sadece şekil alma kabiliyeti ile değil aynı zamanda üstün termal şok dirençleri, yüksek termal genleşme katsayısı ve üstün mekanik özellikleri ile yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler [6]. Bu malzeme grubunun sahip olduğu işlenebilirlik özellikleri plakalı yapıdaki mika kristallerine dayanmaktadır [7]. İşlenebilir fazlar olarak bilinen mika yapıları literatürde "Phlogopite" olarak ifade edilmekle birlikte bu kavram geniş bir ifadedir ve flor içeren ya da içermeyen örnekleri mevcuttur. Fluorophlogopite ifadesi ise flor içeren mikalar için kullanılan bir tanımdır. Genel olarak flor-mika fazlarının yapısı  $X_{0.5-1} Y_{2-3} Z_4 O_{10} (OH, F)_2$  kimyasal formülasyonu ile ifade edilebilir. Burada X, Y ve Z olası katyon köklerini göstermektedir. X elemanı olarak görülen yapı genellikle Flogopit esaslı mikalarında ana bileşenlerinden olup alkali metallerden oluşmaktadır. Burada en sık görülen örnek K<sup>+</sup> olup bu yapının yerini farklı mika kristallerinde Ca<sup>+2</sup>, Sr<sup>+2</sup> ve Ba<sup>+2</sup> gibi toprak alkali metallerde alabilir. Bunların dışında X elemanı sodyum tipi flor-mika kristallerinde kendisini Na<sup>+</sup> şeklinde de gösterir. Y elemanı kendini yaygın olarak

Mg<sup>+2</sup>, Z ise Si<sup>+4</sup> şeklinde formüle edilir. Bu yapıda ayrıca Al<sup>+3</sup> iyonu da sıkça görülen bir bileşendir.

Vermikülit doğal bir mineral olup kimyasal bağlı su içeren magnezyum alüminyum silikat olarak tanımlanmıştır. Genellikle açık maden işletmeciliği ile çıkarılan vermikülit minerali yüksek sıcaklıklarla karşılaştığında genleşme özelliği göstermektedir. Genleşmiş vermikülit daha çok ısı ve ses yalıtımı ile zirai uygulamalarda kullanılmaktadır. Mg, Al ve Si oksitler haricinde yapısındaki başlıca oksitler Ca, K, Fe ve Ti 'dur [8,9]. Flor içeren alkali magnezyum alümina silikat yapıları olarak bilinen işlenebilir flor-mika fazlarının Vermikülit bünyesinde kristallenmesi bu çalışmanın temel hipotezini oluşturmaktadır. Bu işlem için Vermikülit özellikle seçilmiş olup içinde yüksek miktarda MgO içermesi mika kristallerinin oluşumu açısından önemlidir. MgO mika kristallerinin önemli bileşenlerinden olup bünyedeki miktarı %15'in altında olduğunda mika fazlarının kristallenmesi zorlaşmaktadır. Vermikülitte bazı katkıların yapılması ile işlenebilir seramik malzeme üretiminde kullanımı ile ilgili bir çalışma daha önce sunulmuştur [10]. Bu çalışmada ise katkı miktarlarının değiştirilmesi ile farklı bileşimler hazırlanmış Vermikülit miktarının artışı ile faz oluşumu ve işlenebilirlik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan katkılar (K<sub>2</sub>O, MgF<sub>2</sub>) işlenebilir fazların temel bileşenleri olup MgF<sub>2</sub> miktarının değişiminin faz gelişimi üzerine etkileri araştırılmıştır. K ve Mg bileşenleri genel olarak vermikülit bünyesinde bulunan elementler olup katkılardaki MgF<sub>2</sub> flor kaynağı olarak kullanılmıştır. Vermikülit bünyede değişen flor içeriği ile mika fazlarının değişim ve gelişim karakteristikleri incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneylerde kullanılan Vermikülit Sivas-Yıldızeli yöresinde, Organik Madencilik A.Ş. 'den temin edilmiştir. Vermikülit genleşme özelliği gösteren bir malzeme olduğu için önce 1100 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek nem ve uçucuların giderilmesi işlemi uygulanmıştır. Ham vermikülit ve 1100°C 'lik işlem sonrası vermikülitte ait kimyasal bileşimler Tablo 1'de verilmiştir. İşlenebilirlik özelliği kazandırmak için vermikülitte MgF<sub>2</sub> ve K<sub>2</sub>O ilave edilmiştir. Burada MgF<sub>2</sub> katkısı artırılmış buna karşın vermikülit içeriği azaltılmıştır. K<sub>2</sub>O katkısı tüm bileşimlerde sabit tutulmuştur, böylece artan MgF<sub>2</sub> içeriğinin etkileri incelenmiştir. Hazırlanan tozlar alümina bilyeli değirmende kuru ortamda 2 saat süre ile karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Üç farklı bileşim kullanılmış olup kullanılan hammadde oranları ve numune kodları Tablo 2'de verilmiştir.

Belirtilen oranlarda hazırlanan numuneler % 8 su ile nemlendirildikten sonra 150 µm elekten geçirilerek granüle edilmiştir. Granüle tozlardan 4'er gram alınarak 100 MPa yük altında 25 mm çapında çelik kalıp kullanılarak tek eksenli basma cihazı ile silindirik numuneler üretilmiştir. Şekillendirilen numuneler Protherm marka fırında 5°C/dk ısıtma hızı ile ısıtılarak 900, 1000 ve 1100 °C'de 1 saat bekletilmek suretiyle sinterlenmiştir. Sinterlenen numuneler X-ışınları difraksiyon analizi (XRD, Rigaku D/MAX, CuKα radiation, 2θ: 10°-90°) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, Jeol 6060) ile karakterize edilmiştir. Ayrıca her bir numune 5 mm elmas uçlu matkap yardımıyla 205 devir/dk. hızla delinerek işlenebilirlik testleri yapılmıştır.

**Tablo 1.** Vermikülitin kimyasal bileşimi (The chemical composition of Vermiculite)

Oksit	Bileşim %	
	Ham	1100°C'lik işlem sonrası
SiO <sub>2</sub>	37,24	39,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,81	17,06
TiO <sub>2</sub>	2,44	2,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,34	11,98
CaO	2,36	2,58
MgO	17,95	18,99
K <sub>2</sub> O	5,24	5,77
BaO	0,79	0,93
Na <sub>2</sub> O	ESER	ESER
K.K.*	6,75	0,26

\*Kızdırma kaybı

**Tablo 2.** Hammade oranları ve bileşim kodları (The composition rates and sample codes)

Bileşim %	VER 80	VER 85	VER 90
Vermikülit	80	85	90
MgF <sub>2</sub>	15	10	5
K <sub>2</sub> O	5	5	5

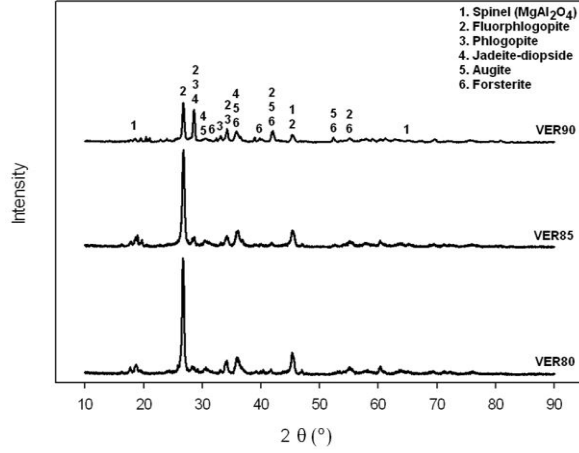
### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş numunelerin XRD analiz sonuçları Şekil 1, 2 ve 3'de görülmektedir. Analiz sonuçlarında Spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Mika (Fluorphlogopite) KMg<sub>3</sub>(Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>)F<sub>2</sub>, Flogopit (Phlogopite) KMg<sub>3</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, Jadeit-diopsit (Jadeite-diopside) (Ca<sub>0,45</sub>Na<sub>0,55</sub>)(Mg<sub>0,37</sub>Fe<sub>0,03</sub>Al<sub>0,6</sub>)(Si<sub>1,92</sub>Al<sub>0,08</sub>O<sub>6</sub>), Ojit (Augite) (Mg,Fe,Ti,Al)(Ca,Na,Fe,Mg)(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub> ve Forsterit (Forsterite) Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> fazları tespit edilmiştir.

Spinel fazı genel olarak 1000 °C 'nin üzerinde kristallenen bir faz olup [11] yaklaşık 18° 'lik 2 θ değerinde tespit edilen spinel faz piki artan sıcaklıkla giderek artmaktadır. Diğer yandan bileşim içindeki Vermikülit oranının artışı ile spinel faz piklerinde belirgin şekilde düşüş görülmektedir. MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sisteminin spinelleşme süreci incelendiğinde iki aşamalı bir proses görülmekte olup ilk aşamada yapı 1100-1300 °C civarlarında nem/uçucu giderme işlemine tabi tutulur. Diğer aşamada ise spinel oluşumu için daha yüksek sıcaklıklarda (1700-1900 °C) sinterleme uygulanır. Yine literatürde uygun oranlar ile çalışıldığında daha düşük sinterleme sıcaklıklarında bu fazın elde edilebildiği rapor edilmiştir [12]. Bu çalışmada spinelleşme için düşük denebilecek sıcaklıklarda çalışılmasına rağmen özellikle VER80 kodlu numune grubunda bu fazın tespit edilmesi ve artan Vermikülit oranı ile şiddetinin azalması; söz konusu bileşimin içerik olarak spinel oluşumuna yakın olduğu düşüncesini oluşturmuştur. XRD sonuçlarında tespit edilen diğer önemli fazlarda Mika fazlarıdır. XRD analizleri sonucunda Mika fazının (Fluorphlogopite) pik şiddetlerinin artan sıcaklık ve Vermikülit bileşimi ile azaldığı görülürken Flogopit fazının (Phlogopite) pik şiddetlerinin artan sıcaklık ve Vermikülit içeriği ile arttığı tespit edilmiştir. Mika fazının oluşumu ile ilgili en önemli reaksiyon potasyum feldspat ile MgF<sub>2</sub> arasındaki etkileşim olarak rapor belirtilmiştir. Bu fazın kristallenmesi ile ilgili bir diğer yaklaşımda; uygun bileşenlerin olduğu bir ortamda 1000 °C sıcaklıklarda forsterite ve MgF<sub>2</sub> 'nin etkileşimi ile meydana gelen reaksiyondur [13]. Bu çalışmada meydana gelen Mika fazının ikinci yaklaşıma uygun şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Bununla birlikte bu fazın 750 °C 'den itibaren kristallendiğini rapor eden çalışmalarda literatürde mevcuttur [14]. XRD sonuçları incelendiğinde Mika fazının tüm sıcaklıklarda kristallendiği ancak fazın pik şiddetlerinin Vermikülit içeriği arttıkça azaldığı gözlenmektedir. Bu durumun artan Vermikülit içeriği ile MgF<sub>2</sub> içeriğinin azalması ve forsterit fazının reaksiyona girecek MgF<sub>2</sub> bulamaması, yapı içindeki forsterit faz miktarının artışı, buna karşın Mika faz içeriğinin Vermikülit katkısı ile düşüşü ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Forsterit fazının oluşum mekanizması da bu fikri destekler niteliktedir. MgO ve SiO<sub>2</sub> yapılarının 1000-1300 °C sıcaklık aralığında reaksiyonları sonucunda forsterit yapısı meydana gelmektedir. Bu çalışmada da artan sıcaklık ile birlikte 1000 °C 'nin üzerinde daha belirgin şekilde forsterite fazının oluştuğu, aynı şekilde artan Vermikülit içeriği ile forsterite oluşumunun arttığı görülmüştür. Vermikülitin bileşimi incelendiğinde yüksek SiO<sub>2</sub> ve MgO içerikleri dikkat çekmektedir. Bu durum; sıcaklıkla birlikte Vermikülit içeriğindeki artışın forsterit oluşumunu teşvik ettiği fikrini doğurmaktadır. Ojit ve diopsit fazları ise alümina silikat esaslı doğal minerallerin kristallenme işlemlerinde sıkça görülen yapılardır [15]. Bununla

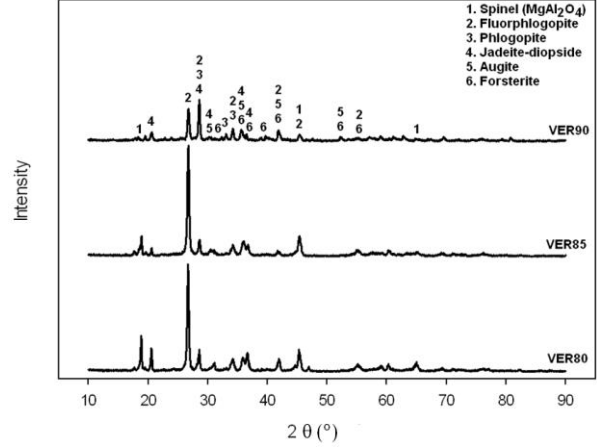


birlikte diopsit esaslı fazların işlenebilirlik ile ilgili olumlu etkiler yaptığı bazı çalışmalarda rapor edilmiştir [7, 16].

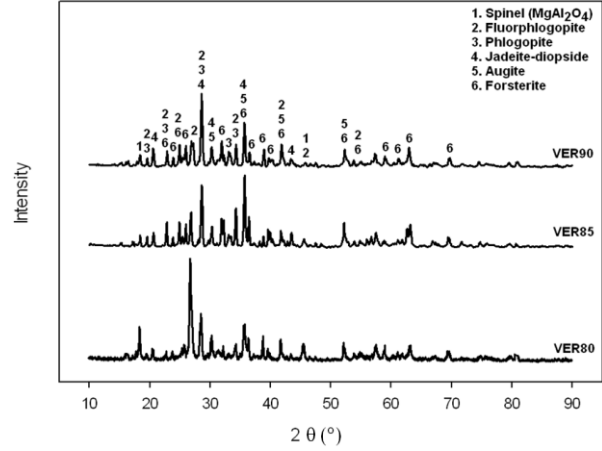


Şekil 1. 900 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri, 1. Spinel 2. Mika 3. Flogopit 4. Jadeit-diopsit 5. Ojit 6. Forsterit (The XRD analysis of the samples sintered at 900 °C, 1. Spinel 2. Fluorphlogopite 3. Phlogopite 4. Jadeite-diopside 5. Augite 6. Forsterite)

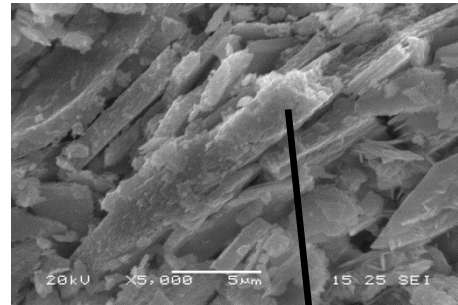
Numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 4, 5 ve 6 'da görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde çubuksal ve levhasal mika kristalleri tüm sıcaklık ve bileşimlerde net bir şekilde gözlenmektedir. İşlenebilirliği oluşturan bu yapılar mikro-yapı içinde homojene yakın şekilde dağılım göstermektedir. Şekil 4 'de verilen EDS analizinde (VER80) Mika fazına ait bileşenler net şekilde görülmekte olup ilgili bölgede bu kristal yapılar tespit edilmiştir. Genel olarak mika kristalleri iki tetrahedral tabaka arasındaki bir oktahedral tabaka olarak yapılırlar. Oktahedral tabaka oksijen, hidroksil ve katyonların bulunduğu florin gruplarını içerirken, tetrahedral tabakalar ise hegzagonal ağda birbirine bağlı Si-O tetrahedronlarından oluşur [13]. Mika kristalleri bu şekilde tekrarlı olarak üç boyutlu bünyede tabakalı yapıda uzanırlar. Mikro-yapılar incelendiğinde bu yapıların izlenmesi mümkündür. Şekil 5 'de verilen VER85 kodlu numunenin EDS analizinde ise Flogopit fazının bileşenlerine uygun bir sonuç elde edilmiş olup ilgili bölgede bu fazın kristallendiği tespit edilmiştir. XRD analiz sonuçlarından da teyit edildiği üzere artan Vermikülit katkısı ile bünyede MgF<sub>2</sub> katkısının azalmasının flor içermeyen mika yapılarına dönüşüm şeklinde kendini gösterdiği düşünülmektedir. Şekil 6 'da gösterilen VER90 numunesine ait EDS analizi ise ilgili bölgede forsterit yapısının kristallendiğini göstermektedir. Genel olarak SEM görüntüleri ve EDS analizleri XRD sonuçlarını destekler niteliktedir.



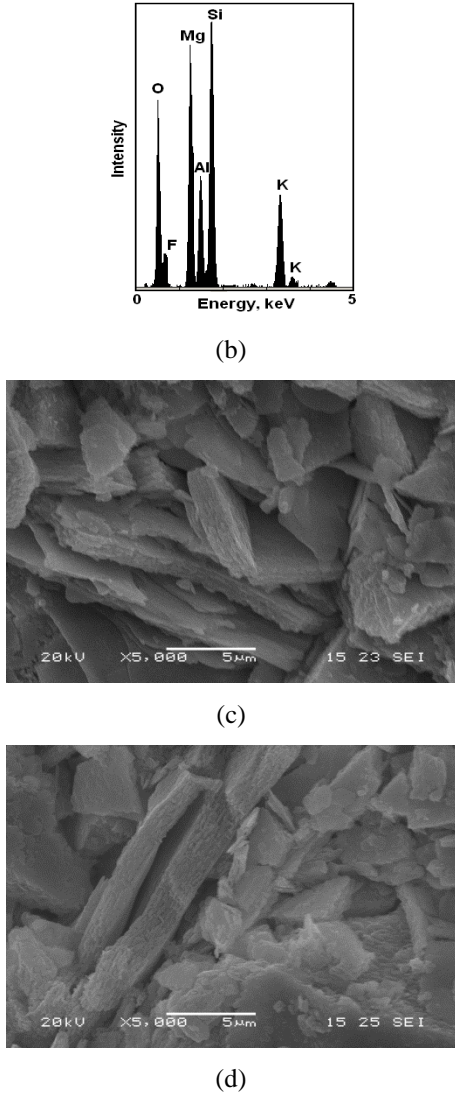
Şekil 2. 1000 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri, 1. Spinel 2. Mika 3. Flogopit 4. Jadeit-diopsit 5. Ojit 6. Forsterit (The XRD analysis of the samples sintered at 1000 °C, 1. Spinel 2. Fluorphlogopite 3. Phlogopite 4. Jadeite-diopside 5. Augite 6. Forsterite)



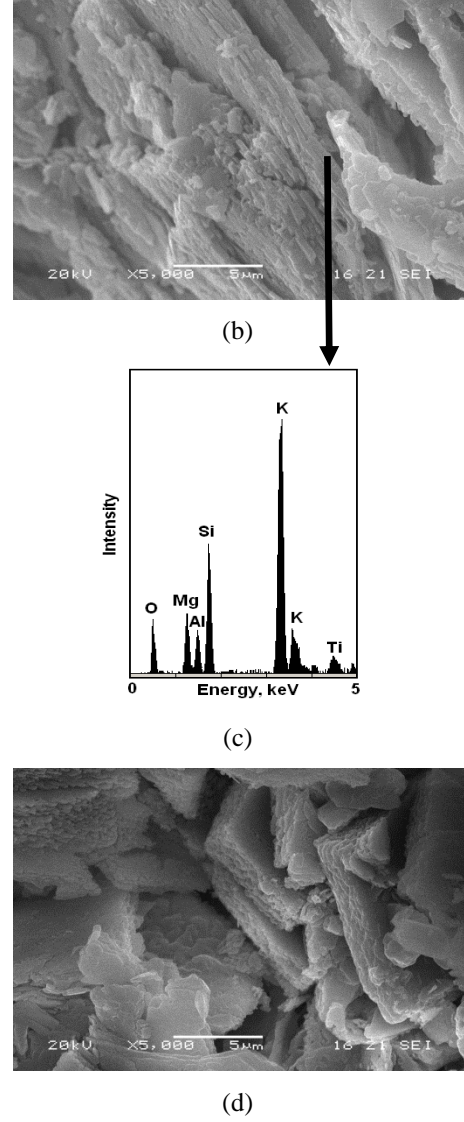
Şekil 3. 1100 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait XRD analizleri, 1. Spinel 2. Mika 3. Flogopit 4. Jadeit-diopsit 5. Ojit 6. Forsterit (The XRD analysis of the samples sintered at 1100 °C, 1. Spinel 2. Fluorphlogopite 3. Phlogopite 4. Jadeite-diopside 5. Augite 6. Forsterite)



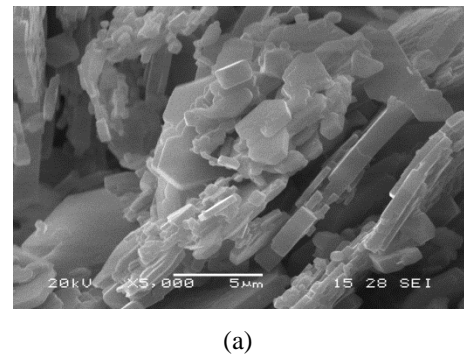
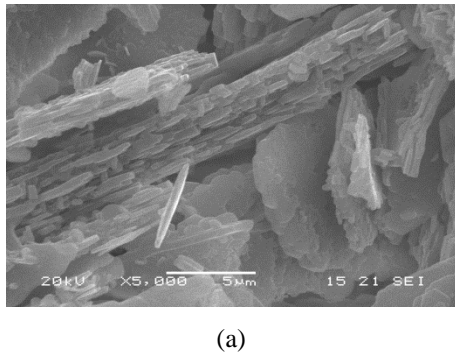
(a)

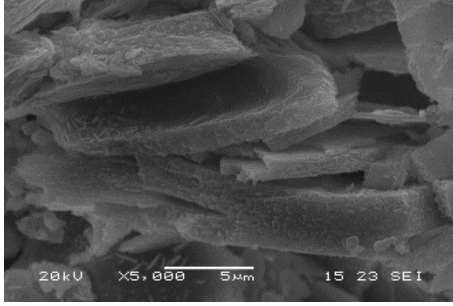


Şekil 4. 900 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) VER80 b) VER80'e ait EDS analizi c)VER85 d)VER90 (The SEM images and EDS analysis of samples sintered at 900 °C a)VER80 b) the EDS analysis of VER80 c)VER85 d)VER90)

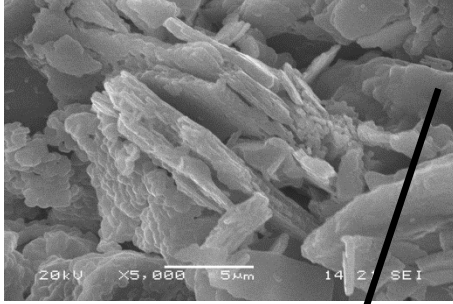


Şekil 5. 1000 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri a)VER80 b)VER85 c)VER85'e ait EDS analizi d) VER90 (The SEM images and EDS analysis of samples sintered at 1000 °C, a) VER80 b)VER85 c) the EDS analysis of VER85 d)VER90)

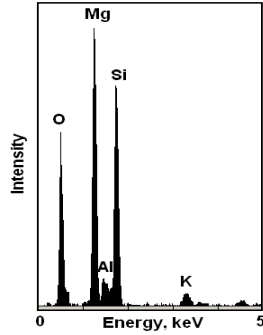




(b)



(c)

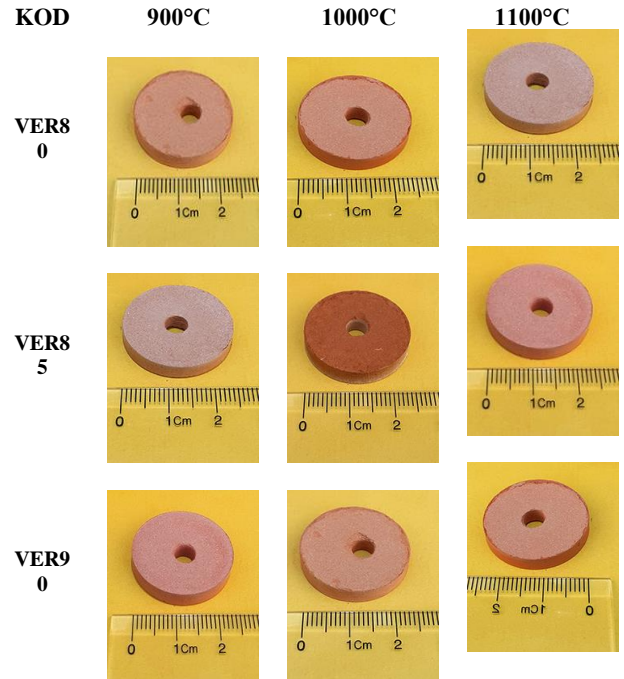


(d)

Şekil 6. 1100 °C 'de sinterlenmiş numunelere ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri a)VER80 b)VER85 c) VER90 d) VER90'e ait EDS analizi (The SEM images and EDS analysis of samples sintered at 1100 °C, a)VER80 b)VER85 c) VER90 d) the EDS analysis of VER90)

Şekil 7 'de numunelere ait makro görüntüler şeklinde işlenebilirlik testleri sonrası sonuçlar verilmiştir. İşlenebilirlik testlerinde yaklaşımlar farklı olabilir, öyle ki bazı testler birim yükün birim zamanda numune üzerine uygulanması ile elde edilen işleme derinliklerini ortaya koyarken, bazı testler ise numunelerin birim yük altında delinip delinmediği veya delinirken herhangi bir hatanın oluşup oluşmadığını kontrol eder. Bu çalışmada; işlenebilirlik testleri uygulanırken rakamsal değerler ortaya koymaktan ziyade üretilen numunelerin delinip delinmediği veya delinirken kırılma/çatlama gibi olumsuzların gözlenip gözlenmediği esasına göre incelemeler yapılmıştır. Yapılan gözlemlerde amaç; vermikülit içeriğindeki kademeli artışın malzemenin delinme dolayısı ile işleme kabiliyetine etkisinin

incelenmesidir. Makro görüntüler incelendiğinde numunelerin tamamının başarılı bir şekilde delindiği tespit edilmiştir. Genel olarak tüm bileşim ve sıcaklıklarda gerekli işlenebilirlik özelliklerine ulaşabilmesi, yapı içerisinde mika fazlarının oluştuğunun kanıtıdır. Bu yapılar düşük Vermikülit içeriklerinde (VER80) kendisini Mika olarak gösterirken yüksek Vermikülit içerikli numunelerde (VER90) azalan flor içeriğine bağlı olarak Flogopit yapısına dönüşmüştür. Numunelerde gözle ve elle yapılan muayede kaba şekilde sinterlemenin başarılı olduğu ancak numunelerin kırılmaya meyilli olduğu tespit edilmiştir. Bu durum uygulanan sıcaklıkların bünyede tam anlamı ile sinterleme etkisinin oluşmaması ve daha mukavemetli bir yapının oluşması için sıcaklıkların bir miktar daha artırılması gerektiği düşünülmektedir.



Şekil 7. Sinterlenen numunelerin işlenebilirlik testi sonrası makro görüntüleri (The macro images of the samples after the machinability tests)

#### 4.SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışma Vermikülitin esaslı yapıda farklı oranlardaki  $MgF_2$  katkısının işlenebilirlik ve yapıdaki faz oluşumuna etkileri incelenmiştir. Vermikülitte katılan  $MgF_2$  'ün mikro-yapısal değişimler ve faz oluşumuna etkileri gözlenmiştir. Alınan sonuçlar düşük Vermikülit katkılarında Mika (Fluorophlogopite) fazının, yüksek Vermikülit katkılarında ise Flogopit mika fazının etkin şekilde kristallendiğini göstermiştir. Her iki fazda yapıya arzu edilen işlenebilirlik özelliklerini kazandırmıştır. Bütün numuneler işlenebilirlik testinden başarı ile

geçmiştir. Forsterit kristallenen üçüncü ana faz olup mika kristallerinin oluşumunda etkin rol oynadığı düşünülmektedir. Spinel, jadeit-diopsit ve ojit kristallenen diğer fazlardır. Sinterleme sonrası yapılan makro inceleme sonucunda; yapının tam anlamı ile sinterlenmediği, daha iyi sonuçlar için sıcaklıkların bir miktar daha artırılması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J. Partyka, "Effect of BaO ratio on the structure of glass-ceramic composite materials from the SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-CaO system," *Ceram.Int.*, vol. 41, pp. 9337-9343, 2015.
- [2] D. Li, J.W. Guo, X.S Wang, S.F. Zhang, L. He, "Effect of crystal size on the mechanical properties of a lithium disilicate glass-ceramic," *Mat. Sci.Eng. A*, vol. 669, pp. 332-339, 2016.
- [3] Ş. Yılmaz, V. Günay, "Cam - seramik malzemeler", *Met. Dergisi*, Cilt : 23,Sayı:121, 1999.
- [4] T.Çelik, "Uçucu Kül ve Tinkal Bor atığından Cam-seramik Malzeme Üretimi," Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malz. Müh. Böl, Mayıs 2010.
- [5] O. A. Al-Harbi, "Effect of different nucleation catalysts on the crystallization of Li<sub>2</sub>O-ZnO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses," *Ceram. Int.*, vol. 35, pp.1121-1128, 2009.
- [6] M. Garai, B. Karmakar," Rare earth ion controlled crystallization of mica glass-ceramics," *J.Alloy. Comp.*, vol. 678, pp. 360-369, 2016.
- [7] P. Alizadeh, B. E. Yekta, T. Javadi, "Sintering behavior and mechanical properties of the mica-diopside machinable glass-ceramics," *J. Euro. Ceram. Soc.*, vol. 28 pp.1569-1573, 2008.
- [8] S. A. Suvorov, V. V. Skurikhin, "Vermiculite - a Promising Material for High-Temperature Heat Insulators," *Ref. Ind. Ceram.*, Vol. 44-3, pp. 186-193, 2003.
- [9] X. Li, H. Wei, X. Lin, X. Xie," Preparation of stearic acid/modified expanded vermiculite composite phase change material with simultaneously enhanced thermal conductivity and latent heat," *Sol. Energy Mat. Solar Cell.*, vol. 155, pp.9-13, 2016.
- [10] U. Önen, E. Ercenk, Ş. Yılmaz, "The Effect Of Sintering Temperature On Machinability Properties Of Vermiculite Based Glass-Ceramics,"18. Metalurji ve Malzeme Kongresi, IMMC, 2016.
- [11] S. Sinhamahapatra, M. Shamim, H. S. Tripathi, A. Ghosh and K. Dana, "Kinetic modelling of solid state magnesium aluminate spinel formation and its validation," *Ceram. Int.*, Vol.42, pp. 9204-9213, 2016.
- [12] L. R. Pinga, A. M. Azad, T. W. Dung, "Magnesium aluminate (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) spinel produced via self-heat-sustained (SHS) technique," *Mat. Res. Bull.*, vol. 36, pp. 1417-1430, 2001.
- [13] E. El-Meliegy, R. van Noort, *Glasses and Glass Ceramics for Medical Applications*, Chapter 11, pp.193-208, 2012.
- [14] P.K. Maiti, A. Mallik, A. Basumajumdar, P. Kundu, "Influence of fluorine content on the crystallization and microstructure of barium fluorophlogopite glass-ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 36, pp. 115-120, 2010.
- [15] E. Ercenk, U.Sen, S. Yılmaz, "The effect of SiC addition on the crystallization kinetics of atmospheric plasma-sprayed basalt-based coatings," *Ceram. Int.*, vol. 38 pp.6549-6556, 2012.
- [16] B. A. Rad, P. Alizadeh, "Pressureless sintering and mechanical properties of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-K<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-F (CaO-Na<sub>2</sub>O) machinable glass-ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 35 pp.2775-2780, 2009.

## **Solving process planning and weighted scheduling with WNOPPT weighted due-date assignment problem using some pure and hybrid meta-heuristics**

Halil İbrahim Demir<sup>1\*</sup>, Caner Erden<sup>2</sup>

*12.10.2016 Geliş/Received, 30.11.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.297014

### **ABSTRACT**

If we search literature for integrated process planning and scheduling problem and for scheduling with due date assignment problem we can find hundreds of researches made on these problems. But integration of the three important manufacturing functions are not addressed much in the literature. In this study process planning, weighted scheduling and weighted due date assignment functions are integrated and solved using some pure and hybrid metaheuristics. We studied eight shop floors using random, evolutionary strategies, genetic algorithms and some hybrid searches. We tried to observe how search techniques improve solutions as iterations go on and how evolutionary strategies, genetic algorithms and hybrid search performs well compared to the random search. We also observed that hybrid searches are also powerful search techniques as genetic search and evolutionary strategies.

**Keywords:** process planning, weighted scheduling, weighted due date assignment, evolutionary strategies, genetic algorithm, hybrid metaheuristics, random search

## **Proses planlama ve ağırlıklı teslim tarihi atama ile birlikte ağırlıklı çizelgeleme probleminin bazı saf ve melez meta-sezgisel yöntemler ile çözümü**

### **ÖZ**

Entegre süreç planlama ve çizelgeleme probleminin ve entegre teslim tarihi atama ile birlikte çizelgeleme probleminin literatürüne baktığımızda, literatürde bu konularda yüzlerce araştırma bulabiliriz. Fakat, üç önemli üretim fonksiyonlarının entegrasyonu konusu literatürde ele alınmayan bir alandır. Bu çalışmada süreç planlama, ağırlıklı çizelgeleme ve ağırlıklı teslim tarihi atama fonksiyonları entegre edilmiş ve problem bazı saf ve melez meta-sezgisel yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmada biz 8 farklı atölyeyi rassal, evrimsel stratejiler, genetic algoritmalar ve bazı melez aramaları kullanarak çalıştık. Biz arama yöntemlerinin çözümü iterasyonlar devam ederken nasıl iyileştirdiğini ve evrimsel stratejiler, genetic algoritmalar ve melez aramaların rassal aramalara göre daha üstün sonuçlar verdiğini gözlemledik. Ayrıca melez aramaların genetic arama ve evrimsel stratejiler gibi güçlü arama teknikleri olduğunu gözlemledik.

**Anahtar Kelimeler:** süreç planlama, ağırlıklı planlama, ağırlıklı teslim tarihi atama, evrimsel stratejiler, genetik algoritma, melez meta-sezgiseller, rassal arama

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering – hidemir@sakarya.edu.tr

<sup>2</sup> Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering – cerden@sakarya.edu.tr



## 1. INTRODUCTION

When we look at the literature hundreds of works on IPPS (Integrated process planning and scheduling), many works on SWDDA (Scheduling with due date assignment) can be found easily. But when we look at the literature for IPPSDDA (Integrated process planning, scheduling and due date assignment) we can see only a few works on this problem.

Since only scheduling problem belongs to NP-Hard class problem and integrated problem is even more complex many researchers use some heuristics in the solution of the problem. In this study random search, genetic search and random-genetic hybrid search, evolutionary strategies, hybrid random-evolutionary strategies are used as solution techniques.

Since upstream functions affect downstream functions we should consider three functions concurrently. For instance outputs of process planning becomes inputs to the scheduling problem. Poorly prepared process plans become poor inputs to the scheduling function and may not be followed at the shop floor level. When these two functions are independent then they try to get local optima and do not care about global optima. Process planners may select same desired machines repeatedly and may not select some undesired machines and this cause unbalanced machine loading at the shop floor level. If due-dates are assigned independently then we may determine too close or too far due dates and this cause high penalty costs. If we assign due dates concurrently then we may set realistic due dates neither too close nor too far due dates and we may reduce earliness, tardiness and due date related costs. If scheduling is performed independently from assigned due-dates then we may schedule some jobs unnecessarily too early and we pay high earliness costs and if we schedule some jobs unreasonably too far then we pay for high tardiness costs.

In this study we used genetic search and evolutionary strategies as directed searches, random search as undirected search and random-genetic and random-evolutionary strategies as hybrid undirected-directed searches while solving the problem. Random search is a good way to scan solution space faster at the beginning but it becomes inferior search technique as iteration goes on. It is because random search does not get benefit of previously found good solutions and that's why it is an undirected search. Genetic search and evolutionary strategies get use of earlier good solutions and that's why they are directed searches but at the initial few iterations random search scans solution space better compared to the genetic search and evolutionary strategies. At this

research we used both the powers of random and genetic searches and evolutionary strategies and we applied hybrid searches. At hybrid searches %10 of the iterations are random and later we converted to the genetic search or evolutionary strategies and remaining %90 percent iterations are genetic iterations or evolutionary strategy iterations.

Recent developments in hardware, software and algorithms provided to solve some problems easier compared to the past and even some unsolvable problems became possible to solve. It is easier to prepare alternative process plans using CAPP (Computer aided process planning) and it becomes easier and beneficial to integrate process planning, weighted scheduling and weighted due-date assignment.

Traditionally only tardiness is punished but according to JIT (Just in time) philosophy jobs are not wanted to be finished earlier or later than its due-date. In this research we penalized all of the due-dates, earliness and tardiness according to the importance of the customer. Contrary to literature here we applied weighted due-date assignment and important customers are given closer due dates and later these customers are scheduled earlier by using weighted scheduling. By doing this we reduced penalty of due dates, penalty of tardiness and earliness for more important customers and we substantially saved from total penalty function.

Here we used five alternative routes for relatively smaller shops and three alternative routes for relatively bigger shops. We applied weighted scheduling and 21 dispatching rules are used. Finally we used WNOPPT (Weighted number of operations plus processing time) weighted due date assignment method while determining due dates.

## 2. BACKGROUND AND LITERATURE SURVEY

Although there are only a few study on IPPSDDA problem there are numerous work on IPPS problem and many works on SWDDA problem. As IPPS and SWDDA problems are popular research topics IPPSDDA problem is also promising research area and many more researches can be done.

It is better to see some surveys on IPPS before going into detail. we can see [1], [2] and [3] as a good literature surveys on IPPS problem.

Although alternative process plans are important in IPPS and IPPSDDA problems, it is better to determine number of process plans wisely. Since marginal benefits of



alternative process plans are diminishing, there is a turning point in the number of efficient number of alternative process plans. In this context impacts of alternative process plans on manufacturing performance is studied by Usher [4] and availability and their effects on manufacturing system performance of alternative process plans are studied by Corti and Portioli-Staudacher [5].

As we sad developments in hardware, software and algorithms make it possible to solve some problems easier and development in CAPP made IPPS and IPPSDDA problems easier compared to the past. Usher and Fernandes [6], Aldakhilallah and Ramesh [7], and Kumar and Rajoita [8] studied integration of CAPP and scheduling.

Because only scheduling belongs to NP-Hard class problem, researchers used some metaheuristics to solve the problem. Genetic or evolutionary algorithms are widely used in solving IPPS. Morad and Zalzal [9], Zhao and Wu [10], Moon et al. [11], Kim et al. [12], Drstvensek and Balic, Moon et al. [13], Shao et al. [14], Li et al. [15], Li et al [16], Seker et al. [17], and Zhang and Wong [18] are some examples on this area.

For couple of decades many researchers are working on IPPS and if we list some earlier works on IPPS ; Wilhelm and Shin [19], Sundaram and Fu [20], Nasr and Elsayed [21], Khoshnevis and Chen [22], Hutchinson et al. [23], Chen and Khoshnevis [24], Zhang and Mallur [25], Kempenars et al. [26], Usher and Fernandes [6], Kim and Egbelu [27], Weintraub et al. [28], Morad and Zalzal [9], and Gindy et al. [29] are earlier examples on IPPS.

If we give some examples to more recent works on IPPS; Tan and Khoshnevis [1], Lee and Kim [30], Saygin et al. [31], Zhao and Wu [10], Moon et al. [11], Kim et al. [12], Kumar and Rajotia [32], Usher [4], Zhang et al. [33], Drstvensek and Balic [34], Corti and Portioli-Staudacher [5], Moon et al. [13], Shao et al. [14], Ozguven et al. [35], Phanden et al. [36], Yin et al. [37], Yin et al. [37], Seker et al. [17], Wang et al. [38], Zhang and Wong [18] are some recent examples on this area.

It is seen that solving integrated problems are harder according to the literature. There is a solution only for small problems. Some meta-heuristic algorithms like genetic, evolutionary or agent based, have been utilized to solve the IPPS problem. Researchers divided the problem into two subproblems which are loading and scheduling subproblems [39].

SWDDA is also very popular research topic. Hundreds of works done on SWDDA problem. Due-dates can be determines as internally or externally. If we can set due-dates internally then firms may select most proper due-dates for them. If we integrate scheduling with due-date assignment then we may set more proper due dates and integrated scheduling also increases the performance and we may reach reduced penalty function. For SWDDA problem it is better to see Gordon et al. [40] as a state-of-the-art review. Traditionally only tardiness is punished but according to JIT both earliness and tardiness should be punished and in this study all of earliness, tardiness and due-dates are penalized according to weight of the customers. In this study as a weighted due-date assignment method WNOPPT is used.

Many works in literature are on scheduling with common due date assignment. Unlike these works in this study separate due dates are assigned for every jobs. If we give some list on scheduling with common due date we can give following list; Biskup and Jahnke [41], Cheng et al. [42], Gordon et al. [43], Lauff and Werner [44], Min and Cheng [45], Gordon and Strusevich [46], Allaoua and Osmane [47], Tuong and Soukhal [48], Yin et al. [37].

If we give some list on scheduling and separate due date assignment; Gordon and Kubiak [49], Cheng and Kovalyov [50], Gupta et al. [51], Baykasoğlu et al. [52], Xia et al. [53], Gordon and Strusevich [46], Vinod and Sridharan [54].

If we look at literature there are many works on single machine scheduling with due date determination. These works can be listed as follows; Kovalyov [55], Gordon and Strusevich [46], Cheng et al. [56], Qi et al. [57], Gordon et al. [43], Li et al. [58], Xia et al. [53], Allaoua and Osmane [47], Tuong and Soukhal [48].

Some works are on two machine flow shop scheduling with due date determination such as Birman and Mosheiov [59].

Some works are on parallel machine scheduling with due date determination as follows; Adamopoulos and Pappis [60], Cheng and Kovalyov [50], Mosheiov [59], Gordon et al. [43], Min and Cheng [45], Mosheiov and Yovel [61], Tuong and Soukhal [48].

Some works are on multi machine scheduling with due date determination as follows Luss and Rosenwein [62], Lawrance [63], Gupta et al. [51], Lauff and Werner [44]. Some works are on job shop scheduling with due date

determination such as; Yang, He et. al. [64], Baykasoğlu et al. [52], Vinod and Sridharan [54].

As we mentioned earlier there are only a few works on IPPSDDA problem. Demir and Taskin [65] studied IPPSDDA problem in a Ph.D. thesis. Later benefits of integrating due date assignment with IPPS is studied by Ceven and Demir [66] in a Master of Science thesis. Later Demir et al. [39] studied Process planning and scheduling with SLK due-date assignment . After that Demir et al. [67] worked on Integrating Process Planning, WMS Dispatching, and WPPW Weighted Due Date Assignment where process planning and weighted scheduling and weighted due date assignments are integrated. Unlike literature in this study important

customers are given closer due-dates and scheduled earlier. At the same time Demir et al. [68] investigated Process Planning and Weighted Scheduling with WNOPPT Weighted Due-Date Assignment problem. Finally Demir et al. [69] studied Process Planning and Scheduling with PPW Due-Date Assignment Using Hybrid Search.

### 3. PROBLEM DEFINITION

In this research IPPSDDA problem is investigated and process planning function is integrated with weighted scheduling and WNOPPT weighted due date assignment. Eight shop floors are tested in this study. Configurations of these shop floors are summarized at Table 1.

Table 1. Shop Floors

Shop floor	#of jobs	#of machines	#of routes	# of op. per job	Processing times
Shop floor 1	25	5	5	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 2	50	10	5	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 3	75	15	5	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 4	100	20	5	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 5	125	25	3	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 6	150	30	3	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 7	175	35	3	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$
Shop floor 8	200	40	3	10	$\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$

If we explain shop floor 1; there are 25 jobs, 5 machines, 5 alternative routes for every job and there are 10 operations in every route of each job. Processing times of every operation changes according to the formula  $\lfloor (12 + z * 6) \rfloor$  and practically operation times changes in between 1 and 30 and assume nearest smallest integer to the value we obtained according to the above formula.

### 4. RULES AND FORMULAE

In this study, contrary to literature all of weighted earliness, tardiness and due date related costs are penalized. We assumed here one shift and it makes  $8*60=480$  minutes per day. Penalty function terms for weighted earliness, tardiness and due dates are summarized below.

$$PD(j) = \text{weight}(j) * 8 * \left(\frac{D}{480}\right) \quad (1)$$

$$PE(j) = \text{weight}(j) * \left(5 + 4 * \left(\frac{E}{480}\right)\right) \quad (2)$$

$$PT(j) = \text{weight}(j) * \left(10 + 12 * \left(\frac{T}{480}\right)\right) \quad (3)$$

$$\text{Penalty}(j) = PD(j) + PE(j) + PT(j) \quad (4)$$

$$\text{Total Penalty} = \sum_j \text{Penalty}(j) \quad (5)$$

where

weight(j) is the importance of customer j

PD(j) is the penalty for due-date of job j

PE(j) is the penalty for earliness of job j

PT(j) is the penalty for tardiness of job j

Penalty (j) is the total penalty of job j that contains due date, earliness and tardiness related costs

Total Penalty is the total penalty occurred for all of the jobs

#### 4.1. Due-Date Assignment Rules

At the due date assignment gene 10 rules are used with different multipliers. Nine rules are some derivatives of WNOPPT rule. Tenth rule represent random (external) due date assignment rule. Due date assignment rules are given at Table 2.

Table 2. Due-Date Assignment Rules

METHOD	MULTIPLIER1	MULTIPLIER2	RULE NO
WNOPPT	k x =1,2,3	k y =1,2,3	1,2,3,4,5,6,7,8,9
RDM			10

Where

- WNOPPT (Weighted Number of operations plus Processing Times) →  
 $Due = w1 \times k1 \times TPT + w2 \times k2 \times NOP$   
 (w1, w2 changes according to the weights)
- RDM (Random due assign.) →  
 $Due = N \sim (3 \times P_{avg}, (P_{avg})^2)$
- TPT = Total processing time
- $P_{avg}$  = Mean processing time of all job waiting

#### 4.2. Dispatching Rules

As a scheduling gene 21 dispatching rules (with weighted and unweighted versions of the rules) are used. Scheduling rules are summarized at Table 3.

Table 3. Dispatching Rules

Method	Multiplier	Rules
WATC	$k_x = 1, 2, 3$	1, 2, 3
ATC	$k_x = 1, 2, 3$	4,5,6
WMS, MS		7,8
WSPT, SPT		9,10
WLPT,LPT		11,12
WSOT,SOT		13,14
WLOT,LOT		15,16
WEDD,EDD		17,18
WERD,ERD		19,20
SIRO		21

Where

WATC/ATC ((Weighted) Apparent Tardiness Cost): This is composite dispatching rule, and it is a hybrid of MS and SPT.

WMS/MS: (Weighted) Minimum Slack First

WSPT/SPT: (Weighted) Shortest Processing Time First

WLPT/LPT: (Weighted) Longest Processing Time First

WSOT/SOT: (Weighted) Shortest Operation Time First

WLOT/LOT: (Weighted) Longest Operation Time First

WEDD/EDD: (Weighted) Earliest Due-Date First

WERD/ERD: (Weighted) Earliest Release Date First

SIRO (Service in Random order): A job among waiting jobs is selected randomly to be processed.

#### 5. TECHNIQUES USED

In this research three search techniques and ordinary solutions are compared. As a directed search genetic search and evolutionary strategies are used, as an undirected search random search is used and finally as a hybrid undirected-directed search techniques hybrid random-genetic and random-evolutionary strategies are used. Every techniques are explained below;

**Ordinary Solution(OS):** At the genetic search three populations are used. Main population with size 10, crossover population with size 8 and mutation population with size 5. To be fair at random search we used same sizes of populations. To be fair again at hybrid search we used same sizes of iterations as in genetic and random search. As an ordinary solutions we first randomly produced three populations with size 10,8 and 5 respectively and we selected best 10 chromosomes out of 23 chromosomes as the starting main population. Results of starting main populations are used as ordinary solutions where we have not applied given number of iterations yet.

**Random Search(RS):** This is undirected search and at this search only random iterations are applied. At every iteration two populations are produced randomly instead of genetically as big as crossover and mutation populations. Out of three populations best ten chromosomes are selected as the next step main population and one iteration is completed like this.

**Evolutionary Strategies (ES):** In the early 1960s unlike genetic algorithms, evolutionary strategies are developed. Two students from Technical University of Berlin from Germany developed evolutionary strategies while solving their optimization problem [70], [71]. At the genetic algorithms we use crossover and mutation operators but here we only utilize mutation operator. At the genetic search, hybrid search and random search we produce 13 new offspring and apply some predetermined number of iterations. Here at the evolutionary strategies in order to be fair in comparison we apply same number of iterations for every shop floor and we produce 13 new offspring by using only mutation operator.

**Hybrid Evolutionary Strategies (R-ES):** This is a mix of undirected and directed search and get benefits of power of both random and evolutionary strategies. Random search initially scans solutions space better compared to the evolutionary strategies. Between 0 and 1000 if we produce a random number then expected value of this number is 500 and marginal improvement is 500. If we produce two random numbers and expected value of maximum of these two numbers is 667 and marginal benefits drop to 167. If we produce three random numbers and expected value of maximum of these three numbers is 750 and marginal benefit reduced to 83. As it can be seen random iterations are very useful at the initial iterations to scan solution space faster but as iteration goes on marginal benefit reduces sharply. Later directed search becomes more powerful compared to random search because evolutionary strategies get benefits of

best solutions found so far but random search does not get benefits of earlier iterations and every time it starts from the scratch and as iteration goes on it improves with less probability. By using hybrid search initially we scan solution space faster and we start with better solutions and turn into evolutionary strategies and we get benefits of directed search.

**Genetic Algorithm (GA):** This search is directed search and at every iteration we look for better solutions around the best solutions found so far. At every iterations we select four pairs of chromosome from the main population and we produce crossover population with size 8. Later we select 5 chromosomes to be mutated and we produce mutation population with size 5. For crossover and mutation we select best chromosomes of the main population with high probability and we select worst chromosomes of the population with low probability proportional to the performance measure of the chromosomes.

**Hybrid Genetic Algorithm(R-GA):** Here search is started with random search to scan solution space better at the beginning and later genetic search is applied. At every search technique we produce 13 new offsprings and it was fair to compare these pure and hybrid searches. One important thing in hybrid search is the percentage of random search. If random search is very high then hybrid search becomes very poor since as iteration goes on marginal benefit of random search reduces sharply. If random search percentage is too low then we start to genetic search before we scanned solution space better. Here 10% random iterations are applied later genetic search is used.

Iteration parameters of each shop floor for pure and hybrid search metaheuristics are presented at Table 2.

At the search techniques we represented solutions as chromosomes and at every chromosome we have  $(n+2)$  genes. First gene is used for due date assignment and second gene is used for dispatching rules and remaining  $n$  genes are used to represent currently selected route of each job. A sample chromosome is illustrated at the Figure 1 below.

## 6. SOLUTIONS COMPARED

**SIRO-RDM(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS):** In this study this is the lowest level of integration. Jobs are scheduled in random order and due dates are assigned randomly.

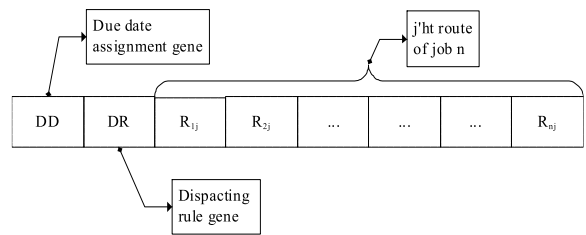


Figure 1. Sample chromosome

**WSCH-RDM(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS):** At this level of integration weighted dispatching is integrated with process planning. Due dates are still determined randomly.

**SIRO-WNOPPT(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS):** Here WNOPPT weighted due date assignment is integrated with process plan selection. But jobs are scheduled in random order.

**WSCH-WNOPPT (OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS):** This is the highest level of integration and weighted scheduling and WNOPPT weighted due date assignment are integrated with process plan selection. Ordinary solutions, genetic search, random search, hybrid searches and evolutionary strategies are compared. Number of random and genetic iterations are summarized at Table 4 below.

Table4. Iteration Numbers For Pure and Hybrid Searches

Shop Floor	ES		R-ES Hybrid		RS		GA		R-GA Hybrid		
	ES Iter#	Random Iter#	ES Iter#	Random Iter#	ES Iter#	Random Iter#	GA Iter#	Random Iter#	GA Iter #	Random Iter#	
1	200	20	180	200	200	200	200	200	200	20	180
2	150	15	135	150	150	150	150	150	150	15	135
3	100	10	90	100	100	100	100	100	100	10	90
4	50	5	45	50	50	50	50	50	50	5	45

In this study twenty four solutions are compared and four of them are ordinary solutions at every level of integration. Four of them are genetic search solutions at every level of integration, four of them are random-genetic search solutions, four of them are evolutionary strategies, four of them are random-evolutionary strategies and finally four of them are random search solutions.

## 7. EXPERIMENTS AND RESULTS

We used Borland C++ 5.02 as a compiler and we coded the program using C++ programming language. The

program is run on a desktop with a processor i5-4590 with 3,3 GHz and 8 GB Ram.

Eight shop floors are tested with twenty four combinations possible. Initially SIRO-RDM(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS) combinations at the lowest level of integration are tested. Later weighted scheduling is integrated with process plan selection and WSCH-RDM(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS) combinations are tested. After this step WNOPPT weighted due date assignment is integrated with process plan selection but this time jobs are scheduled in random order and SIRO-WNOPPT(OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS) combinations are solved. Finally full integration level where process plan selection is integrated with weighted scheduling and WNOPPT weighted due date assignment is tested. At this level WSCH-WNOPPT (OS, GA, R-GA, ES, R-ES, RS) combinations are tried.

Experimental results of eight shop floors are summarized at Table 5 and Figures 2,3,4,5,6,7,8,9. For instance for the smallest shop floor we have 25 jobs and 5 machines and each job has 5 alternative routes. There are 10 operations at every route and processing time of each operation changes according to formula $[(12 + z * 6)]$ . At each integration level 6 combinations are compared and there are 4 integration levels and we compared 24 combinations. For every shop floors we compared these 24 combinations and as expected full integration level (WSCH-WNOPPT) is found always best integration level and unintegrated level (SIRO-RDM) was found the poorest level of integration. Intermediate integration levels are also found useful. For instance integrating weighted scheduling with process plan selection (WSCH-RDM) also improved the global performance substantially but not as much as in full integration level. Although integrating weighted due date assignment with process plan selection (SIRO-WNOPPT) improved the global performance SIRO scheduling deteriorates the performance measures back severely. If we look at the results GA, R-GA, R-ES performed well and at the most of the shop floors GA algorithm outperformed other techniques. RS was the poorest method found. For the Shop floor 1,4,5,6,7 GA is the best search method, for the shop floors 2 and 3 R-ES is found as the best search method and for the shop floor 8 R-GA search method is found best. Hybrid solutions are also powerful solutions depending on the random search percentage. Here we used 10% random iterations. Random search is very useful at the beginning and benefit of random search diminishes sharply so it is better to use 5% or 10% random iterations but after that random iterations become very poor to use. Since GA or ES are directed search later

it is better to convert to directed search techniques after some initial random iterations.

## 8. CONCLUSION

At this study integrated process planning and weighted scheduling with weighted due date assignment problem is studied. Problem is integrated step by step and improvement in global performance is observed.

At the beginning unintegrated version SIRO-RDM combinations are tested. Here due dates are assigned randomly and jobs are scheduled in random order and as expected this level of integration is found the poorest level. Later weighted scheduling function is integrated with process plan selection but due dates are still determined randomly. At this level WSCH-RDM combinations are tested. This level of integration was found very useful but this was not the ultimate level of integration. After that integration of weighted due date assignment with process plan selection is tested. At this level jobs are scheduled in random order. This level of integration is also found very useful and there were substantial improvements but scheduling in random order deteriorated performance back severely.

Finally fully integrated level is tested and process plan selection is integrated with weighted scheduling and weighted due date assignment and WSCH-WNOPPT combinations are tested and these combinations are found as the best combinations. This was the ultimate goal of this study and found as the best level as expected.

In this study six solutions are compared with each other. Poorest solution are the ordinary solutions which are randomly produced solutions. Among search techniques random search is found the worst search technique since it is an undirected search technique and does not get benefit of earlier solutions at every iterations. Although later iterations are very poor in random search, earlier iterations provide high marginal benefits and that's why it is better to start with random search and scan solution space better and continue with other directed search techniques.

According to the results GA is found the best algorithm compared to the other search techniques but hybrid search techniques such as R-ES and R-GA found promising search techniques. At the hybrid search techniques it is better to start with random search but percentage of random search should not be very high since marginal benefit of random search diminishes sharply.

Table5. Comparison of twenty four combinations for four shop floors

Level of Integration	Shop Floor1			Shop Floor2			Shop Floor3			Shop Floor4			Shop Floor5			Shop Floor6			Shop Floor7			Shop Floor8		
	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst	Best	Average	Worst
1-1-SIRO-RDM-OS	292	292	292	611	611	611	907	907	907	1337	1337	1337	1413	1413	1413	1724	1724	1724	2020	2020	2020	2490	2490	2490
1-1-SIRO-RDM-ES	269	272	275	552	564	568	824	836	841	1201	1208	1213	862	865	866	1065	1069	1073	1843	1862	1870	2309	2344	2351
1-1-SIRO-RDM-R-ES	248	252	255	523	533	539	827	835	839	1201	1224	1231	1031	1035	1038	1694	1715	1737	1869	1881	1889	2307	2325	2331
1-1-SIRO-RDM-GA	249	256	259	535	540	543	803	816	820	1201	1219	1224	1291	1301	1306	1579	1584	1587	1846	1857	1864	2273	2288	2295
1-1-SIRO-RDM-R-GA	265	269	272	545	549	553	814	818	822	1178	1183	1188	1306	1312	1316	1603	1611	1619	1857	1869	1878	2277	2293	2303
1-1-SIRO-RDM-RS	268	273	275	558	565	571	853	864	870	1254	1261	1266	1355	1372	1378	1610	1645	1657	1908	1925	1934	2346	2367	2378
1-2-WSCH-RDM-OS	266	266	266	560	560	560	802	802	802	1214	1214	1214	1346	1346	1346	1621	1621	1621	1886	1886	1886	2280	2280	2280
1-2-WSCH-RDM-ES	214	216	217	416	420	422	657	661	664	1009	1018	1024	1026	1031	1034	1263	1271	1275	1536	1544	1548	1808	1828	1833
1-2-WSCH-RDM-R-ES	206	208	209	430	438	440	652	657	660	965	971	976	1031	1035	1038	1330	1513	1652	1481	1488	1492	1835	1847	1851
1-2-WSCH-RDM-GA	218	219	219	441	446	450	676	678	679	989	998	1004	1093	1095	1097	1286	1287	1287	1523	1526	1529	1828	1831	1834
1-2-WSCH-RDM-R-GA	215	216	216	423	424	425	657	658	659	957	959	961	1037	1038	1039	1267	1269	1270	1464	1467	1469	1824	1825	1826
1-2-WSCH-RDM-RS	213	218	220	458	462	464	676	684	689	997	1014	1030	1086	1097	1108	1319	1338	1357	1531	1559	1583	1906	1943	1968
1-3-SIRO-WNOPPT-OS	287	287	287	609	609	609	838	838	838	1243	1243	1243	1315	1315	1315	1627	1627	1627	1938	1938	1938	2283	2283	2283
1-3-SIRO-WNOPPT-ES	245	253	257	513	524	531	815	821	824	1138	1179	1190	1256	1268	1277	1530	1540	1549	1795	1807	1818	2145	2163	2176
1-3-SIRO-WNOPPT-R-ES	239	251	256	527	530	533	815	821	826	1170	1185	1195	1254	1286	1292	1579	1639	1713	1759	1781	1791	2162	2176	2187
1-3-SIRO-WNOPPT-GA	231	238	241	487	495	501	749	757	760	1123	1136	1141	1229	1242	1249	1507	1512	1516	1753	1764	1773	2141	2152	2161
1-3-SIRO-WNOPPT-R-GA	240	242	244	491	497	499	759	764	765	1115	1128	1134	1229	1238	1242	1503	1522	1529	1719	1730	1742	2087	2116	2134
1-3-SIRO-WNOPPT-RS	252	259	264	511	522	528	807	815	821	1177	1187	1195	1274	1287	1292	1528	1553	1562	1779	1801	1815	2173	2210	2223
1-4-WSCH-WNOPPT-OS	208	208	208	488	488	488	654	654	654	962	962	962	993	993	993	1265	1265	1265	1463	1463	1463	1774	1774	1774
1-4-WSCH-WNOPPT-ES	178	181	182	360	364	367	570	571	572	846	854	859	888	893	897	1093	1104	1111	1308	1318	1321	1602	1611	1617
1-4-WSCH-WNOPPT-R-ES	178	179	181	357	361	364	567	571	573	852	857	862	888	895	898	1176	1288	1570	1291	1300	1304	1633	1650	1657
1-4-WSCH-WNOPPT-GA	175	176	177	402	405	406	599	605	609	845	851	853	862	865	866	1065	1069	1073	1282	1287	1290	1623	1629	1632
1-4-WSCH-WNOPPT-R-GA	176	177	179	398	399	400	585	587	588	847	854	857	873	877	880	1065	1074	1077	1286	1291	1293	1565	1571	1575
1-4-WSCH-WNOPPT-RS	189	192	193	414	420	423	624	632	636	892	901	910	916	930	942	1119	1134	1142	1301	1332	1353	1626	1666	1689



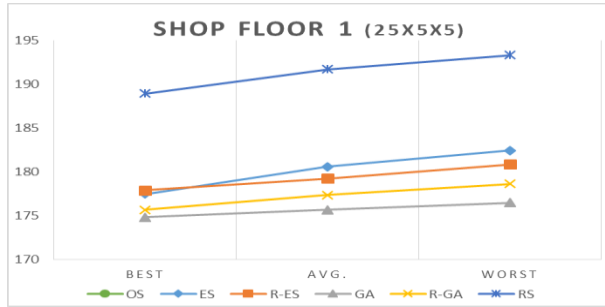


Figure 2. Shop Floor 1 (Highest level of integration)

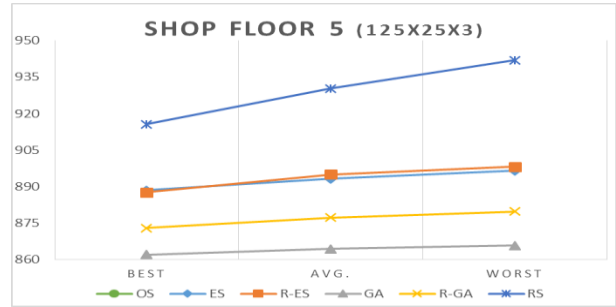


Figure 6. Shop Floor 5 (125x25x3)

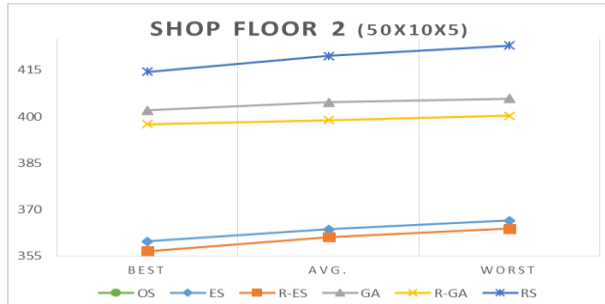


Figure 3. Shop Floor 2 (50x10x5)

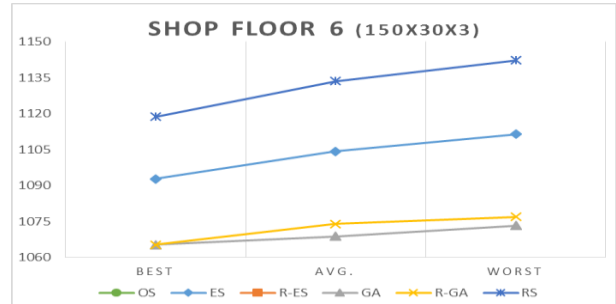


Figure 7. Shop Floor 6 (150x30x3)

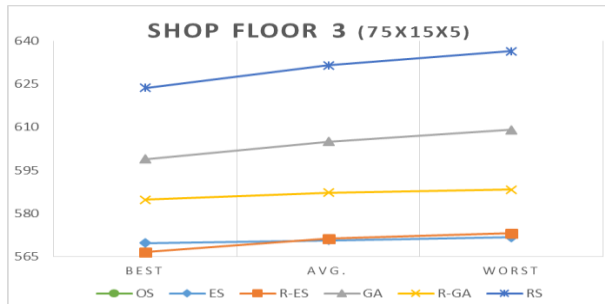


Figure 4. Shop Floor 3 (75x15x5)

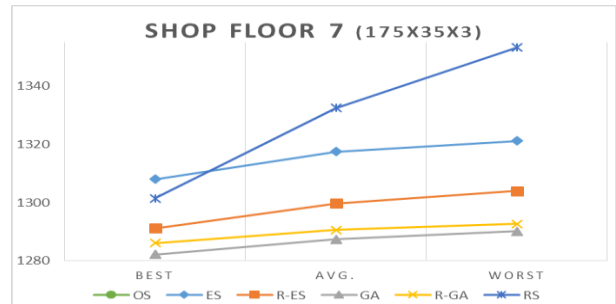


Figure 8. Shop Floor 7 (175x35x3)

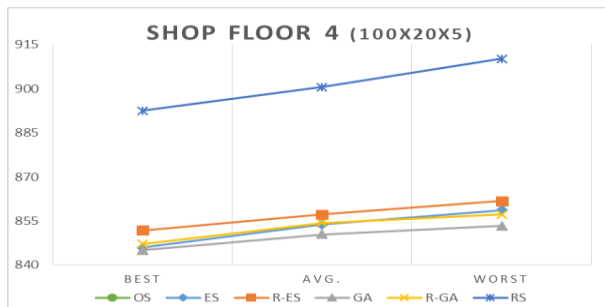


Figure 5. Shop Floor 4 (100x20x5)

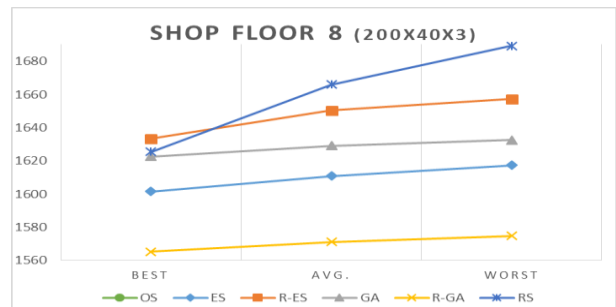


Figure 9. Shop Floor 8 (200x40x3)

## REFERENCES

- [1] W. Tan and B. Khoshnevis, "Integration of process planning and scheduling—a review," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, no. 1, pp. 51–63, Feb. 2000.
- [2] X. Li, L. Gao, C. Zhang, and X. Shao, "A review on Integrated Process Planning and Scheduling," *International Journal of Manufacturing Research*, vol. 5, no. 2, pp. 161–180, Jan. 2010.
- [3] R. K. Phanden, A. Jain, and R. Verma, "Integration of process planning and scheduling: a state-of-the-art review," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 6, pp. 517–534, Jun. 2011.
- [4] J. M. Usher, "Evaluating the impact of alternative plans on manufacturing performance," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 45, no. 4, pp. 585–596, Dec. 2003.
- [5] D. Corti and A. Portioli-Staudacher, "A concurrent engineering approach to selective implementation of alternative processes," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 20, no. 4, pp. 265–280, Aug. 2004.
- [6] J. M. Usher and K. J. Fernandes, "Dynamic process planning—the static phase," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 53–58, 1996.
- [7] K. A. Aldakhilallah and R. Ramesh, "Computer-integrated process planning and scheduling (CIPPS): intelligent support for product design, process planning and control," *International journal of production research*, vol. 37, no. 3, pp. 481–500, 1999.
- [8] M. Kumar and S. Rajotia, "Integration of scheduling with computer aided process planning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1–3, pp. 297–300, Jul. 2003.
- [9] N. Morad and A. M. S. Zalzal, "Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 10, no. 2, pp. 169–179, 1999.
- [10] C. Zhao and Z. Wu, "A Genetic Algorithm Approach to the Scheduling of FMSs with Multiple Routes," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 71–88, Feb. 2001.
- [11] C. Moon, J. Kim, and S. Hur, "Integrated process planning and scheduling with minimizing total tardiness in multi-plants supply chain," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 331–349, 2002.
- [12] Y. K. Kim, K. Park, and J. Ko, "A symbiotic evolutionary algorithm for the integration of process planning and job shop scheduling," *Computers & Operations Research*, vol. 30, no. 8, pp. 1151–1171, 2003.
- [13] C. Moon, Y. H. Lee, C. S. Jeong, and Y. Yun, "Integrated process planning and scheduling in a supply chain," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 54, no. 4, pp. 1048–1061, May 2008.
- [14] X. Shao, X. Li, L. Gao, and C. Zhang, "Integration of process planning and scheduling—a modified genetic algorithm-based approach," *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 6, pp. 2082–2096, 2009.
- [15] X. Li, C. Zhang, L. Gao, W. Li, and X. Shao, "An agent-based approach for integrated process planning and scheduling," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 1256–1264, Mar. 2010.
- [16] X. Li, L. Gao, and X. Shao, "An active learning genetic algorithm for integrated process planning and scheduling," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 8, pp. 6683–6691, Jun. 2012.
- [17] A. Seker, S. Erol, and R. Botsali, "A neuro-fuzzy model for a new hybrid integrated Process Planning and Scheduling system," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 13, pp. 5341–5351, Oct. 2013.
- [18] L. Zhang and T. N. Wong, "An object-coding genetic algorithm for integrated process planning and scheduling," *European Journal of Operational Research*, vol. 244, no. 2, pp. 434–444, 2015.
- [19] W. E. Wilhelm and H.-M. Shin, "Effectiveness of alternate operations in a flexible manufacturing system," *International Journal of Production Research*, vol. 23, no. 1, pp. 65–79, Jan. 1985.
- [20] R. M. Sundaram and S. Fu, "Process planning and scheduling—a method of integration for productivity improvement," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 296–301, 1988.
- [21] N. Nasr and E. A. Elsayed, "Job shop scheduling with alternative machines," *International Journal of Production Research*, vol. 28, no. 9, pp. 1595–1609, Sep. 1990.

- [22] B. Khoshnevis and Q. M. Chen, "Integration of process planning and scheduling functions," *J Intell Manuf*, vol. 2, no. 3, pp. 165–175, Jun. 1991.
- [23] J. Hutchison, K. Leong, D. Synder, and P. Ward, "Scheduling approaches for random job shop flexible manufacturing systems," *International Journal of Production Research*, vol. 29, no. 5, pp. 1053–1067, May 1991.
- [24] Q. Chen and B. Khoshnevis, "Scheduling with flexible process plans," *Production Planning & Control*, vol. 4, no. 4, pp. 333–343, Jan. 1993.
- [25] H.-C. ZHANG and S. MALLUR, "An integrated model of process planning and production scheduling," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 7, no. 6, pp. 356–364, Nov. 1994.
- [26] J. Kempenaers, J. Pinte, J. Detand, and J.-P. Kruth, "A collaborative process planning and scheduling system," *Advances in Engineering Software*, vol. 25, no. 1, pp. 3–8, 1996.
- [27] K.-H. Kim and P. J. Egbelu, "Scheduling in a production environment with multiple process plans per job," *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 12, pp. 2725–2753, Aug. 1999.
- [28] A. Weintraub, D. Cormier, T. Hodgson, R. King, J. Willson, and A. Zozom, "Scheduling with alternatives: a link between process planning and scheduling," *IIE Transactions*, vol. 31, no. 11, pp. 1093–1102, Nov. 1999.
- [29] N. N. Gindy, S. M. Saad, and Y. Yue, "Manufacturing responsiveness through integrated process planning and scheduling," *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 11, pp. 2399–2418, 1999.
- [30] H. Lee and S.-S. Kim, "Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 586–590, 2001.
- [31] C. Saygin, F. F. Chen, and J. Singh, "Real-time manipulation of alternative routings in flexible manufacturing systems: a simulation study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 755–763, 2001.
- [32] M. Kumar and S. Rajotia, "Integration of process planning and scheduling in a job shop environment," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, no. 1–2, pp. 109–116, 2006.
- [33] J. Zhang, L. Gao, F. T. S. Chan, and P. Li, "A holonic architecture of the concurrent integrated process planning system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, no. 1–3, pp. 267–272, Aug. 2003.
- [34] I. Drstvenšek and J. Balič, "Responding ability in dynamic production circumstances," *Journal of materials processing technology*, vol. 133, no. 1, pp. 71–78, 2003.
- [35] C. Özgüven, L. Özbakır, and Y. Yavuz, "Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 6, pp. 1539–1548, Jun. 2010.
- [36] R. K. Phanden, A. Jain, and R. Verma, "Integration of process planning and scheduling: a state-of-the-art review," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 6, pp. 517–534, 2011.
- [37] Y. Yin, S.-R. Cheng, T. C. E. Cheng, C.-C. Wu, and W.-H. Wu, "Two-agent single-machine scheduling with assignable due dates," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 219, no. 4, pp. 1674–1685, Nov. 2012.
- [38] J. Wang, X. Fan, C. Zhang, and S. Wan, "A Graph-based Ant Colony Optimization Approach for Integrated Process Planning and Scheduling," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 748–753, Jul. 2014.
- [39] H. I. Demir, O. Uygun, I. Cil, M. Ipek, and M. Sari, "Process Planning and Scheduling with SLK Due-Date Assignment where Earliness, Tardiness and Due-Dates are Punished," *JIII*, vol. 3, no. 3, pp. 173–180, Sep. 2015.
- [40] V. Gordon, J.-M. Proth, and C. Chu, "A survey of the state-of-the-art of common due date assignment and scheduling research," *European Journal of Operational Research*, vol. 139, no. 1, pp. 1–25, May 2002.
- [41] D. Biskup and H. Jahnke, "Common due date assignment for scheduling on a single machine with jointly reducible processing times," *International Journal of Production Economics*, vol. 69, no. 3, pp. 317–322, Feb. 2001.
- [42] T. C. E. Cheng, S.-J. Yang, and D.-L. Yang, "Common due-window assignment and scheduling of linear time-dependent deteriorating jobs and a deteriorating maintenance activity," *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 1, pp. 154–161, Jan. 2012.

- [43] V. Gordon, J.-M. Proth, and C. Chu, "A survey of the state-of-the-art of common due date assignment and scheduling research," *European Journal of Operational Research*, vol. 139, no. 1, pp. 1–25, 2002.
- [44] V. Lauff and F. Werner, "Scheduling with common due date, earliness and tardiness penalties for multimachine problems: A survey," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 40, no. 5–6, pp. 637–655, Sep. 2004.
- [45] L. Min and W. Cheng, "Genetic algorithms for the optimal common due date assignment and the optimal scheduling policy in parallel machine earliness/tardiness scheduling problems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, no. 4, pp. 279–287, Aug. 2006.
- [46] V. S. Gordon and V. A. Strusevich, "Single machine scheduling and due date assignment with positionally dependent processing times," *European Journal of Operational Research*, vol. 198, no. 1, pp. 57–62, 2009.
- [47] H. Allaoua and I. Osmane, "Variable Parameters Lengths Genetic Algorithm for Minimizing Earliness-Tardiness Penalties of Single Machine Scheduling With a Common Due Date," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 36, pp. 471–478, Aug. 2010.
- [48] N. H. Tuong and A. Soukhal, "Due dates assignment and JIT scheduling with equal-size jobs," *European Journal of Operational Research*, vol. 205, no. 2, pp. 280–289, Sep. 2010.
- [49] V. Gordon and W. Kubiak, "Single machine scheduling with release and due date assignment to minimize the weighted number of late jobs," *Information Processing Letters*, vol. 68, no. 3, pp. 153–159, Nov. 1998.
- [50] T. C. E. Cheng and M. Y. Kovalyov, "Complexity of parallel machine scheduling with processing-plus-wait due dates to minimize maximum absolute lateness," *European Journal of Operational Research*, vol. 114, no. 2, pp. 403–410, Apr. 1999.
- [51] J. N. Gupta, K. Krüger, V. Lauff, F. Werner, and Y. N. Sotskov, "Heuristics for hybrid flow shops with controllable processing times and assignable due dates," *Computers & Operations Research*, vol. 29, no. 10, pp. 1417–1439, 2002.
- [52] A. Baykasoglu and L. Özbakır, "A grammatical optimization approach for integrated process planning and scheduling," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, no. 2, pp. 211–221, 2009.
- [53] Y. Xia, B. Chen, and J. Yue, "Job sequencing and due date assignment in a single machine shop with uncertain processing times," *European Journal of Operational Research*, vol. 184, no. 1, pp. 63–75, 2008.
- [54] V. Vinod and R. Sridharan, "Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system," *International Journal of Production Economics*, vol. 129, no. 1, pp. 127–146, Jan. 2011.
- [55] M. Y. Kovalyov, "Batch scheduling and common due date assignment problem: an NP-hard case," *Discrete applied mathematics*, vol. 80, no. 2, pp. 251–254, 1997.
- [56] T. C. E. Cheng, Z.-L. Chen, and N. V. Shakhlevich, "Common due date assignment and scheduling with ready times," *Computers & Operations Research*, vol. 29, no. 14, pp. 1957–1967, Dec. 2002.
- [57] X. Qi, G. Yu, and J. F. Bard, "Single machine scheduling with assignable due dates," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 122, no. 1, pp. 211–233, 2002.
- [58] S. Li, C. T. Ng, and J. Yuan, "Scheduling deteriorating jobs with CON/SLK due date assignment on a single machine," *International Journal of Production Economics*, vol. 131, no. 2, pp. 747–751, Jun. 2011.
- [59] G. Mosheiov, "A common due-date assignment problem on parallel identical machines," *Computers & Operations Research*, vol. 28, no. 8, pp. 719–732, Jul. 2001.
- [60] G. I. Adamopoulos and C. P. Pappis, "Scheduling under a common due-date on parallel unrelated machines," *European Journal of Operational Research*, vol. 105, no. 3, pp. 494–501, Mar. 1998.
- [61] G. Mosheiov and U. Yovel, "Minimizing weighted earliness-tardiness and due-date cost with unit processing-time jobs," *European Journal of Operational Research*, vol. 172, no. 2, pp. 528–544, 2006.
- [62] H. Luss and M. B. Rosenwein, "A due date assignment algorithm for multiproduct manufacturing facilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 65, no. 2, pp. 187–198, 1993.
- [63] S. R. Lawrence, "Negotiating due-dates between customers and producers," *International Journal of Production Economics*, vol. 37, no. 1, pp. 127–138, 1994.

- [64] T. Yang, Z. He, and K. K. Cho, "An effective heuristic method for generalized job shop scheduling with due dates," *Computers & industrial engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 647–660, 1994.
- [65] Demir, H.I. and Taskin, H., "Integrated Process Planning, Scheduling and Due-Date Assignment," PhD Thesis, Sakarya University, 2005.
- [66] Ceven, E. and Demir, H.I., "Benefits of Integrating Due-Date Assignment with Process Planning and Scheduling," Master of Science Thesis, Sakarya University, 2007.
- [67] H. I. Demir, T. Cakar, Ibrahim Cil, Dugenci, Muharrem, and Erden, Caner, "Integrating Process Planning, WMS Dispatching, and WPPW Weighted Due Date Assignment Using a Genetic Algorithm," vol. 3, no. 7, 2016.
- [68] Demir, Halil İbrahim, Cakar, Tarik, Uygun, Ozer, Simsir, Fuat, and Canpolat, Onur, "Process Planning and Scheduling with WNOPPT Weighted Due-Date Assignment where Earliness, Tardiness and Due-Dates are Penalized," in *Akademik Platform*, Valencia, 2016.
- [69] Demir, Halil İbrahim, Cakar, Tarik, Ipek, Mumtaz, Erdayman, Burak, and Canpolat, Kadriye, "Process Planning and Scheduling with PPW Due-Date Assignment Using Hybrid Search," *International Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 20–38.
- [70] I. Rechenberg, "Cybernetic solution path of an experimental problem," 1965.
- [71] H.-P. Schwefel, *Numerical optimization of computer models*. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

## **Toz metalurjisi tekniği ile üretilen kobalt esaslı süperalaşımelerde element ilavelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi**

Özgür Özgün<sup>1\*</sup>, Ömer Faruk Akbulut<sup>2</sup>

24.10.2016 Geliş/Received, 30.11.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.297019

### **ÖZ**

Bu çalışmada, toz metalurjisi (T/M) tekniği ile element tozlarından üretilen Stellite 6 süperalaşım malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine Fe ve B elementlerinin etkisi incelenmiştir. Yüksek saflıktaki element tozlarından farklı oranlarda Fe ve B içeriğine sahip karışım tozlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar T/M yöntemi ile şekillendirilip farklı sıcaklıklarda sinterlenmişlerdir. Sinterleme işlemlerinin başarısı yoğunluk ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon X-ışınları analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve enerji dağılımı spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin karakterizasyonu için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Stellite 6 numunelerinin mikroyapısında, kullanılan Cr tozunun iri boyutlu olması nedeniyle iri boyutlu karbürlerin oluştuğu tespit edilmiştir. B ilavesi ile birlikte bağıl yoğunluk değerleri bir miktar artmıştır. B ile birlikte Fe elementinin ilave edilmesiyle bağıl yoğunluk önemli ölçüde artış göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Stellite 6, B ilavesi, Fe ilavesi, yoğunluk, mikroyapı, sertlik

## **The effect of element additions on the microstructure and the mechanical properties of cobalt based superalloys produced via powder metallurgy technique**

### **ABSTRACT**

In this study, the effect of Fe and B elements on the microstructure and mechanical properties of Stellite 6 superalloy materials produced from elemental powders by powder metallurgy (P/M) technique was investigated. Powder mixtures contained different Fe and B content were prepared from high purity elemental powders. The prepared powder mixtures were shaped by P/M method and then sintered at various temperatures. The success of sintering operations was determined by density measurements. Microstructural characterization was carried out with X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometry (EDS). Microhardness measurements were conducted for to characterize mechanical properties. Due to large particle size of the used Cr powder coarse carbides formed in the microstructure of Stellite 6 samples. Relative density values increased slightly with B addition. Relative density was increased dramatically by the addition of Fe element with B.

**Keywords:** Stellite 6, B addition, Fe addition, density, microstructure, hardness

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü – oozgun@bingol.edu.tr



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklıklarda aşınma ve korozyon direncini koruyabilen malzemelerin tasarımı ve üretimi havacılık, otomotiv, kimya ve petrol endüstrilerindeki şiddetli servis şartları için büyük önem taşımaktadır [1]. Geleneksel olarak süperalaşımlar bu uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Süperalaşımlar, oldukça şiddetli mekanik gerilmelerle karşılaşılacak ve çoğunlukla yüksek yüzey kararlılığı gerektiren yüksek sıcaklıklardaki servis şartlarında kullanılmak üzere geliştirilen ve temeli VIIIIB grubu elementler tarafından oluşturulan bir alaşım grubudur. Süperalaşımlar kobalt esaslı süperalaşımlar, demir esaslı süperalaşımlar ve nikel esaslı süperalaşımlar olmak üzere üç sınıfta ele alınabilirler [2]. Co esaslı süperalaşımlar, yüksek sıcaklıklarda mükemmel aşınma ve korozyon dirençleri ile kesici aletler, talaşlı işlem takımları ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar için önemli endüstriyel malzemelerdir. Co esaslı süperalaşımların çoğu özelliği Co'nun kristalografik doğasından kaynaklanmaktadır. Cr, W, Mo katı eriyik sertleşmesi ve karbür oluşumu sağlarken korozyon dayanımı Cr tarafından sağlanır [3,4]. İyi özelliklerinden dolayı Co esaslı süperalaşımların yeni türlerinin geliştirilmesi amacıyla oldukça yoğun araştırmalar yapılmaktadır [5,6]. Hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda üstün korozyon ve oksidasyon direnci ile mekanik ve tribolojik özelliklerin eşsiz bir kombinasyonunu sergileyen Stellite alaşımları [7] Co esaslı süper alaşımların önde gelenlerindedir [8]. Co esaslı süperalaşımların uygulamaları geleneksel olarak en çok nükleer endüstriye yönelik iken [9] günümüzde Stellite alaşımlarının kullanımı odun hamuru, kağıt işleme, petrol ve gaz işleme, ilaç sanayi ve kimyasal işleme gibi farklı endüstriyel alanlara yayılmıştır [10]. Bu denli yaygın kullanım alanına sahip Stellite alaşımlarının en önde gelenlerinden biri kuşkusuz 1900'lü yılların başında Elwood Haynes tarafından geliştirilmiş ilk Stellite alaşımı olan Stellite 6'dır [11,12].

Co esaslı süperalaşımlar döküm parçalar, toz metal parçalar, sıcak izostatik preslenmiş (HIP) parçalar, kaynaklanmış sert yüzeyler, lazer sert yüzeyler ve termal sprey kaplamalar gibi farklı formlarda kullanılabilirler [13-15]. Döküm alaşımlar çok yaygın olarak kullanılmalarına rağmen Co esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretiminde porozite, segregasyon, iri tane boyutu ve dendritler arası ötektik karbür ağı gibi problemlerin [16,17] önlenmesi veya giderilebilmesi için önemli tedbirler veya ilave ısı işlemler gerekmektedir [18]. Aksi halde nispeten büyük boyutlu karbür yapıları ve gözenekler gibi var olan kusurlar yüzünden yüksek gevrekliğe ve düşük darbe ve yorulma direncine sahip olurlar [19]. Stellite 6 gibi yüksek karbon oranına sahip Co esaslı alaşımların

yüksek sıcaklıklarda bile şekillendirilmesi zordur [20]. Co esaslı süperalaşımların toz metalurjisi ile üretiminde genellikle sıcak izostatik presleme de uygulanmaktadır. Ancak bu yöntem hem çok pahalıdır hem de esnekliği azdır [21]. Endüstriyel talepler, Stellite 6 alaşımının kullanım alanını daha yüksek gerilmeli uygulamalara kaydırmaktayken, üretim prosesleri ihtiyaç duyulan tribo-mekanik özellikleri sağlayacak şekilde adapte edilebilir [22]. Toz metalurjisinin (T/M) süperalaşımların üretilmesi için potansiyel avantajları 1960'ların sonunda ortaya çıkmıştır. 1970'lerde süperalaşım tüketicisi ve üreticileri toz metalurjisini düşük maliyetli ve yüksek performanslı uçak parçalarının üretimi için potansiyel yol olarak görmeye başladılar. T/M ile üretilmiş süperalaşımlar, geleneksel döküm veya dövme parçaların performans gerekliliklerini karşılayamadığı uygulamalarda kullanılırlar. Geleneksel malzemelerin başarısızlığı (hasara uğraması) genellikle düşük veya homojen olmayan özelliklerden ve termomekanik özelliklerin düşmesine neden olan segregasyondan kaynaklanmaktadır [2].

Bu çalışmada, toz metalurjisi tekniği kullanılarak element tozlarının bir araya getirilmesi ile Co esaslı süperalaşımlar içinde en yaygın kullanım alanına sahip olan Stellite 6 süperalaşımının toz karışımı hazırlanarak bu toz karışımından Stellite 6 süperalaşım parçalar üretilmiştir. Üretimde Stellite 6 alaşımı içerisinde farklı oranlarda elementel Fe ve amorf B tozu ilave edilip bu ilavelerin sinterleme davranışı ve son ürün özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinin başarıları yoğunluk ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri X-ışınları analizi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve enerji dağılımı spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellik olarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

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

DeneySEL çalışmalarda kullanılan element tozlarının sahip oldukları özellikler Tablo 1'de, SEM görüntüleri Şekil 1'de ve üretilen numunelerin kimyasal bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Üretilen numuneler için element tozları Tablo 2'de belirtilen oranlarda 0,0001 hassasiyetli hassas terazide tartıldıktan sonra turbula karıştırıcıda 24 saat süre ile karıştırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Karıştırılmış tozlardan hidrolik preste 700 MPa basınç uygulanarak 13 mm çapında silindirik numuneler preslenmiştir. Preslenen ham numuneler Ar gazı atmosferinde 1120–1170 °C sıcaklık aralığında 90 dk sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi MTI marka tüp fırında alümina altlık kullanılarak yapılmıştır. Sinterlenen numunelerin

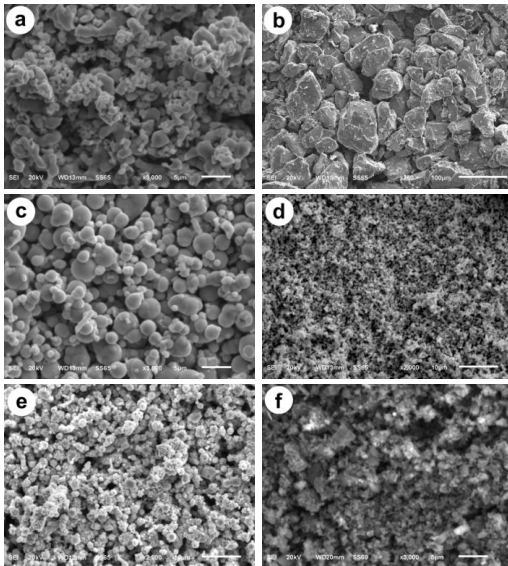
yoğunluğu Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. XRD analizi Rigaku Ultima IV X-Ray Diffractometer cihazında Cu X-ışını tüpü ( $\lambda=1,5405$ ) kullanılarak 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı ile yapılmıştır. SEM ve SEM/EDS incelemeleri JEOL JSM 6510 taramalı elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Shimadzu marka sertlik cihazında 200 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan element tozlarının bazı özellikleri (Some properties of the used element powders)

Tozun adı	Partikül boyutu	Safılık (%)	Üretici
Co	1,6 $\mu\text{m}$	$\geq 99,5$	Alfa Aesar
Cr	-325 mesh	$\geq 99$	Sigma Aldrich
W	0,6-1 $\mu\text{m}$	$\geq 99,9$	Sigma Aldrich
Ni	<50 $\mu\text{m}$	$\geq 99,5$	Sigma Aldrich
Grafit	<20 $\mu\text{m}$	-	Sigma Aldrich
Ni	<50 $\mu\text{m}$	$\geq 99,7$	Sigma Aldrich
Amorf B	$\leq 1 \mu\text{m}$	$\geq 95$	Sigma Aldrich

Tablo 2. Hazırlanan toz karışımlarının ağırlıkça % olarak kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of the prepared powder mixtures by weight percentage)

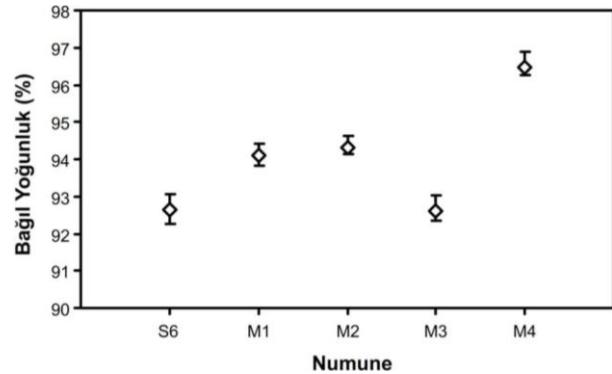
Numune	Co	Cr	W	Ni	C	Fe	B
S6	59,3	31	5,5	3	1,2	-	-
M1	58,707	30,69	5,445	2,97	1,188	-	1
M2	58,114	30,38	5,39	2,94	1,176	-	2
M3	56,928	29,76	5,28	2,88	1,152	3	1
M4	56,335	29,45	5,225	2,85	1,14	3	2



Şekil 1. Kullanılan tozların SEM görüntüleri; a) Co, b) Cr, c) karbonil Fe, d) W, e) Ni, f) amorf B (SEM images of the used powders; a) Co, b) Cr, c) carbonyl Fe, d) W, e) Ni, f) amorphous B

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

Şekil 2’de üretilen Stellite 6 süperalaşım parçalarda 1120 °C’de gerçekleştirilen sinterleme işlemi ile ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir. Sinterleme sıcaklığı 10 °C’lik artışlarla 1170 °C’ye kadar çıkarılmasına rağmen bağıl yoğunlukta anlamlı bir değişim olmamış; yüksek oranda bor içeren numunelerde 1150 °C’de ergime sonucu şekil kaybı gözlenmiştir. Grafik incelendiğinde B ilavesinin aynı sıcaklıkta gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde daha yüksek yoğunlaşma sağladığı görülmektedir. En yüksek yoğunluk değerine yüksek oranda Fe ve B içeren M4 numunesinde ulaşılmıştır. Bu değer ortalama %96,47 olmuştur. Literatürde PM tekniği ile üretilen Co esaslı alaşımların %97 ila %100 arasında yoğunlaşabildiği belirtilmektedir [24]. Stellite alaşımları üzerine yapılan çok sayıda çalışmada ise tam yoğunluğa ulaşılabilmesi için sıcak izostatik presleme (HIP) yöntemi kullanılmıştır [1,10,22,29,30]. Bazı çalışmalarda HIP ile üretilen malzemelere ikinci bir HIP’leme işlemi uygulanmıştır [22]. Hatta bazı çalışmalarda HIP uygulamasına rağmen %100 bağıl yoğunluğa ulaşılamamıştır [1]. Gülsoy ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada [31] önalaşım Stellite 6 alaşım tozundan toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile şekillendirilen ham parçaların 1200 °C’de sinterlenmesi ile yaklaşık %90 bağıl yoğunluğa ulaşılmıştır.

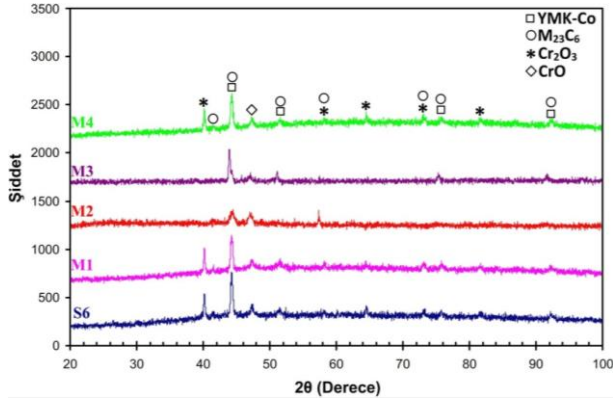


Şekil 2. Üretilen numunelerde 1120 °C’de gerçekleştirilen sinterleme işlemi sonucu elde edilen bağıl yoğunluk değerleri (Obtained relative density values of the produced samples as a result of sintering operation at 1120 °C)

Artan sinterleme sıcaklığıyla bağıl yoğunluğun da arttığı ve 1275 °C’de yapılan sinterleme ile %98,27’ye ulaştığı rapor edilmiştir. Şimdiki çalışmada hem şekillendirme esnasında uygulanan yüksek basınç hem de B ve Fe ilavesi sayesinde daha düşük sıcaklıklarda bu karışım için ulaşılabilecek pik yoğunluğa ulaşılabilmektedir. Ancak ulaşılabilen pik yoğunluk değeri Gülsoy ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen önceki çalışmaya nazaran daha düşük olmuştur. Bunun çalışmada kullanılan Cr

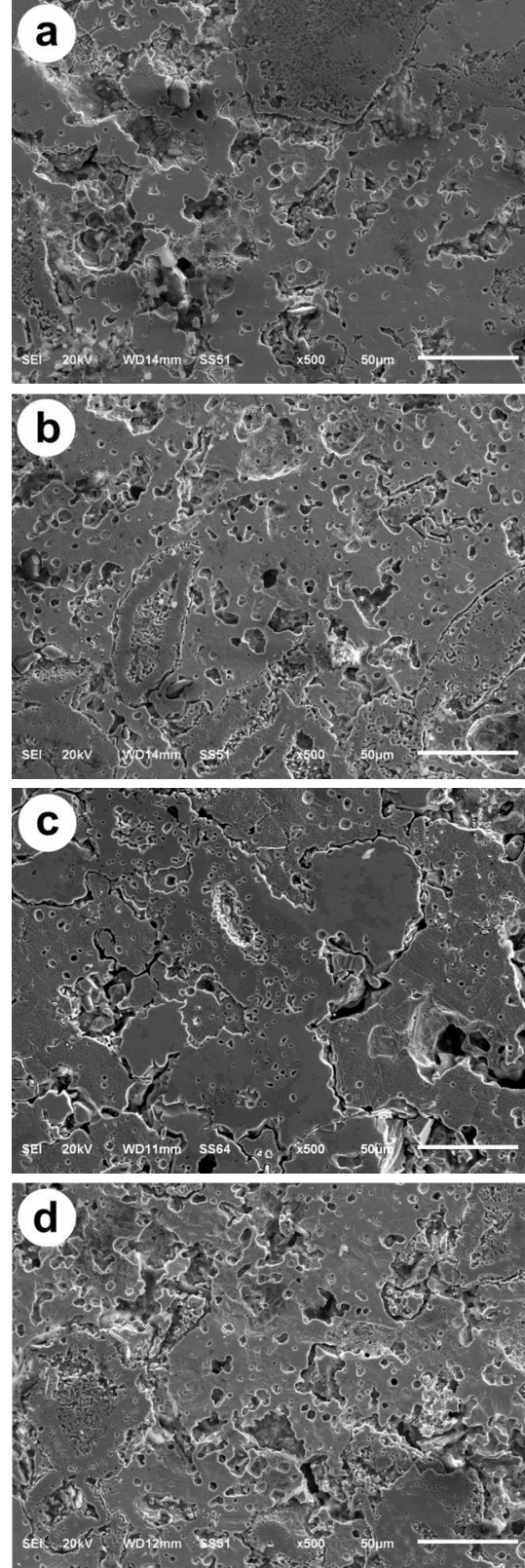
tozunun çok iri boyutlu olmasından ve SEM incelemelerinde de görüleceği üzere yüksek oranda gözenek içermesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 3'te üretilen numunelerin XRD paternleri verilmiştir. Üretilen tüm alaşımların matrislerinin yüzey merkezli kübik yapıya Co katı çözeltisinden oluştuğu görülmektedir. Paternlerden üretilen numunelerde Cr tarafından oluşturulan bol miktarda karbür ve oksit bileşiklerinin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Cr'un yapı içerisinde oluşturduğu karbürler  $M_{23}C_6$  tipi karbürlerdir. Literatürde  $M_{23}C_6$  tipi karbürlerin yüksek Cr içeriğinde hem birincil hem de ikincil karbürler olarak çökelebileceği belirtilmiş [2] olup, şimdiki çalışmada bu bilgi ile uyumlu bulgular elde edilmiştir. Sinterleme işlemleri yüksek saflıktaki argon atmosferinde gerçekleştirilmesine rağmen Cr'un  $Cr_2O_3$  ve CrO tipi iki farklı oksit fazı oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3. Üretilen toz metal parçaların sinterleme işlemi sonrası XRD paternleri (XRD patterns of the produced P/M samples after sintering operation)

Şekil 4'te üretilen Stellite 6 süperalaşım numunelerinden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak tüm numunelerde matris içerisinde homojen dağılım sergileyen iri boyutlu bir faz olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan Cr tozunun partikül boyutunun iri olması, bu fazın sinterleme işlemi esnasında matris içerisinde çözünemeyen Cr tarafından oluşturulduğunu düşündürmektedir. Tüm numunelerde mikroyapının, Co katı çözeltisinin oluşturduğu matris ile matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmış Cr tarafından oluşturulmuş bu fazdan meydana geldiği görülmektedir. Mikroyapıda bu iki faz dışında farklı bir faza rastlanmamıştır. SEM görüntülerinde tüm numunelerin gözenek içerdiği görülmektedir. Mikroyapıda bulunan gözenekler, matris içerisinde küresel veya küresele yakın şekilli iken Cr tarafından oluşturulan fazın içerisinde ve çevresinde geometrik olarak herhangi bir şekil ile tarif edilemeyen



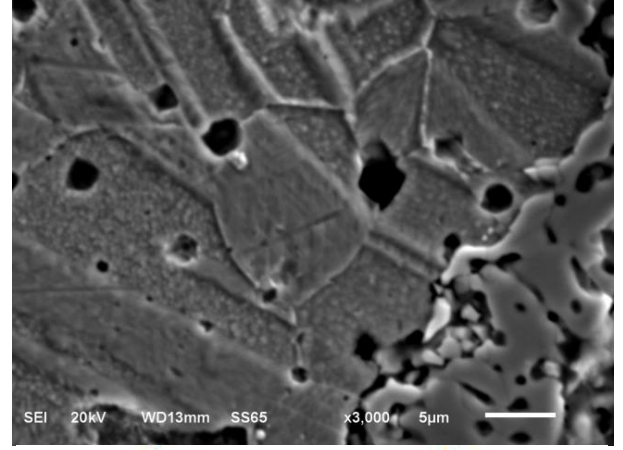
Şekil 4. Sinterleme sonrası alınan SEM görüntüleri; a) S6, b) M1, c) M2, d) M4 (SEM images taken after sintering; a) S6, b) M1, c) M2, d) M4)



düzensiz şekilli gözeneklerdir. Yoğunluk ölçümlerinden elde edilen değerler ile uyumlu olarak en az gözenekliliğin M4 numunesinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte M4 numunesinin matrisinde yer alan gözeneklerin diğer numunelere nazaran boyutsal olarak daha küçük oldukları söylenebilir. Literatürde P/M tekniği ile üretilen Co esaslı alaşımların %97 ila %100 arasında yoğunlaşabildiği belirtilmektedir [24]. SEM görüntülerinden çalışmada kullanılan iri boyutlu Cr tozunun üretiminden gelen iri gözenekler içerdiği görülmektedir. Hazırlanan alaşım tozlarının yaklaşık olarak ağırlıkça %30 mertebesinde Cr içerdiği göz önünde bulundurulduğunda, Cr tozunun üretiminden içerdiği gözenekler yüzünden bağlı yoğunluk değerlerinin ulaşılacak değerden daha düşük kalmış olduğu söylenebilir.

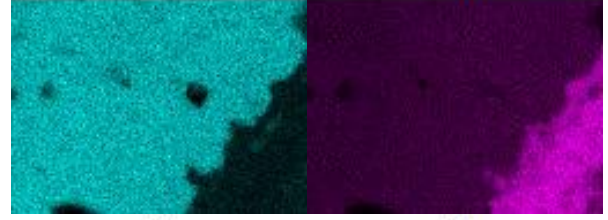
Şekil 5'te sinterleme işleminden sonra M3 numunesinden alınmış SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler verilmiştir. Bu analiz Co matris ile Cr partikülünün arayüzeyini kapsayacak bir bölgeden alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde Cr partikülünün yer aldığı kısımda Cr'a karbon elementinin de eşlik ettiği görülmektedir. Bu durum Cr partikülünün sinterleme işlemi esnasında karbür oluşturduğunu düşündürmektedir. XRD analizinden elde edilen paternler de göz önünde bulundurulduğunda bu fazın Cr tarafından oluşturulan karbür fazı olduğu kesin olarak söylenebilir. Co matris içerisinde de önemli miktarda Cr bulunduğu görülmektedir. Bununla birlikte Cr tarafından oluşturulmuş karbür çökeltilerinin de Co içermesi Co'ın karbür fazı içerisine difüze olduğunu, dolayısıyla karbür/matris arayüzeyinde ıslanmayla ilgili bir sorun olmadığını göstermektedir. Atom yarıçapları büyük olan başta W olmak üzere Ni ve Fe elementlerinin Cr tarafından oluşturulan karbür fazı içerisindeki miktarları yok denecek kadar azdır. XRD analizinde sinterleme işlemi sonucu numunelerde oksit bileşikleri oluştuğu tespit edilmişti. SEM elementel haritalama analizinde oksijenin dağılımını gösteren görüntü incelendiğinde özellikle Cr tarafından oluşturulmuş karbür fazında oksijen miktarının büyük bir artış sergilediği görülmektedir. Jiang ve arkadaşları [32]  $M_7C_3$  ve MC tipi karbürlerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında oksitlendiklerini rapor etmişlerdir. Benzer olarak şimdiki çalışmada  $M_{23}C_6$  tipi karbürlerin de sinterleme işlemi esnasında oksitlendikleri anlaşılmaktadır.

Stellite 6 alaşımı genel olarak mukavemetini içerdiği alaşım elementlerinin Co matrisinde oluşturduğu katı çözümlerden ve karbür çökeltilerinden elde etmektedir [20]. Sinterleme sonrasında alınan SEM görüntüleri Cr'un boyutları 50 ile 100  $\mu m$  arasında değişen çok iri çökeltiler halinde kaldığını göstermiştir. Bu Cr çökeltilerini dağıtmak için numunelere homojenizasyon



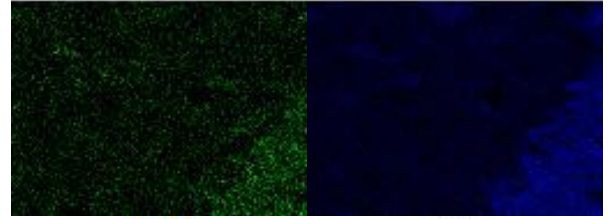
Co

Cr



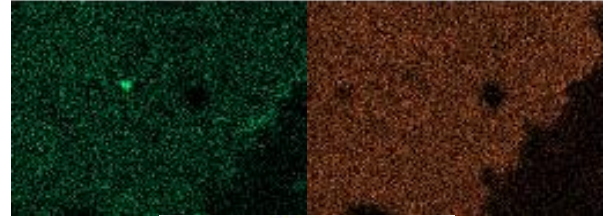
C

O



W

Ni

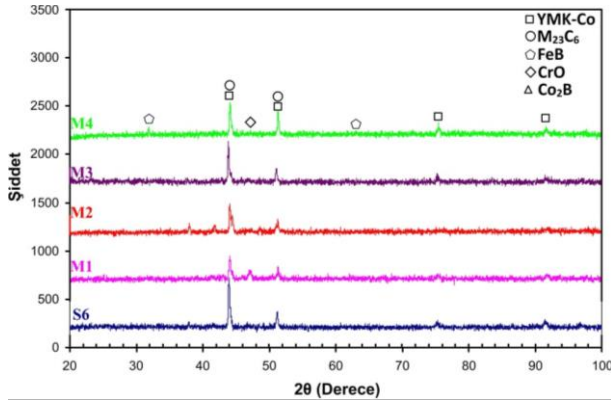


Fe



Şekil 5. Sinterleme işlemi sonrası M3 numunesinden alınmış SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler (The images of the SEM elemental mapping analysis of M3 sample taken after sintering operation)

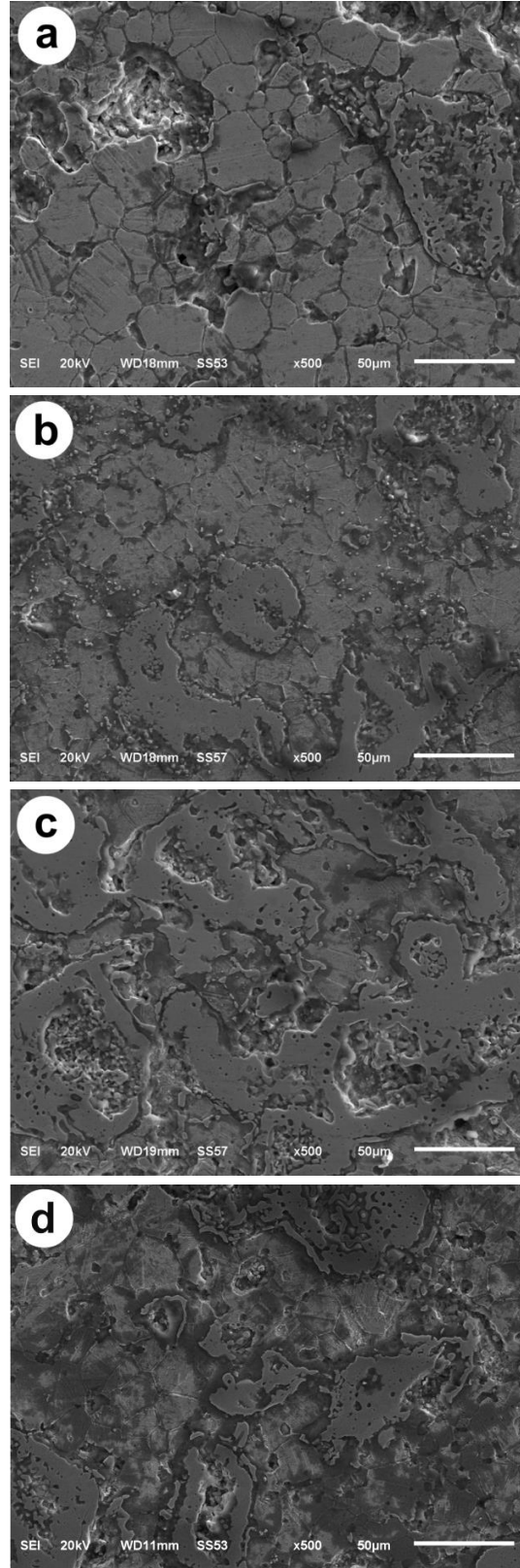
işlemi uygulanmıştır. Bu işlem 1140 °C'de 6 saat bekletme ile gerçekleştirilmiştir. 6 saat süren çözündürme işleminden sonra numuneler karbür çökmesini sağlamak amacıyla 745 °C'de 6 saat bekletilmişlerdir. Bu ısıl işlem prosedüründen sonra numunelerden alınan XRD analizine ait paternler Şekil 6'da verilmiştir. XRD analizi, uygulanan ısıl işlemlerle, sinterleme işleminden sonra oluşan karbür ve oksitlere ait piklerin şiddetinde önemli bir azalma olduğunu göstermektedir. M4 numunesinin XRD paterninde Fe ile B'un oluşturduğu FeB bileşiğine ait piklere rastlanmıştır.



Şekil 6. Çözündürme işlemi sonrası yapılan XRD analizine ait paternler (Patterns of the XRD analysis conducted after solutionizing)

Isıl işlem sonrası alınan SEM görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Görüntülerde Cr tarafından oluşturulan fazın çözünmeye başladığı, ancak çözünmenin tamamlanması için sıcaklık ve sürenin yetersiz geldiği anlaşılmaktadır. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde B ilavesinin etkisi sonucu 1150 °C'de bazı numunelerde ergimeler meydana gelmesinden dolayı çözündürme ısıl işlemi 1140 °C'de yapılmıştır. Bu sıcaklığın Cr tarafından oluşturulan fazın çözünmesi için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. 745 °C'de yapılan bekletme işleminin amacına uygun olarak matris içerisinde karbür çökelmelerini sağladığı, ancak daha çok ve homojen dağılımlı karbürlerin oluşturulabilmesi için sürenin uzatılması gerektiği anlaşılmaktadır. Sinterleme sonrası alınan SEM görüntüleri ile kıyaslandığında, ısıl işlem yapılmış numunelerin SEM görüntülerinde daha az gözenek bulunmaktadır. Bununla birlikte gözeneklerin boyutlarında da bir küçülme söz konusudur. Bu durum sinterleme süresinin arttırılmasının yoğunlukta önemli bir artış sağlayacağını düşündürmektedir.

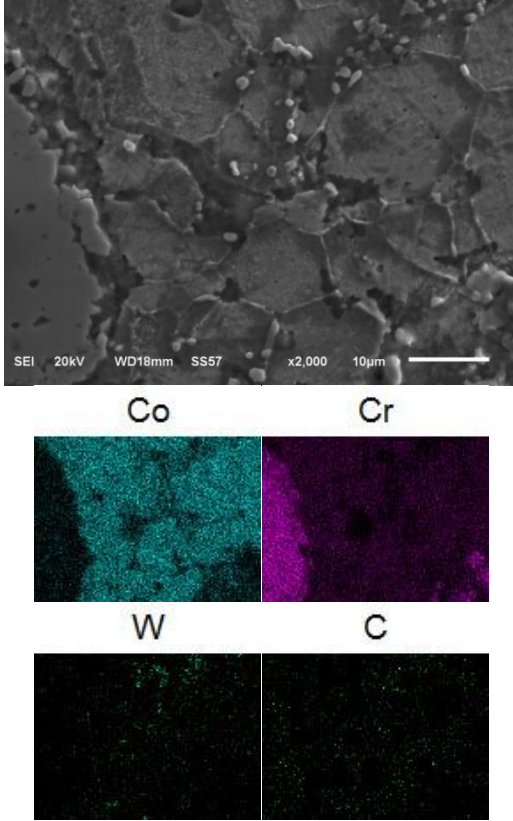
Isıl işlem sonucu mikroyapıda bulunan çökeltilerin tanımlanabilmesi amacıyla M1 numunesinden alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler Şekil 8'de verilmiştir. Haritalama analizi, SEM görüntülerinde görülen matris içerisinde dağılmış iri



Şekil 7. Isıl işlem sonrası alınan SEM görüntüleri; a) S6, b) M1, c) M3, d) M4 (SEM images taken after heat treatment; a) S6, b) M1, c) M3, d) M4)



boyutlu fazın Cr tarafından oluşturulmuş oksitlenmiş karbür fazı olduğunu göstermektedir. Mikroyapıda özellikle tane sınırlarında oluşmuş küçük boyutlu ve beyaz renkli çökeltiler olduğu görülmektedir. Haritalama analizine ait görüntülerden bu çökeltilerin olduğu bölgelerde W ve C elementlerinin miktarında bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Co esaslı süperalaşımlarda W elementi de karbür oluşturmakta ve W tarafından oluşturulan karbürlerin mikroyapıda parlak beyaz renkte görüldüğü bildirilmektedir [30]. Bu açıklamaya istinaden tane sınırlarında görülen küçük boyutlu çökeltilerin W tarafından oluşturulan karbürler olduğu anlaşılmaktadır. Co esaslı süperalaşımlarda W tarafından oluşturulan karbürler  $M_6C$  tipi karbürlerdir [2,10,33]. SEM görüntüsünde  $M_6C$  tipi karbürlerin tüm mikroyapıda homojen bir dağılım sergilemediği, sadece bazı tane sınırlarında oluştuğu görülmektedir. Her ne kadar 745 °C'deki bekleme süresinin uzatılmasıyla mikroyapının genelinde bu karbürlerin oluşturulabileceği düşünülse de, elementel haritalama analizinde W'ın mikroyapıdaki dağılımını gösteren kare, W oranının bu işlem için yeterli olmayabileceğini düşündürmektedir. Çünkü  $M_6C$  tipi karbürlerde W miktarı oldukça yüksek iken matrisin geri kalanında W yok denecek kadar az olduğu görülmektedir.



Şekil 8. M1 numunesinden ısı işlem sonrası alınan SEM elementel haritalama analizine ait görüntüler (The images of the SEM elemental mapping analysis of M1 sample taken after heat treatment)

Tablo 3'te sinterleme sonrası üretilen numunelerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Co matrisin sertliği oldukça düşük olup bunda Cr elementinin matris içerisinde çözünemeyip iri partiküller şeklinde bulunmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Stellite 6 alaşımında temel mukavemet kazandırıcı mekanizma olan karbürlerin mikroyapıda ince ve homojen dağılım sergilemesi sertlik ve mukavemet değerlerini arttırmaktadır [31]. Bu çalışmada üretilen numunelerin sertlik değerlerinin düşük olması ilave edilen Cr'un partikül boyutunun çok büyük olması ve dolayısıyla mikroyapı içerisinde tam anlamıyla çözünememiş olmasından kaynaklanmıştır. Cr'un mikroyapıda çözünememiş olması, hem matrisin katı çözelti ile sertleşmesinin az olması hem de mikroyapıda küçük ve homojen dağılımlı karbürler oluşturamaması anlamına gelmektedir. Uygulanan ısı işlem matrisin sertlik değerlerinde belirgin bir değişim sağlamadığı görülmektedir. Üretilen numunelere uygulanacak daha uzun süreli bir çözündürme ve bunu takip edecek 700 °C dolaylarındaki bir ısı işlem ile Cr'un daha fazla çözünebileceği ve sonrasında mikroyapıda homojen dağılım sergileyen ince karbürler olarak çökelebileceği düşünülmektedir. Cr tarafından oluşturulan fazdan 400-1100 Vickers aralığında değişen farklı sertlik değerleri ölçülmüştür.

Tablo 3. Sinterleme ve ısı işlem sonrası numunelerin matrisinden ölçülen ortalama Vickers ( $HV_{0,2}$ ) sertlik değerleri (The average Vickers ( $HV_{0,2}$ ) hardness values of the matrix of the samples after sintering and heat treatment)

Numune	Sinter	Isıl İşlem
S6	156	134
M1	145	148
M2	152	159
M3	162	156
M4	164	160

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

Bu çalışmada T/M tekniği ile element tozlarından 5 farklı kimyasal bileşime sahip Stellite 6 süperalaşım parçalar üretilmiştir. Üretilen parçalarda Fe ve B'nin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Fe ve B ilavesi aynı sıcaklıkta gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde daha yüksek bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılabilmesini sağlamıştır. Üretilen numunelerde en düşük gözeneklilik Fe ve B miktarı en yüksek olan M4 numunesinde elde edilmiştir. Numunelerin matrisinde bulunan gözeneklerin küresel şekilli oldukları görülmüştür.



- Cr tozunun iri boyutlu olması, üretilen malzemelerde Cr bakımından zengin ve boyutları 50 ile 100 µm arasında değişen çok iri çökeltilerin oluşmasına yol açmıştır. Bu durum Cr'un Co matriste katı çözeltili ile sağlayacağı sertleşmeyi olumsuz etkilemiştir. Daha da önemlisi Cr'un mikroyapıda oluşturacağı homojen dağılımlı ince karbürler oluşmamış ve buna bağlı olarak sertlik değerleri arzu edilen değerlere ulaşamamıştır. Bu olumsuzluk göz önünde bulundurulduğunda, element tozları kullanılarak Stellite alaşımlarının T/M metodu ile üretiminde, karbür veya oksit bileşikler oluşturulan Cr gibi elementler için ince tozların tercih edilmesinin kaçınılmaz olduğu söylenebilir.
- Hem XRD analizleri hem de SEM elementel haritalama analizleri Cr'un karbür ve oksit bileşikler oluşturduğunu göstermiştir. Ancak bu bileşikler çok iri boyutlu çökeltiler halinde bulunduğundan mikroyapı ve mekanik özellikler açısından faydalı olmamıştır.
- İri Cr fazını çözündürmek amacıyla uygulanan ısı işleminin sıcaklık ve süresi yetersiz olmuştur. Uygulanacak daha uzun süreli bir çözündürme ve bunu takip edecek 700-800 oC aralığında yapılacak uzun süreli bir ısı işlemi ile Cr'un daha fazla çözünebileceği ve sonrasında mikroyapıda homojen dağılım sergileyen ince karbürler olarak çökelebileceği düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, BAP-376-239-2015 proje numarası ile Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında gösterdikleri ilgi ve harcadıkları emeklerinden dolayı Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] C. D. Opris, R. Liu, M. X. Yao ve X. J. Wu, "Development of Stellite alloy composites with sintering/HIPing technique for wear-resistant applications", *Mater. Design*, cilt 28, s. 581–591, 2007.
- [2] C.T. Sims, N. S. Stoloff ve W. C. Hagel, "Superalloys II", Wiley-Interscience, New York, 1987.
- [3] W. Betteridge, "Cobalt and its alloys", Chichester Halsted Pres, 1982.

- [4] J. R. Davis, "Nickel, cobalt, and their alloys", Materials Park (OH): ASM International, 2000.
- [5] V. Kuzucu, M. Ceylan, H. Çelik ve İ. Aksoy, "Microstructure and phase analyses of Stellite 6 plus 6 wt.% Mo alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 69, s. 257-263, 1997.
- [6] Ş. Aykut, M. Gölcü, S. Semiz ve H. S. Ergür, "Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of stellite 6 using an artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, cilt 190, s. 199-203, 2007.
- [7] A. Khoddamzadeh, R. Liu, M. Liang ve Q. Yang, "Wear resistant carbon fiber reinforced Stellite alloy composites", *Mater. Design*, cilt 56, s. 487–494, 2014.
- [8] A. Khoddamzadeh, R. Liu, M. Liang ve Q. Yang, "Novel wear-resistant materials – Carbon fiber reinforced low-carbon Stellite alloy composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, cilt 43, s. 344–352, 2012.
- [9] N. S. Mcintyre, D. Zetaruk ve E. V. Murphy, "X-ray photoelectron studies of the aqueous oxidation of Inconel-600 alloy", *J. Electrochem. Soc.*, cilt 126, s. 750–760, 1979.
- [10] F. Rosalbino ve G. Scavino, "Corrosion behaviour assessment of cast and HIPed Stellite 6 alloy in a chloride-containing environment", *Electrochim. Acta*, cilt 111, s. 656-662, 2013.
- [11] V. Kuzucu, M. Ceylan, H. Celik ve I. Aksoy, "An investigation of Stellite-6 alloy containing 5.0 wt.% silicon", *J. Mater. Process. Technol.*, cilt 79, s. 47–51, 1998.
- [12] R. Ahmed, H. D. V. Lovelock, N. H. Faisal ve S. Davies, "Structure–property relationships in a CoCrMo alloy at micro and nano-scales", *Tribol. Int.*, cilt 80, s. 98–114, 2014.
- [13] P. Crook, "Cobalt and cobalt alloys", *ASM Handbook*, cilt 2, s. 446-454, 1991.
- [14] D. L. Klarstrom, "Wrought cobalt-base superalloys", *Journal of Materials Engineering and Performance*, cilt 2, s. 523-530, 1993.
- [15] P. Crook, "Cobalt-base alloys resist wear, corrosion, and heat," *Advanced Materials & Progress*, cilt 145, s. 27-30, 1994.
- [16] J. Campbell, "Castings: The new metallurgy of cast metals", 2nd edition, Oxford/GB: Elsevier Science & Technology, 2003.
- [17] D. M. Stefanescu, "Science and engineering of casting solidification", 2nd edition, USA: Springer US, 2009.
- [18] G. L. Erickson, "Polycrystalline cast superalloys", *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, cilt 1, s. 1528–1550, 2005.

- [19] H. Yu, R. Ahmed, H. de Villiers Lovelock ve S. Davies, “Tribo-Mechanical Evaluations of Cobalt-Based (Stellite 4) Alloys Manufactured via HIPing and Casting”, Proceedings of the World Congress on Engineering, cilt II, July 2 - 4, 2007, London, U.K.
- [20] D. Klarstrom, P. Crook ve J. Wu, “Metallography and microstructures of cobalt and cobalt alloys”, G.F. Vander Voort (Ed.), ASM Handbook: Metallography and Microstructures, cilt 9, s. 762–774, 2004.
- [21] S. Weber, W. Theisen, F. Castro ve A. Pyzalla, “Influence of gas atmosphere and hard particle addition on the sintering behavior of high alloyed PM cold work tool steels”, Materials Science and Engineering A, cilt 515, s. 175-182, 2009.
- [22] R. Ahmed, A. Ashraf, M. Elameen, N. H. Faisal, A. M. El-Sherik, Y. O. Elakwah ve M. F. A. Goosen, “Single asperity nanoscratch behaviour of HIPed and cast Stellite 6 alloys”, Wear, cilt 312, s. 70-82, 2014.
- [23] T. M. Pollock ve S. Tın, “Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties”, Journal of Propulsion and Power, cilt 22, no 2, s. 361–374, 2006.
- [24] N. S. Stoloff, “Wrought and powder metallurgy (P/M) superalloys”, ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, cilt 1, s. 1478–1527, 2005.
- [25] A. Simchi, “Densification and microstructural evolution during co-sintering of Ni-base superalloy powders”, Metall. Mater. Trans. A, cilt 37, s. 2549–2557, 2006.
- [26] P. J Vervoot, R. Vetter ve J. Duszczyk, “Overview of powder injection molding”, Adv. Perform. Mater., cilt 3, s. 121–151, 1996.
- [27] A. Lal, R. G. Iacocca ve R. M. German, “Microstructural Evolution During The Supersolidus Liquid Phase Sintering of Nickel-Based Prealloyed Powder Mixtures”, Journal of Materials Science, cilt 35, s. 4507–4518, 2000.
- [28] N. S. Babu, S. B. Tiwari, B. N. Rao, “Development and Validation of Processing Map for Nickel Based Powder Metallurgy Superalloys”, Powder Metallurgy, cilt 49, no 2, s. 160–166, 2006.
- [29] U. Malayoglu ve A. Neville, “Comparing the performance of HIPed and Cast Stellite 6 alloy in liquid–solid slurries”, Wear, cilt 255, s. 181–194, 2003.
- [30] H. Yu, R. Ahmed, H. D. V. Lovelock ve S. Davies, “Influence of manufacturing process and alloying element content on the tribomechanical properties of cobalt-based alloys”, J. Tribol., cilt 131, s. 1–12, 2009.
- [31] H. Ö. Gülsoy, Ö. Özgün ve S. Bilketay, “Powder injection molding of Stellite 6 powder: Sintering, microstructural and mechanical properties”, Materials Science and Engineering A, cilt 651, s. 914-924, 2016.
- [32] W.H. Jiang, X. D. Yao, H. R. Guan ve Z. Q. Hu, “Carbide behaviour during high temperature low cycle fatigue in a cobalt-base superalloy”. Journal of Materials Science, cilt 34, s. 2859-2864, 1999.
- [33] R. Liu, X. S. Qi, S. Kapoor, X. J. Wu, “Effects of chemical composition on solidification, microstructure and hardness of Co-Cr-W-Ni and Co-Cr-Mo-Ni alloy systems”, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, cilt 5, s. 110–122, 2010.

## **Odaklanmış İyon Demeti (FIB) kesitlemesi ile diş dokularına ait içyapıların mikro/nano-analizi**

Meltem Sezen<sup>1\*</sup>, Feray Bakan<sup>2</sup>

*05.10.2016 Geliş/Received, 01.12.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.284224

### **ÖZ**

Diş dokuları sert ve kırılğan olduğundan, bu malzemelerin ultramikrotomi veya diğer metotlarla kesitlenmesi ve içyapılarının mikro ve nano analizi problem yaratmaktadır. Bu tür malzemelerin mikroyapılarının bölgesel ve istenilen geometride incelenmesi için FIB-SEM çift demet platformların kullanılması en uygun çözümdür. Çift demet platformları, eşzamanlı olarak yüksek büyütme ve yüksek çözünürlüklere varabilen görüntüleme ve elementel analiz imkânı sağlamaktadır. Bu çalışmada, FIB-SEM ile dentin ve mine tabakaları gibi farklı özelliklerdeki diş dokularının içyapılarındaki mikro-/nano-yapısal farklılıkların tespiti sağlanmıştır. Farklı morfoloji ve kimyasal bileşene sahip diş dokularının içyapılarının iyon-kesitlemesi ile incelenmesi ile bu çalışma Türkiye'deki diş hekimliği alanında FIB-SEM platformlarının aktif kullanılması için önemlidir.

**Anahtar Kelimeler:** Odaklanmış iyon demeti (FIB), İyon Kesitlemesi, Diş Dokusu, Dentin, Mine

## **Micro/nano analysis of tooth microstructures by Focused Ion Beam (FIB) cross-sectioning**

### **ABSTRACT**

Since dental structures are hard and fragile, cross-sectioning of these materials using ultramicrotomy and other techniques and following micro and nano analysis cause problems. The use of FIB-SEM dual beam platforms is the most convenient solution for investigating the microstructures, site-specifically and in certain geometries. Dual beam platforms allow for imaging at high magnifications and resolutions and simultaneous elemental analysis. In this study, the micro/nano-structural and chemical differences were revealed in dentin and enamel samples. The investigation of dental tissues having different morphologies and chemical components by ion-cross-sectioning is important for the use of FIB-SEM platforms in dentistry in Turkey.

**Keywords:** Focused Ion Beam (FIB), Ion Cross-Sectioning, Dental Tissue, Dentin, Enamel

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sabancı Üniversitesi, SUNUM, İstanbul- meltemsezen@sabanciuniv.edu

<sup>2</sup> Sabancı Üniversitesi, SUNUM, İstanbul- feraybakan@sabanciuniv.edu

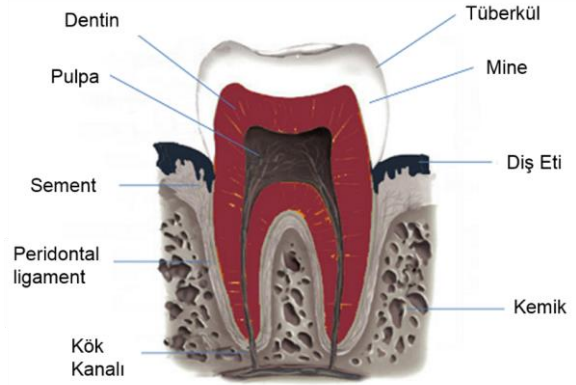
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İyon kolonları, kullanım kolaylığı bakımından diğer cihazlara entegre edilebilir. Bunlardan en kullanışlı olanı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birlikte kullanımını sağlayan, elektron ve iyon kolonunun, EDS detektörünün, mikromanipülatör ve gaz enjeksiyon sistemleriyle bir arada bulunduğu çift- platformdur. Odaklanmış İyon Demeti-Taramalı Elektron Mikroskobu (FIB-SEM) platformlarında, seri kesitleme ve görüntüleme tekniği kullanılarak, malzeme üzerinde aşındırma sonucu temizlenen her bir kesitten alınan fazla sayıdaki iki boyutlu SEM görüntüleri veya EDS spektrumları/haritaları birleştirilerek, belirli bir hacimde üç boyutlu morfolojik veya kimyasal bilgi elde edilmektedir. Belirtilen uygulamalar sayesinde birkaç yüz mikrondan, birkaç mikrona kadar belirlenen hacimdeki elementel, kimyasal ve/veya morfolojik dağılım kolaylıkla belirlenebilmektedir. FIB tekniklerinin kullanılması özellikle içerisinde tübüler kanallar, gözenekler, mikro çatlaklar vs. bulunabilen farklı diş dokularının mikroyapısal analizinde önem taşımaktadır. Bu tür sert malzemelerin mikro/nano boyutlardaki analizi ve yapılandırılması için kullanılabilen tek yöntem FIB-SEM platformlarının mümkün kıldığı odaklanmış iyonlar ile aşındırma/kesitleme ve elektron/iyon destekli uygulamalardır [1], [2], [3], [4].

Dişler, mine, dentin ve sement olmak üzere üç sert diş dokusu ve bir yumuşak diş dokusundan (pulpa) oluşmaktadır. Ağız boşluğunda görünen diş kronu, mine tabakası ile örtülüdür. Diş minesini insan bedeninin en sert dokusudur ve esas unsurlar olan kalsiyum, fosfor, karbonat, magnezyum, sodyum, su ve organik bileşenler ile yaklaşık % 96 oranında organik olmayan bileşenlerden oluşmaktadır. Dentin insan bedeninin ikinci derecede en sert dokusudur ve yaklaşık % 70 oranında organik unsurlardan, % 20 oranında organik malzemelerden ve sudan oluşmaktadır. Dentin dokusu tübüler kanallar içermektedir. Kanallar içinde odontoblast uzantılarının bulunması dentinin canlı bir doku olduğunu göstermektedir. Mine dokusu prizma şeklindeki hidroksiapatit içerikli kristal yapılardan meydana gelir, bu nedenle çok sert bir inorganik malzemedir. Dentin tübüllerinin içindeki kollajen fibriller sinir ağı oluşturarak, hassasiyet sağlamaktadır [5], [6].

Hem mine, hem de dentin aşırı sert yapıları nedeniyle, içyapılarının ve dokular arası bağlantı noktalarının incelenmesi zor olabilmektedir. SEM incelemeleri sadece yüzey hakkında bilgi verirken, diş örneklerinin önceden kesilmiş, parlatılmış veya dağlanmış olması yüzeyin gerçek morfolojisinin incelenmesinde yanıltıcı olabilmektedir. Buna karşılık, bölgesel iyon kesitlemesi

teknisiyle dokuların yüzey altında bulunan gerçek morfolojisi ve kimyasal dağılımı kolayca açığa çıkmaktadır.



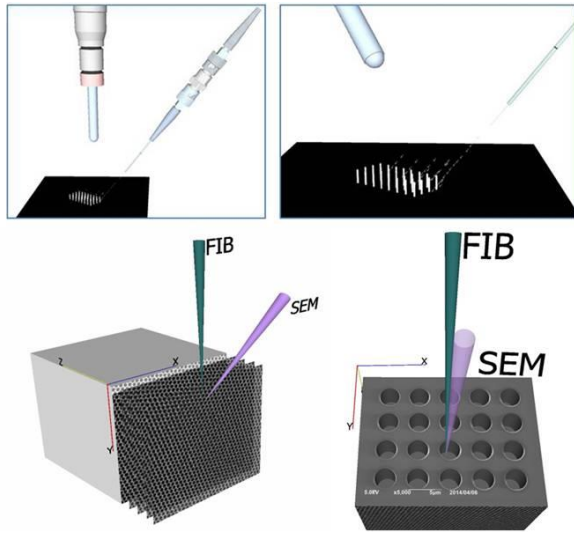
Şekil 1. Diş yapısının farklı bileşenleri (Different components of tooth structure)

## 2. YÖNTEM (EXPERIMENTAL)

Odaklanmış İyon Demeti (FIB) sistemleri, taramalı elektron mikroskobuna (SEM) çok benzer bir sistem olup tek farkı malzeme yüzeyinin elektron demeti yerine, odaklanmış bir iyon demeti ile taranmasıdır. Elektronlara kıyasla daha ağır olan iyonlar (genellikle galyum) malzeme yüzeyinin taranma sırasında aşındırılarak uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, çift demet platformları dahilinde yer alan gaz enjeksiyon sistemleri (GIS) malzeme yüzeyinin elektron veya iyonlar aracılığıyla bölgesel olarak metal depolanmasını ve dağlanmasını; mikromanipülatör ise, ön-kesitlerinin veya küçük boyutlardaki parçaların hazne içerisinde transferini mümkün kılmaktadır. FIB tekniklerinin, geleneksel elektron litografisine bir üstünlüğü ise, bütün bu işlem süreçleri için maske kullanımını ortadan kaldırmasıdır. Çift demet platformlarında, galyum iyonları ile mikro/nano boyutta yapılandırma, depolama ve görüntüleme işlemleri yürütülürken; elektronlar yüksek çözünürlükte görüntüleme ve analiz imkanı sağlamaktadır. Bu platformlar, iyonlar yardımıyla numunelerden yanal kesitler alınmasını mümkün kıldığından, malzemelerin hem yüzeyinde hem de iç kısımlarında detaylı analiz imkânı sunmaktadır. İyon kaynağı olarak FIB sistemlerinde ticari olarak galyum iyonları tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, insan dişi numuneleri incelenmiş olup, çürüksüz erişkin dişler üzerinde mine, dentin ve mine-dentin bağlantısının yüzeyi kesitlenerek, yüzey altındaki içyapısı yüksek çözünürlükte görüntülenmiştir. Tüm işlemler JEOL marka JIB 4601F MultiBeam model bir FIB-SEM platformunda yürütülmüştür. Diş yapıları elektriksel olarak yalıtılan olduğundan, elektron

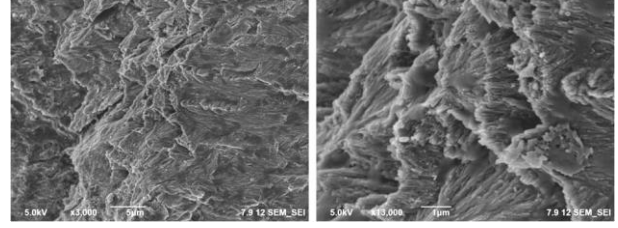
mikroskobu içerisinde yüklenme etkisini azaltmak amacıyla numunelerin yüzeyleri öncelikle sıçratma kaplama tekniği ile 10-20 nm kalınlığında ince altın film ile kaplanmıştır. Daha sonra numuneler çift demet platformu içerisinde alınarak kesitlenecek farklı bölgeler seçilmiştir. Kesitleme sürecinde 30 keV iyon voltajı ve başlangıçta nispeten yüksek iyon akımları eşliğinde (10-60 nA) 20-30 mikron genişliğinde çukurlar açılarak, numunelerde belirli bir hacim derinliğine ulaşılmıştır. Bunu takiben ilgili yan kesitlerde yüksek kalitede görüntü sağlamak için daha düşük iyon akımları (1-5 nA) ile kesit yüzeyleri ince paternler kullanılarak parlatılmış ve bu bölgelerden eşzamanlı olarak ikincil elektron (SE) ve geri saçılmışlı elektron (BSE) görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 2. FIB-SEM çift demet platformlarında yürütülen nano yapılandırma ve nano işleme çalışmaları (Nanostructuring and nanoprocessing work which are carried out in a FIB-SEM dual beam platform)

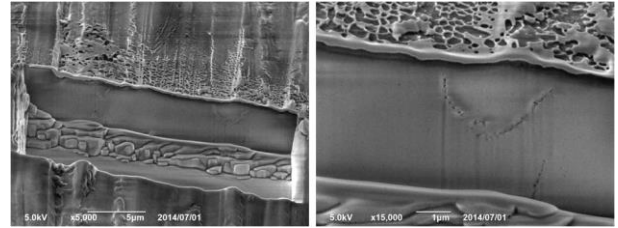
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Diş dokularının farklı tabakalarında yürütülen iyonlarla kesitleme ve SEM görüntüleme süreçleri sonucunda, mine, dentin ve mine-dentin bağ dokusu tabakalarının mikroyapısı incelenmiş olup, her bir bölgeye ait mikron ve nano-boyutlardaki morfolojik farklılıklar tespit edilmiştir. Şekil 3'te kırılmış ve yüzeyine parlatma yapılmamış insan dişinin mine tabakasının yüzey görüntüsü verilmektedir. İkincil elektron görüntülerinde mine dokusunu oluşturan prizma şeklindeki kristaller gösterilmektedir.



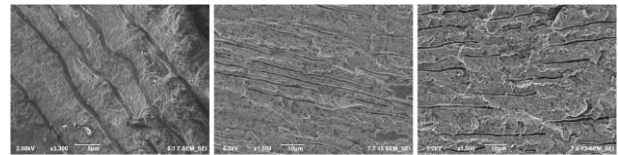
Şekil 3. Malzeme yüzeyinden alınmış mine tabakası ve prizmalara ait SEM ikincil elektron görüntüleri. (SEM-SE images of enamel layer and prisms taken from material surface)

Mekanik olarak kesilmiş ve yüzeyi parlatılmış mine tabasından alınan FIB kesiti ise Şekil 4'te verilmekte olup, mine tabakasının ne kadar yoğun bir iç yapıya sahip olduğu görülmektedir. Kesitte, iç içe sıkı paketlenmiş prizma şeklindeki kristallerin sınır çizgileri de görülmektedir.



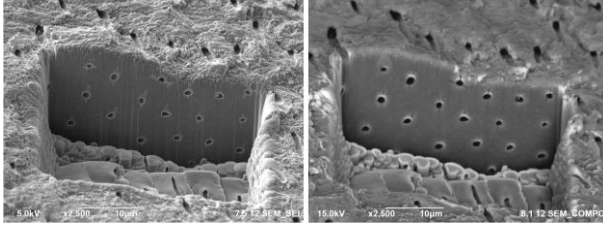
Şekil 4. FIB ile kesilen mine dokusunun iç yapısı. Aynı kesitten farklı büyütme oranlarında SE görüntüleri alınmıştır (The inner structure of enamel layer that is cross-sectioned by FIB. SE images were taken from the same region, but different magnifications)

Diğer bir çalışma ise insan dişinin dentin tabakasında gerçekleştirilmiş olup, dokunun yüzey görüntüsü ve iç yapısı incelenmiştir. Şekil 5'te kırılmış dentin yüzeyinin ikincil elektron görüntüsü verilmektedir. Yüzeyde tübül dentin kanalları görülmekte olup kanalların belirli bir yönelime sahip olduğu anlaşılmaktadır.



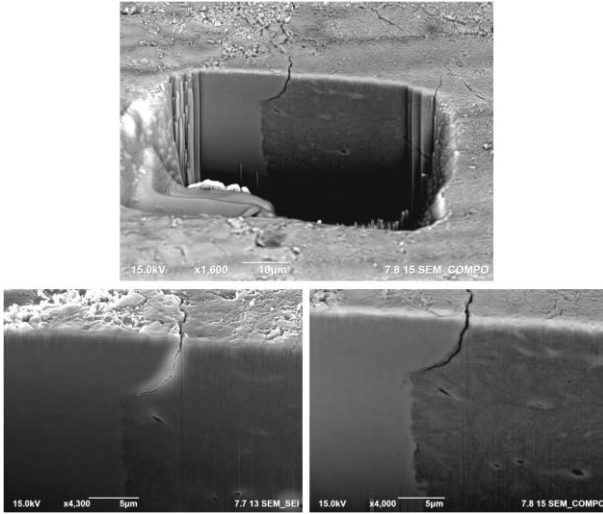
Şekil 5. Malzeme yüzeyinden alınmış dentin tabakası ve tübüllere ait SEM ikincil elektron görüntüleri (SEM-SE images of dentin layer and tubules taken from material surface)

Dentin tabakasından alınan FIB kesitinde (Şekil 6) ise tübüllerin boyutu ve dağılımı açıkça gözlemlenmektedir. Bu çalışmaya göre tübüllerin çaplarının 1 µm civarında ve tübüller arası mesafenin 3-5 µm aralığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Dentin dokusunun iç yapısında bulunan dentin tübüllerinin SE (sol) ve BSE (sağ) görüntüsü. (The distribution of dentinal tubules within the dentin layer: SE image (left) and BSE image (right))

Diğer bir FIB çalışması ise, dentin-mine birleşim bölgesinde yürütülmüş olup ilgili bölgeden FIB kesiti alınmıştır. Bu birleşim bölgesi Şekil 7’de verilmektedir. Görüntülerde, özellikle de geri saçılımlı elektron (BSE) görüntüsünde mine ve dentin arasındaki morfolojik farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Malzeme kontrastı sağlayan BSE görüntüleri genellikle farklı fazlar arasındaki elementel farklılıkları da göz önüne koymaktadır. Buna göre dentin dokusunun, daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve yoğunluk açısından mineye göre daha düşük bir kimyasal kompozisyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Mine-dentin arasındaki bu geçiş bölgesinde dentin tübüllerine yoğun olarak rastlanmamıştır.



Şekil 7. FIB ile kesitlenmiş mine (sol)–dentin (sağ) tabakaları arası bağ dokusu. Üst şekilde mine-dentin birleşim bölgesinin BSE görüntüsü verilmektedir. Alt şekiller birleşim bölgesinin daha yüksek büyütmedeki SE (sol) ve BSE (sağ) görüntüleridir. (The intersection between enamel (left) and dentin (right) layers which was cross-sectioned by FIB. In the upper figure, the BSE image of enamel-dentin transition zone is given. The below figures correspond to SE (left) BSE (right) images of the junction area with higher magnification.)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, FIB-SEM platformlarının sağladığı iyon prosesleri ve elektron görüntülemesi sayesinde dentin ve mine tabakaları gibi farklı özelliklerdeki diş dokularının iç yapılarındaki mikro-/nano-yapısal farklılıkların yüksek hassasiyette tespiti sağlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, insan dişinin farklı tabakalarının hem yüzeyden, hem de FIB ile alınan yan kesitlerden görüntülenmesi ile morfolojik ve kimyasal farklılıklar gösterilmiştir. Çift-demet platformları sayesinde yüzeyin altındaki bölgeler incelenmiş olup, dentin tabakasının tübüllerden, mine tabakasının ise prizmalardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca mine-dentin birleşim bölgesinden alınan kesitte, iki tabaka arasındaki morfolojik ve kimyasal farklılıklar net olarak gösterilmiştir. Böylece FIB-SEM çift demet sistemlerinin diş dokularında çok pratik ve bilgi sağlayıcı sonuçlar sağlayabileceği gösterilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada dental malzemelerin temininde emeği geçen Dt.Dr. Burak Kıtıkı'ye teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Sezen, «Focused Ion Beams (FIB) — Novel Methodologies and Recent Applications for Multidisciplinary Sciences,» %1 içinde *Modern Electron Microscopy in Physical and Life Sciences*, InTech, 2016.
- [2] L. Giannuzzi ve F. Stevie, *Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques, and Practice*, New York: Springer, 2004.
- [3] J. Orloff, M. Utlaut ve L. Swanson, *High Resolution focused ion beams*, New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] A. M. CA Volkert, «Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining,» *MRS Bulletin*, cilt 32, pp. 389-399, 2007.
- [5] S. Kumar, *Textbook of dental anatomy and tooth morphology*, New Delhi: Jaypee Brothers, 2004.
- [6] S. S. Meltem Sezen, «3D Electron Microscopy Investigations of Human Dentin at the Micro/Nano-Scale using Focused Ion Beams based Nanostructuring,» *RSC Advances*, cilt 5, p. 7196 – 7199, 2015.



## **Sismik yansıma ve gravite verilerinden saros körfezi'nin temel yapısının incelenmesi**

Günay Beyhan<sup>1\*</sup>, Ayhan Keskinsezer<sup>2</sup>, Ali Silahtar<sup>3</sup>

*06.10.2016 Geliş/Received, 02.12.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.284225

### **ÖZ**

Saros Körfezi, Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın kuzey kolu üzerinde yer almaktadır. Sismik yansıma verileri, güncel bilgiler ışığında yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışma ile Saros Körfezi'nin batimetrik, stratigrafik ve yapısal açıdan farklı özelliklere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Sismik yansıma sonuçlarına göre Pliyo-Kuvaterner çökellerinin kalınlığı körfezin tabanında yaklaşık 40–250 m. civarındadır. Gravite verilerinin Euler dekonvolüsyonu ile değerlendirilmesi sonucunda elde edilen derinlik değerlerinin de sismik sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu amaçla, alınan gravite verilerine 3 boyutlu Euler dekonvolüsyon tekniği uygulanmış ve temele kadar olan basen derinliği yaklaşık 510 m olarak hesaplanmıştır. Buna göre, Saros Baseni geniş ve derin bir yapıya sahip olup, oluşum mekanizmasını incelediğimizde, ana fayın güney kenarda ve doğrultu atımlı (KAF'nın kuzey kolu), ikincil faylanmanın ise kuzey kenarda ve normal faylardan oluştuğu anlaşılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sismik Yansıma, Gravite, Euler Dekonvolüsyonu, KAF

## **Investigation of Basement Structure from Seismic Reflection and Gravity Data of the Saros Gulf, Turkey**

### **ABSTRACT**

Saros Gulf lies along the north and south blocks of North Anatolian Fault (NAF) respectively. Seismic reflection data is interpreted in the light of current information. As a result of these studies, the Saros Gulf bathymetric, stratigraphical and structural features those were different from the angle. According to the results of seismic reflection Plio-Quaternary sedimentary thickness of the Saros Gulf in the base of approximately 40-250 m. is around. For this purpose, Euler 3D deconvolution technique to the gravity data was applied. Basin depth of up to basic geological approximately 510 m is calculated. Evaluation data as a result of gravity with Euler deconvolution depth values obtained are seen to be compatible with the seismic results. Accordingly, the Saros has a broad in the beam and a deep structure. When we examine the formation mechanism of the Saros Gulf, the main fault line in the south of the border with slip (northern branch of NAF), the secondary fault and normal fault from the north side is understood to occur.

**Keywords:** Seismic Reflection, Gravity, Euler Deconvolution, NAF

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

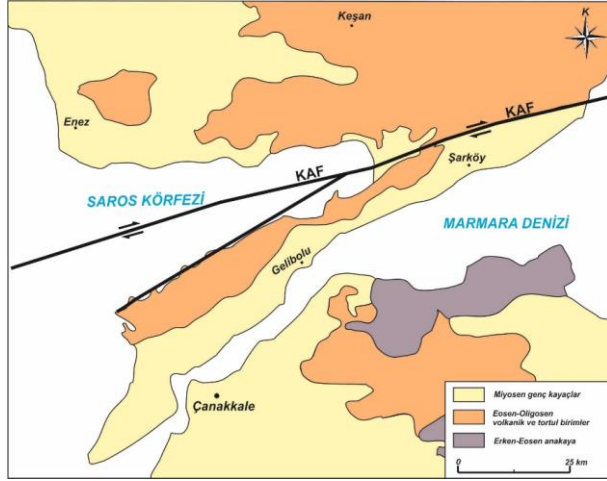
1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Sakarya - gbeyhan@sakarya.edu.tr

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Sakarya - ayhank@sakarya.edu.tr

3 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, Sakarya - asilahtar@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışmada, Saros Körfezi'nin tektonik özelliklerinin incelenmesi amacıyla, TPAO'nun değişik tarihlerde MTA SİSMİK-1 ve R/V EUROPA gemileri ile ölçülen Saros Körfezi'ne ait 9 adet sismik yansıma kesiti, MTA'dan alınan bouguer gravite haritası ve Saros-1 kuyusu verileri kullanılmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji ve tektonik haritası (Geology and tectonic map of the study area).

KAF'nın kuzey kolu üzerinde şekillenen Saros Körfezi Trakya Baseni'nin güneybatı kenarını oluşturmaktadır [1, 2, 3]. Saros Körfezi'nin kuzeyinde Enez yarı grabeni ve Hisarlıdağ-Korudağ yükselimi güneyinde ise, Gelibolu Yarımadası'nın kuzey kenarında bulunan antiklinal kanadı şeklinde bir yapı yer almaktadır. Marmara denizi ile olan bağlantısı ise, aktif Ganos fayı ile ayrılmaktadır [4, 5, 6, 7] (Şekil 1). Saros Körfezi'nde daha önce sismik yansıma verileri kullanılarak yapılan çalışmada, körfezin kuzey şelfinde Pliyosen tortullar görülmediği ve bölgede doğrultu atımlı faylanmaya ait herhangi bir belirtiye rastlanmadığı belirtilmiştir [8].

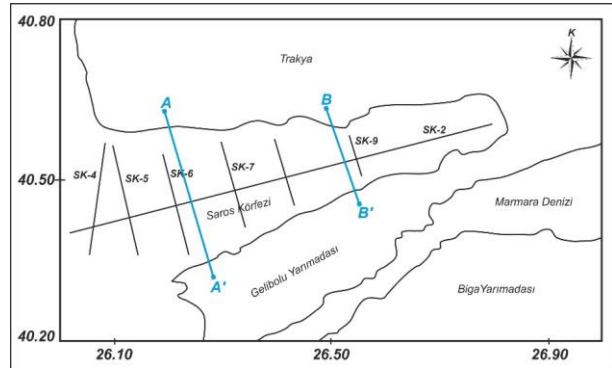
Gelibolu Yarımadası'nın kuzey kenarı boyunca, Eosen-Üst Miyosen yaşlı birimler açıkça izlenebilmektedir. Gelibolu Yarımadası'nın kuzeyinde yer alan çok sayıda bu tabakaların düşey ve devrik konumlu bulunmaları, gerek bu çalışmadaki sismik yorumlar ve gerekse [7, 8, 9, 10, 11] tarafından yapılmış olan çalışmalar göz önüne alındığında, KD-GB yönlü bir faylanmanın sonucunda oluştuğunu düşündürmektedir. Saros Körfezi için basen çökeltileri olarak Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı birimler göz önüne alınmıştır. Basenin kuzey ve güney sınırları boyunca görülen normal fayların temel yapıyı da kestiği izlenmektedir. Temeldeki geniş kıvrımların ise KAF'nın etkisi ile basenin oluşumu öncesinde sıkışmaya bağlı olarak gelişmiş kıvrımlar olduğu düşünülmektedir.

## 2. SAROS KÖRFEZİNİN YAPISAL VE TEKTONİK ÖZELLİKLERİ (Features Structural and Tectonic of Saros Gulf)

Saros Körfezi KAF'nın kuzey kolu üzerinde yer almakta ve Trakya Baseni'nin güneybatı kenarını oluşturmaktadır [1, 2, 3]. Saros Körfezi, Marmara denizinden aktif Ganos fayı ile ayrılmış olup, kuzeyinde Eosen yaşlı kalkalkalen-yüksek potasyumlu volkanitlerden meydana gelmiş Hisarlıdağ-Korudağ yükseltilisi ve Enez Baseni ile çevrilmiştir [4, 5, 6, 12]. Enez Baseni'nin ise Orta Miyosen yaşlı sedimanlardan oluşmaktadır [13]. Saros Körfezi'nin güneyindeki Gelibolu Yarımadası'nın kuzey kenarında körfezi sınırlayan bir yarı antiklinal yer almaktadır. Bu yapı güneye doğru bindirmeli olup Miyosen çökeltilerini etkilemektedir. Söz konusu bu yapının KAF'nın ilk oluşum aşamasında fayın transpresyonal yapısı sonucunda meydana geldiğini ancak Saros Körfezi'ni oluşturduktan sonra pasif rol oynadığı ifade edilmektedir [14].

## 3. SİSMİK KESİTLER İLE GRAVİTE VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ VE YORUMLANMASI (Interpretation and Acquisition of Gravity Data with Seismic Sections)

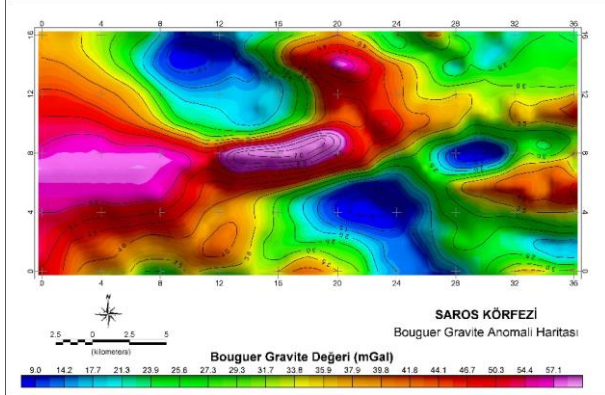
İnceleme alanına ait sismik yansıma profillerinin toplam uzunluğu 255 km'dir. 48 kanallı olarak alınan kayıtlarda atış noktaları arası uzaklık 50 m, istasyonlar arası uzaklık ise 25 m olan profillerin ortalama kayıt uzunlukları 5 sn ve örnekleme aralığı 4 ms olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Saros Körfezi sismik yansıma profilleri haritası (Seismic reflection profiles map of Saros Gulf).

Şekil 2'de ki haritada, Saros Körfezi'ne ait sismik yansıma kesitlerine ait lokasyon haritası görülmektedir. Ayrıca inceleme alanına ait bouguer gravite haritası ise, Şekil 3'de görülmektedir.

## G. Beyhan ve diğ. / Sismik yansıma ve gravite verilerinden saros körfezi'nin temel yapısının incelenmesi

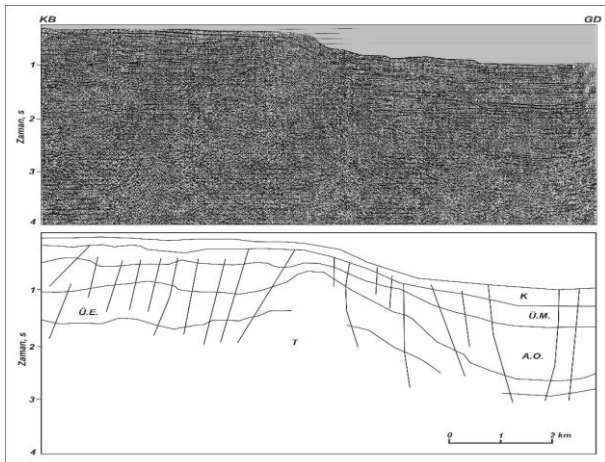


Şekil 3. Saros Körfezi'nin bouguer gravite haritası (MTA) (Bouguer gravite map of Saros Gulf).

### 3.1. Sismik Yansıma Kesitlerinin Yorumlanması (Interpretation of Seismic Reflection Sections)

İnceleme alanına ait 7 adet profilin 1'i körfezin uzanımına paralel, 6'sı ise dik yönlüdür. Bu profillerden SK-9, SK-7 ve SK-6 adlı profillere ait yansıma kesitleri ve yorumları sırasıyla Şekil 4, 5 ve 6' da verilmiştir. KB-GD uzanımlı olan bu sismik yansıma kesitlerinde Saros Baseni'nin tabanının Kuvaterner çökelleri ile örtülü olduğu görülmektedir.

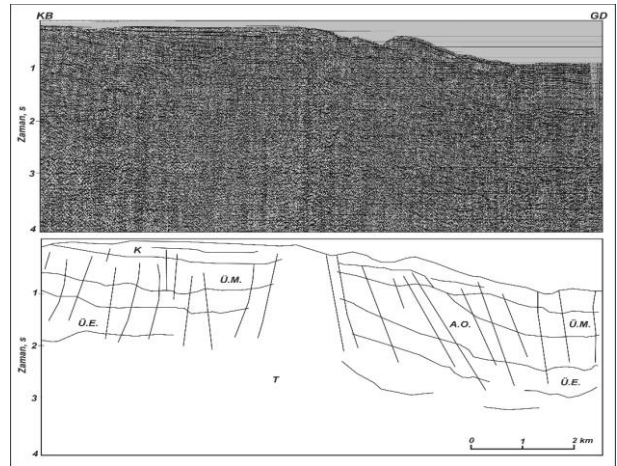
Pliyo-Kuvaterner yaşlı istif kalınlığı, körfezin kuzey şelfi boyunca 40-60 m arasında değişirken, güney çukurluğun iç kısımlarına doğru 200-250 m'yi aşmaktadır. SK-9 nolu sismik yansıma kesitinde en üstte Kuvaterner yaşlı çökeller yer almaktadır. Ancak bu tortullarda faylanmadan kaynaklı deformasyon izlerine rastlanmamaktadır. Söz konusu fayların eğim atımlı normal faylar oldukları ve birbirlerine paralel olarak uzandıkları anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Saros Körfezi'ne ait SK-9 nolu sismik yansıma kesiti (Seismic reflection section numbered SK-9 of Saros Gulf).

Kuvaterner yaşlı sedimanları temel yapıya kadar 3 adet jeolojik formasyon izlemektedir. SK-7 nolu sismik

yansıma kesitinde çöküntü alanının kuzey sınırında küçük bir antiklinal yapı görülmektedir. Temel yapıdan itibaren gelişmiş olan bu yapıda refleksiyon izlerine çok az rastlandığından, bunun volkanik aktivite ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Antiklinalin her iki yanında da izlenen faylar, kanatlar boyunca temele kadar uzanmaktadır. Ayrıca kesitte temel birim ile birlikte toplamda 5 adet jeolojik formasyon ayırt edilmiştir. SK-6 nolu sismik yansıma kesitinde ilk göze çarpan durum SK-7 nolu kesitte görülen antiklinal yapının burada da görülmesidir. Benzer şekilde sismik kesitlerde izlenen faylar da temel birime kadar inmektedir. Temel yapı belirsiz bir şekilde görülmesine rağmen, fayların grabenin orta kesimlerinde Kuvaterner yaşlı tortulları da kestiği net olarak izlenmektedir.



Şekil 5. Saros Körfezi'ne ait SK-7 nolu sismik yansıma kesiti (Seismic reflection section numbered SK-7 of Saros Gulf).

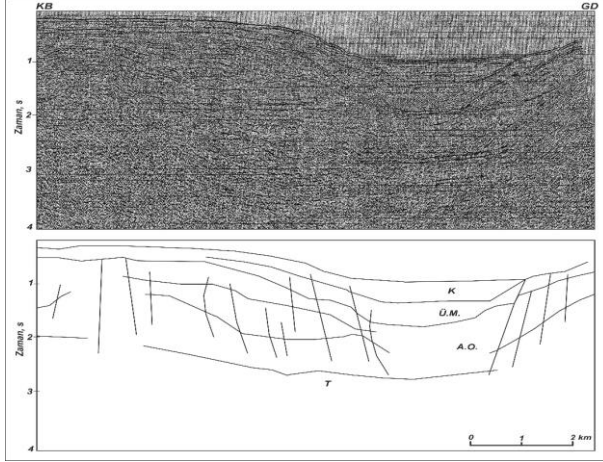
Bunun sonucunda günümüzde de tektonik aktivitenin devam ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca profilin kuzey kenarlarında kıvrımlı yapıların olduğu ve bunların da KAF'nın sıkışmaya bağlı doğrultu atımlı karakterinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır [15].

### 3.2. Gravite Yöntemi ve Euler Dekonvolüsyon (Gravity method and Euler Deconvolution)

Bu çalışmada, Saros Körfezi'ne ait gravite verilerine derinlik çözümleri üreten Euler dekonvolüsyon tekniği uygulanmıştır. Euler dekonvolüsyon yöntemi ilk olarak [16] tarafından manyetik profil verilerine uygulanmıştır. [17] ise, yöntemi geliştirerek gridlenmiş manyetik verilere uygulamışlardır. Euler dekonvolüsyonunun gravite verilerine uygulanmasını ise [18], [19], [20], [21], [22], ve [23] tarafından yapılmıştır. Bu yaklaşımla gravite anomalilere neden olan yeraltı yapısının derinlikleri ve konumları belirlenerek elde edilen derinlikler yardımı ile yeraltı yapısı kolayca modellenabilmektedir.



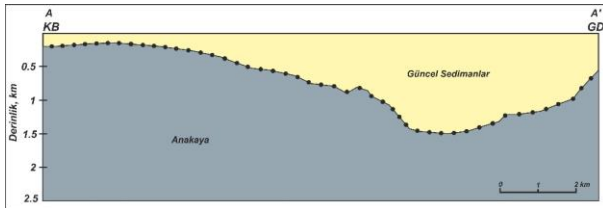
## G. Beyhan ve diğ. / Sismik yansıma ve gravite verilerinden saros körfezi'nin temel yapısının incelenmesi



Şekil 6. Saros Körfezi'ne ait SK-6 nolu sismik yansıma kesiti (Seismic reflection section numbered SK-6 of Saros Gulf).

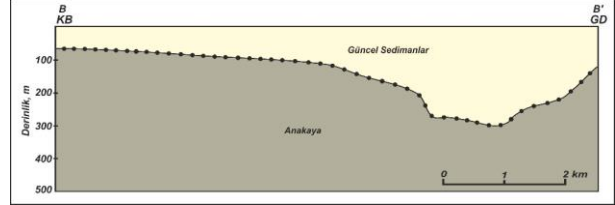
Şekil 3'de bouguer haritası üzerinde görüldüğü üzere A-A' ve B-B' doğrultularında kesitler alınarak, derinlik hesaplamaları yapılmıştır. Kesitler bouguer anomali haritası üzerinde konturların yoğunlaştığı bölgelerden alınmıştır. Ayrıca Bouguer gravite verilerine uygulanan Euler dekonvolüsyonu çözümleri ile elde edilen çizgisellikler Şekil 3'de görülmektedir. A-A' kesiti 1500 m, B-B' kesiti ise 300 m uzunluğundadır.

Saros Körfezi'ne ait gravite verilerinin değerlendirilmesi ile alınan A-A' ve B-B' gravite kesitleri ise, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre, sismik kesitlerin yorumundan, Saros Körfezi'ne ait basen çökellerinin Gelibolu Yarımadası'nı sınırlayan ana faya incelerak son bulunduğu ve bu fayın bu bloğunda temel yapının ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 7. Euler Deconvolution derinlik çözümü ve A-A' kesiti (A-A' Section and Euler Deconvolution depth solution).

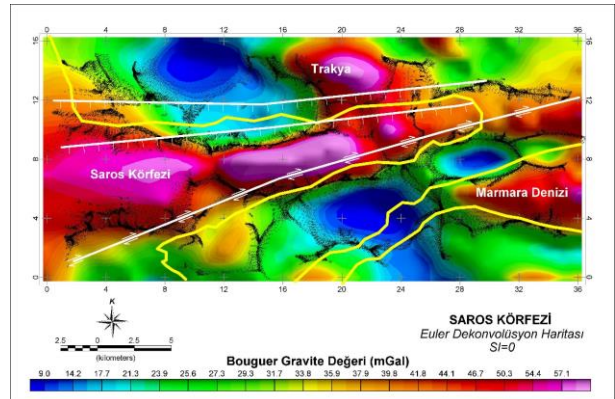
Saros Körfezi için basen çökelleri olarak Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı birimler göz önüne alınmıştır. Basenin her iki sınırı boyunca görülen normal fayların temel yapıyı da kestiği izlenmektedir. Temeldeki geniş kıvrımların ise KAF'nın etkisinde Saros Baseni'nin oluşumu öncesinde sıkışmaya bağlı olarak gelişmiş kıvrımlar olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8. Euler Deconvolution derinlik çözümü ve B-B' kesiti (B-B' Section and Euler Deconvolution depth solution).

### 4. SONUÇLAR (Results)

Saros Körfezi asimetrik iki şelfe sahip olup, basen batıya doğru derinleşmektedir. Dar olan güney şelften Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolu olan Gelibolu segmenti geçmektedir. Sismik, gravite ve Saros-1 kuyusu verileri beraber değerlendirildiğinde, Saros Baseni'nin çökellerinin ( $\approx 40-250$  m) ve yaşının Üst Pliyosen-Kuvaterner yaş aralığında oldukları anlaşılmıştır. Şekil 9'da görüldüğü üzere, Saros Körfezi'nde ana fay, güney kenarda ve doğrultu-atımlı (Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolu), ikincil faylanma ise kuzey kenarda ve normal faylardan oluşmaktadır.



Şekil 9. Saros Körfezi'ne ait sismik yansıma ve gravite sonuçlarından elde edilen tektonik yapı modeli (The tectonic structure model obtained from seismic reflection and gravity results of Saros Gulf).

Gravite verilerinden hesaplanan Euler derinlik çözümleri incelendiğinde, körfezin doğusundan alınan A-A gravite kesitine göre temel derinliğin ortalama 1500 m, B-B kesitine göre 300 m olduğu hesaplanmıştır. Yine sismik kesitlerden Saros Körfezi'nin dolgusunun birbirinden açılma uyumsuzlukla ayrılan Kuvaterner ve Miyosen yaşlı çökel istiflerinden oluştuğu anlaşılmaktadır. Ancak, körfezin kuzey şelfi boyunca Geç Pliyosen yaşlı Enez formasyonu dip tekneye kadar rahatlıkla izlenebilmektedir. Körfez dolgusunun temelini ise Trakya Baseni'nin Eosen-Oligosen yaşlı istifi oluşturmaktadır. Sismik kesitlerden elde edilen bir diğer sonuçta, körfezin kuzey şelfindeki Kuvaterner yaşlı çökellerde faylanmaya rastlanmamış olmasıdır. Saros Körfezi'nin temelini Alt Eosen yaşlı sedimanter tabakalar oluşturmaktadır.

## G. Beyhan ve diğ. / Sismik yansıma ve gravite verilerinden saros körfezi'nin temel yapısının incelenmesi

İnceleme alanının karadaki devamında ise; körfezin kuzeydoğusunda yer alan Kavak köyü ile Gaziköy arasındaki yaklaşık 40 km'lik hat boyunca KAF, sağ yanal doğrultu atımlı geometriye sahiptir. Arazi gözlemlerinde ise drenaj sistemlerinde 3,5 m ile 26 m arasında değişen yanal ötelenmeler, birçok uzamış sırt, çöküntü alanı ve çöküntü gölü gözlenmektedir [24]. Ayrıca Kuzey Anadolu Fayına ait olan Gaziköy-Saros segmenti denizde körfezin kuzey kıyısı boyunca devam ederken karada sıçramalı bir yapı (en-echelon style) sunmaktadır. Buna ek olarak bölgede meydana gelen 1912 depreminin yanısıra [25] tarafından yapılan paleosismolojik çalışmalarda M.S. 484, 824 ve 1343 tarihli depremler tanımlanmıştır. Bu durum fayın hem körfez içinde hem de karada aktif olduğunu kanıtlayan verilerdendir.

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] A.A. Barka, and K. Kadinsky-Cade, 'Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity', *Tectonics*, 3, 663-684, 1988.
- [2] A.A. Barka, 'The North Anatolian Fault zone', *Annales Tectonicae*, 6, 164-195, 1992.
- [3] N. Lyberis, 'Tectonic setting of the North Aegean Trough, in: Dixon J.E., Robertson A.H.F. (Eds.), The geological evolution of Eastern Mediterranean', Geological Society Special Publication vol 17, Geological Society, London, pp. 709-725, 1984.
- [4] N.N. Ambraseys, and C.F. Finkel, 'The Saros-Marmara earthquake', *Eng. Struct. Dyn.*, 15, 189-211, 1987.
- [5] D. Kalafat, 'Son yıllarda oluşmuş bazı depremlerin odak mekanizması açısından irdelenmesi', *Deprem Araştırma Bülteni*, 66, 6-20, 1989.
- [6] J N. Pınar, 'Marmara Denizi Havzasının sismik jeoloji meteorolojisi', İ.Ü. Fen Fakültesi Monografileri, 5, pp.64, 1943..
- [7] C. Yaltrak, 'The tectonic history of the Ganos fault system', *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 8(1), 137-150, 1996.
- [8] S. Saner, 'Sedimentary sequences and tectonic setting of Saros Gulf region NE Aegean Sea, Turkey', *Bull Geol Soc Turkey*, 28, 1-10, 1985.
- [9] M. Önal, 'Gelibolu Yarımadası orta bölümünün sedimanter fasiyesleri ve tektonik evrimi, KB Anadolu, Türkiye', *Jeoloji Müh.*, 29, 37-46, 1986.
- [10] M.N. Çağatay, N. Naci, B. Alpar, R. Saatçılar, R. Akkök, M. Sakınç, H. Yüce, C. Yaltrak and İ. Kuşçu, 'Geological evolution of the Saros, NE Aegean Sea', *Geo-Magazine Letters*, 16, 1998.
- [11] R. Saatçılar, S. Ergintav, E.Demirbağ, S. İnan, 'Active faulting geometry of the Aegean Sea from seismic reflection data', *Marine Geology*, 1999.
- [12] M. Sakınç ve C. Yaltrak, 'Güney Trakya Sahillerin Denizel Pleyistosen Çökelleri ve Paleocografyası', *MTA Dergisi* 119, 43-62, 1997.
- [13] O. Tüysüz, A.A. Barka, E. Yiğitbaş, 'Geology of the Saros Graben and surroundings, Northwestern Turkey (Saros grabeni ve çevresinin jeolojisi, Kuzeybatı Türkiye)'. *Deniz Jeolojisi Ulusal Deniz Araştırmaları Programı, Marmara Denizi Araştırmaları Workshop-III, Genişletilmiş Bildiri Özetleri, Ankara Üniversitesi Fen Fak., Jeoloji Müh. Bölümü*, 14-18, 1997.
- [14] O. Tüysüz, A.A. Barka, E. Yiğitbaş, 'Geology of the Saros graben and its implications for the evolution of the North Anatolian fault in the Ganos-Saros region, northwestern Turkey', *Tectonophysics*, 293, 105-126, 1998.
- [15] G. Beyhan, A. Barka, Ö. Alptekin, 'Tectonics of Saros and Edremit Gulfs (NW Turkey) Using Seismic Reflection Data', *AGU (American Geophysical Union), Fall Meeting. EOS, Volume 80, Number 46, November 16, New York, 1999.*
- [16] D.T. Thompson, 'EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data', *Geophysics*, v 47, 31-37, 1982.
- [17] A.B. Reid, J.M. Allsop, H. Granser, A.J Millett and I.W. Somerton, 'Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution', *Geophysics*, v 55, 80-91, 1990.
- [18] W.A. Wilsher, 'A structural interpretation of the Witwatersrand Basin through the application of automated depth algorithms to both gravity and aeromagnetic data', *Unpubl. M.Sc. dissertation, University of the Witwatersrand, Johannesburg*, 70 p, 1987.
- [19] B. Corner and W.A. Wilsher, 'Structure of the Witwatersrand basin derived from interpretation of the aeromagnetic and gravity data, in Garland, G. D', Ed., *Proceedings of exploration '87, third decennial international conference on geophysical and geochemical exploration for minerals and groundwater, Ontario Geol. Survey, Special Vol. 3, 532-546, 1989.*
- [20] E.E. Klingele, I. Marson and, H.G. Kahle, 'Automatic interpretation of gravity gradiometric data in two dimensions Vertical gradients', *Geophysics Prospection*, 39, 407-434, 1991.
- [21] I. Marson and E. E. Klingele, 'Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3D interpretation', *Geophysics*, 58, 1588-1595, 1993.
- [22] J.D. Fairhead, K. J. Bennet, R. H. Gordon and D. Huang, 'Euler: Beyond the 'Black Box'', 64th Ann. Internat. Mtg', *Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 422-424, 1994.

G. Beyhan ve diğ. / Sismik yansıma ve gravite verilerinden saros körfezi'nin temel yapısının incelenmesi

- [23] D. Huang, D. Gubbins, R.A. Clark, and K.A. Whaler, 'Combined study of Euler's homogeneity equation for gravity and magnetic field', 57th Conf. and Tech. Exhib., Euro. Assoc. *Expl. Geophys*, Extended Abstracts, 144, 1995.
- [24] E. Altunel, A.A. Barka, S. Akyüz, 'Slip Distribution along the 1912 Mürefte-Şarköy Earthquake, North Anatolian Fault, Western Marmara'. The 1999 İzmit and Düzce Earthquakes: preliminary results. 341-349, 2001.
- [25] T. Rockwell, A.A. Barka, K. Thorup and S. Akyüz, 'Paleoseismology of the Gaziköy-Saros segment of the NAF, Northwestern Turkey: implication of regional seismic hazard models of Earthquake recurrence'. International Symposium on recent developments on active fault studies, İTÜ, İstanbul, 1997.



## **Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama**

Mehmet Rıza Adalı<sup>1\*</sup>, Alper Kiraz<sup>2</sup>, Uğur Akyüz<sup>3</sup>, Betül Halk<sup>4</sup>

*08.06.2016 Geliş/Received, 08.12.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.283787

### **ÖZ**

Bugünün dünyasında imalat endüstrileri daha rekabetçi bir ortamda gelişimlerini ve sürekliliklerini maliyetlerini düşürerek devam ettirmek zorundadır. Yalın üretime geçiş sürecinde ilk adım, katma değeri olan ve olmayan faaliyetlerin analiz edilmesidir. Bu çalışma Sakarya’da faaliyet gösteren bir traktör fabrikasında Değer Akış Haritalama (DAH) kavramlarının uygulanmasını amaçlamaktadır. Mevcut durumunun analiz edilmesi yoluyla platform imalatı hattında mevcut israflar, boşa geçen süreler saptanmıştır. Gelecek durum analizi ile israfların önlenmesi yönünde iyileştirmeler yapılarak değer akış süresi 13,08 günden 4,35 güne indirilmiştir. Mevcut ve gelecek durum analizleri yapılarak platform imalat hattının çevrim süresi %8 iyileştirilmiştir. Sonuçlar DAH metodunun bir imalat sürecinin değişikliğine karar verilmesinde iyi bir alternatif olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** yalın üretim, değer akış haritalama, hücreli imalat, traktör endüstrisi

## **Using value stream mapping technique through the lean production transformation process: An implementation in a large-scaled tractor company**

### **ABSTRACT**

Today’s world, manufacturing industries have to continue their development and continuity in more competitive environment via decreasing their costs. As a first step in the lean production process transformation is to analyze the value added activities and non-value adding activities. This study aims at applying the concepts of Value Stream Mapping (VSM) in a large-scaled tractor company in Sakarya. Waste and process time are identified by mapping the current state in the production line of platform. The future state was suggested with improvements for elimination of waste and reduction of lead time, which went from 13,08 to 4,35 days. Analysis are made using current and future states to support the suggested improvements and cycle time of the production line of platform is improved 8%. Results showed that VSM is a good alternative in the decision-making for change in production process.

**Keywords:** lean production, value stream mapping, cellular manufacturing, tractor industry

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya - mradali@sakarya.edu.tr

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya - kiraz@sakarya.edu.tr

3 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya - betul.halk1@ogr.sakarya.edu.tr

4 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya - ugur.akyuz1@ogr.sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yalın üretim, işletmelerin rekabet edebilirliğini artırmak, gereğinden fazla kaynak kullanımını en az seviyede tutmak ve daha verimli üretimi gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiş sistem ve teknikler bütünüdür. Yalın üretimin en temel amacı ürünün tasarım aşamasından sevkiyat aşamasına kadarki tüm süreçlerdeki israfın önüne geçmektir. Yalın üretimin temel stratejisi; kalite, maliyet ve teslimat performanslarında aynı anda iyileşmeyi akış süresini azaltarak sağlamaktır. Değer akışı yalın düşüncenin temel ilkelerinden biri olup, işletme faaliyetleri bu çerçevede planlanmakta ve yürütülmektedir [1]. Değer akışı imalat ve hizmet sektöründe ürüne veya hizmete değer katan ve katmayan tüm faaliyetleri kapsamaktadır. Her bir ürünün hammadde aşamasından nihai ürüne ulaşmasına kadar olan üretim akışını ve ürün geliştirme süreçlerini kapsayan temel akışlar, değer akışı olarak adlandırılır [2].

Günümüzde verimlilik, kalite ve rekabet kavramlarının daha da önem kazandığı göz önünde bulundurulursa, yalın düşünce uygulamalarının hem hizmet hem de imalat işletmelerinde teşvik edilmesi, işletmeler, sanayi bölgeleri ve dolayısıyla da ülkemiz için önemli bir kazanç sağlamasına elde etmesi öngörülmektedir. Ülkemizde otomotiv sektörü üretim içindeki payı ve ekonomik katkı oranı değerlendirildiğinde, imalat sanayii içinde önde gelen sektörler içinde yer almaktadır. İthalat açısından bakıldığında 2004-2014 yılları ortalama rakamlarına göre Türkiye’de toplam pazarın yüzde 30,9, otomobil pazarının ise yüzde 58,9 arttığı gözlemlenmektedir. 2006-2016 yılları arası Ocak-Mayıs dönemi verileri karşılaştırıldığında traktör üretiminin yaklaşık 25 bin ile en yüksek üretim seviyesine ulaştığı görülmektedir [3]. Bu göstergeler, çalışmanın katma değerinin, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren, traktör üretimi yapan bir işletmeye uygulanmasının katma değerinin daha yüksek olacağını düşüncesini sağlamlaştırmıştır. Çalışmanın 2. bölümünde DAH ile ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. 3. bölümünde DAH yöntemi hakkında kısaca bilgi verilerek 4. bölümde çalışmada kullanılan materyal/metot bilgileri sunulmuştur. 5. bölümde traktör imalatı yapan bir firmanın üretim sürecindeki yöntemin uygulamasına yer verilmiş olup son bölümde sonuçları analiz edilerek tartışılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatür incelendiğinde imalat ve hizmet sektöründe DAH tekniğinin çok sayıda uygulamada kullanıldığı görülmektedir. Sullivan ve arkadaşları CNC torna ve freze tezgahlarının yenilenmesi konusunda üretim hattının mevcut durumunu analiz edip, gelecek durumun

tasarlanması için de DAH’nın nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bu sayede yalın üretim uygulamalarında karşılaşılan ekipman yenileme problemine DAH tekniği kullanarak bir yol haritası sunmuşlardır [4]. Haque ve Moore çalışmalarında, yalın düşünce ilkelerinden DAH’ın yeni bir ürünün tasarımından müşteriye teslimatına kadar olan sürecinde nasıl uygulanması gerektiğini aerodinamik fan sistemi tasarımı vaka çalışmasıyla açıklamıştır [5]. Simons ve Zokaei kırmızı et endüstrisinde 5 farklı et türünü kesim odalarında gözlemleyerek, DAH tekniği kullanmış ve ikisi geleneksel üçü gelişmiş olmak üzere beş tip kesme odası tanımlayarak 25% verimlilik açığı olduğunu raporlamıştır [6]. Taylor çalışmasında, yalın değer zincirini geliştiren DAH tekniği ile tarım-gıda sektöründe bir ürünün tarladan tüketiciye ulaşana kadar olan tedarik zinciri ilişkilerini kurup, sürecin performansını ve karlılığını artıran bir model sunmuştur [7]. Seth ve Gupta bir otomotiv endüstrisinin tedarikçisinde mevcut durumdaki takt ve işlem zamanlarını gözlemleyerek DAH tekniğini uygulamış ve işçi başı üretim miktarında artışı, stok miktarları, istasyonlarda çalışması gereken işçi sayısı, akış zamanı ve işlem zamanında ise azalışı sağlamıştır [8]. Özkan ve arkadaşları otomotiv endüstrisinde traktörün sol ve sağ çamurluk kompleleri için DAH tekniği ile üretim akış süresini 203 günden 46 güne indirmişlerdir [9]. Comm ve Mathaisel çalışmalarında üniversitelerde sürdürülebilirliğin başarısının birçok karar verici tarafından tam anlaşılmadığı varsayımından hareketle üniversite vb. eğitim kurumlarında uygulanabilecek DAH önerisinde bulunmuş ve tekniğin hizmet sektöründe de uygulanabilirliğini göstermişlerdir [10]. Andrade vd. DAH tekniğini bir otomotiv firmasında kullanarak hazırlık zamanını 60.5 günden 14.4 güne indirmişlerdir. Mevcut durum ve önerilen durumun Promodel yazılımı ile karşılaştırmalı simülasyonu sonucunda toplam üretim zamanında 7%’lik bir azalma ve çalışma pozisyonunun kullanılmasında 10%’luk bir artış sağlamışlardır [11]. Mahendran vd. otomobiller için valf üreten bir imalat işletmesinin birçok sürecinde akış ve işlem zamanlarını hesaplayarak DAH tekniği ile israfı en aza indirecek bir model sunmuş ve Matlab simülasyonu ile mevcut ve önerilen modellerin sonuçlarını karşılaştırmıştır. DAH ile akış zamanda 61%, kullanılan taban alanında 50.4%, stoklarda 82%, iş gücü kullanımında 66%’lik iyileştirme sağlamışlardır [12].

Tüm bu çalışmalar göstermektedir ki imalat ve hizmet süreçlerinde DAH uygulaması sonucunda çevrim süresi, stoklar, hazırlık zamanları, üretim miktarları, işçi sayıları vb. birçok göstergelerde işletmelerin karlılığına olumlu etki eden sonuçlar elde edilmiştir.

### 3. DEĞER AKIŞ HARİTALAMA (VALUE STREAM MAPPING)

Yalın üretim felsefesine geçişte kullanılan en önemli tekniklerden bir tanesi DAH'dır. DAH sadece imalat sektöründe değil hizmet sektöründe de kullanılabilir. DAH; bir ürünün hammadde olarak işletmeye gelerek belli üretim süreçlerinden geçip nihai ürün olarak müşteriye ulaşmaya kadar gerçekleşen tüm süreçleri içerir.

DAH, bir ürün için malzeme akışlarını ve bilgi akışlarını gösterir. Bu akışlar sayesinde ürüne katma değer sağlayan ya da değer katmayan faaliyetler belirlenerek, israflar ve israfların kaynakları bulunabilir. Mevcut durumda bulunan israfların yok edilmesi/azaltılması için süreçte iyileştirmeler yapılarak gelecek durum haritaları oluşturulur. DAH, belirli periyotlarla tekrarlanarak süreçler daha iyi hale getirilebilir.

DAH tekniği; ürün gamının seçilmesi, mevcut durum haritasının çizilmesi, gelecek durum haritasının oluşturulması ve iş planının oluşturulması/uygulanması olmak üzere 4 ana aşamadan oluşmaktadır [2]. Bu aşamalar şu şekilde sıralanabilir. DAH, analiz edilecek ürün ailesinin seçilmesi ile birlikte başlar. Seçilen ürün ailesi ile ilgili süreç hakkında veriler toplanır ve bu veriler ışığında mevcut durum haritası çizilir. Mevcut durum haritası, süreç ile ilgili değer katan faaliyetleri ve değer katmayan faaliyetleri yani israfları gösterir. Bu bilgiler doğrultusunda gelecek durum haritası tasarlanır. Tasarlanan bu haritadan yola çıkılarak plan ve uygulama aşamasına geçilir. Uygulanan her aksiyon, süreci mevcut duruma çevireceği için DAH çalışması tekrarlanarak yapılmalıdır.

DAH israfları ortadan kaldırmayı amaçlamakla birlikte sağladığı diğer avantajlar şu şekildedir [2]:

- ❖ Üretim süreçlerini bir bütün olarak ele alıp değerlendirme imkanı sağlar.
- ❖ Değer akış içerisinde ortaya çıkan israfların yanında bunların kaynaklarını da belirtir.
- ❖ Süreçler hakkında evrensel bir çözüm dili oluşturulur.
- ❖ Üretim süreçlerini malzeme ve bilgi akışları ile ilişkilendirir.
- ❖ Tüm çalışanların anlayabileceği ortak bir dil olduğu için eksik veya yanlış noktalar tartışılabilir. Böylece uygulamada alınabilecek hatalı kararların/aksiyonların önüne geçilebilir.
- ❖ DAH hammaddeden nihai ürüne kadar tüm süreçleri ele aldığı için, daha iyi süreçlerin tasarlanmasına yardımcı olarak yalın üretim felsefesine geçişte önemli bir adım oluşturur.

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

#### 4.1. Materyal (Material)

Bu çalışmanın materyalini, Sakarya ilinde faaliyet gösteren bir traktör firmasının sahip olduğu ürünler ve üretim süreçleri oluşturmaktadır. Fabrikada sadece traktör montaj işlemleri değil, traktörde kullanılan malzemelerin (platform, çamurluk, diferansiyel, şanzıman, motor vs.) üretimi de yapılmaktadır.

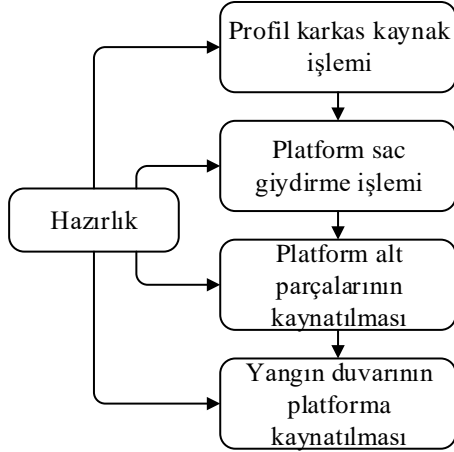
Firma, kaliteden ödün vermeden, müşteri taleplerine daha hızlı, daha iyi ve daha düşük maliyetle cevap verebilmek için yalın üretim projelerine önem vermektedir. Bu bölümde, imalatı yapılan platform ürün ailesine ilişkin DAH ile süreç iyileştirme çalışması sunulmuştur. Firmanın platform ürün ailesinde 5 farklı model bulunmaktadır. Bu modeller, platformun kullanıldığı traktöre göre boyutsal farklılık göstermektedir. Üretim adedi en fazla olan 2060/2080 modeli Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. 2060/2080 platform (2060/2080 platform)

Platform; profil karkas, platform sacı, platform alt parçaları (çamurluk montaj sacı, gaz pedalı braketleri vs.) ve yangın duvarı olmak üzere 4 ana parçadan oluşmaktadır. Platformun imalat sürecinin genel aşamaları Şekil 2'de gösterilmektedir.

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama



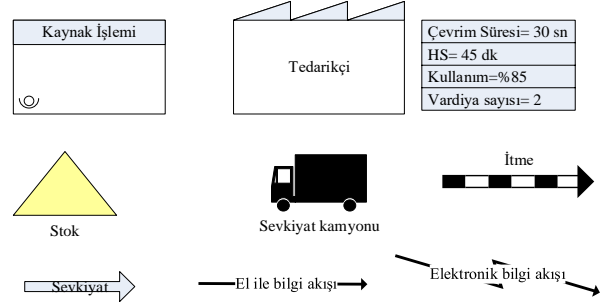
Şekil 2. Platformun imalat süreci (Manufacturing process of platform)

Platform imalat süreci sac parçaların ve profil boruların kesim ve büküm işlemleri ile başlamaktadır. Profil borular kaynak işlemine tabi tutularak perçin işlemi ile birbirine bağlanırlar ve son olarak dikiş kaynağı yapılarak sağlamlaştırılırlar. Sonrasında sac plakalar platform iskeletine önce perçinlenerek sabitlenir. Daha sonra dikiş kaynağı yapılarak sonraki prosesler için hazır hale getirilir. Çamurluk, platform bağlama braketi ile destek alt sacları kaynatılır ve son olarak yangın duvarı platforma kaynatılarak nihai ürün olan platform oluşturulur.

#### 4.2. Metot (Method)

Tesisin mevcut yerleşim planı, yalın üretimin değer yaratmak, değer akışı, sürekli akış, çekme ve mükemmellik ilkeleri doğrultusunda analiz edilmiş ve analizler sonucu çok sayıda israfın olduğu gözlemlenmiştir. Bu israf kaynakları, DAH yöntemiyle tespit edilerek iyileştirme önerileri sunulmuştur. DAH, hem bilgi akışını hem de malzeme akışını gösteren ve bu görsele bakıldığında süreç hakkındaki çevrim süresi, hazırlık süresi (kalıp değişimi ve vardiya/operatör sayısı) bilgilerinin elde edilebileceği bir yöntemdir.

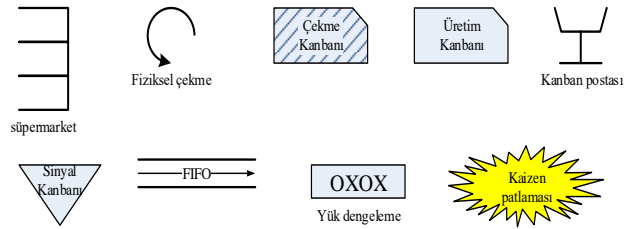
Mevcut durumun haritalandırılmasına son süreçten başlanır ve ilk sürece doğru devam eder. Harita oluşturulurken gerekli olan veriler; çevrim süresi, makine hazırlık/kalıp değişim süresi, üretim parti büyüklüğü, makine kullanım oranı, çalışma süresi ve vardiya/operatör sayısıdır. Mevcut durum haritası çıkarılırken kullanılan standart semboller Şekil 3'te verilmiştir [13].



Şekil 3. Mevcut durum şekilleri (Shapes of current status)

DAH'da mevcut durum çizilirken yukarıda belirtilen semboller yardımıyla ilk olarak müşteri, tedarikçi ve kontrol sembelleri haritaya yerleştirilir. Talepler günlük olarak müşteri veri kutusuna yazılır. Sonrasında sevkiyat ve satın alma bilgileri girilir. İmalat süreçleri çizilerek veri kutularına imalat bilgileri girilir. Net çalışma süresi hesaplanır. Veri akışları çizilerek sipariş sıklıkları belirtilir. Envanter bilgileri girilir. İtme, çekme ve FIFO sistemleri ile işleyen yerler harita üzerinde gösterilir [13].

Oluşturulan haritaya göre gelecek durum tasarlanır ve gelecek durum haritası çizilir. Buradaki amaç; hedeflenen yalın değer akışının belirlenmesidir. Gelecek durum haritasında mevcut durumda kullanılan sembollere ek olarak kullanılan semboller Şekil 4'te verilmiştir [14].



Şekil 4. Gelecek durum haritası şekilleri (Shapes of future status map)

## 5. UYGULAMA (IMPLEMENTATION)

### 5.1. Ürün Ailesi Seçimi (Selection of Product Family)

Traktör firmasında kaynaklı imalat bölümünde oluşan israf ve aksaklıkların montaj hattını olumsuz yönde etkilemesinden dolayı, DAH uygulamasının öncelikli olarak platform imalatı hattında yapılmasına karar verilmiştir. Firma platform ürün ailesinde, kullanıldığı traktöre göre 5 farklı ürün bulunmaktadır. Bu ürünler birbirinden farklı olmasına rağmen aynı süreçlerden geçtiği için tek bir ürün ailesi olarak ele alınmıştır.

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama

**5.2. Mevcut Durum Analizi (Analysis of the Current Status)**

Firma, ayda 20 gün (yılda 240 gün) tek vardiya olarak çalışmaktadır. Mesai saatleri ise 08:00-18:00 arasında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bir iş günü 10 saat olarak belirlenmiştir. Bu çalışma süresinin içerisinde, 40 dakikalık öğle yemeği molası ve 10'ar dakikalık iki adet çay molası yer almaktadır. Buna göre;

Toplam Çalışma Süresi=  
10 saat/gün x 60 dk/saat = 600 dk/gün

Net Çalışma Süresi=  
600 dk/gün – (40 dk/gün + 2 x 10 dk/gün)

Net Çalışma Süresi= 540 dk/gün= 32.400 sn/gün

Firmanın net çalışma süresi hesabından sonra günlük müşteri (montaj hattı) talebi hesaplanmıştır. Bu amaçla firmanın 2015 yılı üretim miktarları ay bazında incelenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Firmanın 2015 yılı için üretim miktarları (Production amount of the company for the year 2015)

Ay	Üretim miktarı (Adet)	Ay	Üretim miktarı (Adet)
Ocak	250	Temmuz	225
Şubat	265	Ağustos	230
Mart	260	Eylül	240
Nisan	250	Ekim	250
Mayıs	240	Kasım	260
Haziran	230	Aralık	260
		Toplam	2960

Firmanın toplam üretim miktarı 2960 adettir, yılda 240 iş günü çalıştığı düşünüldüğünde;

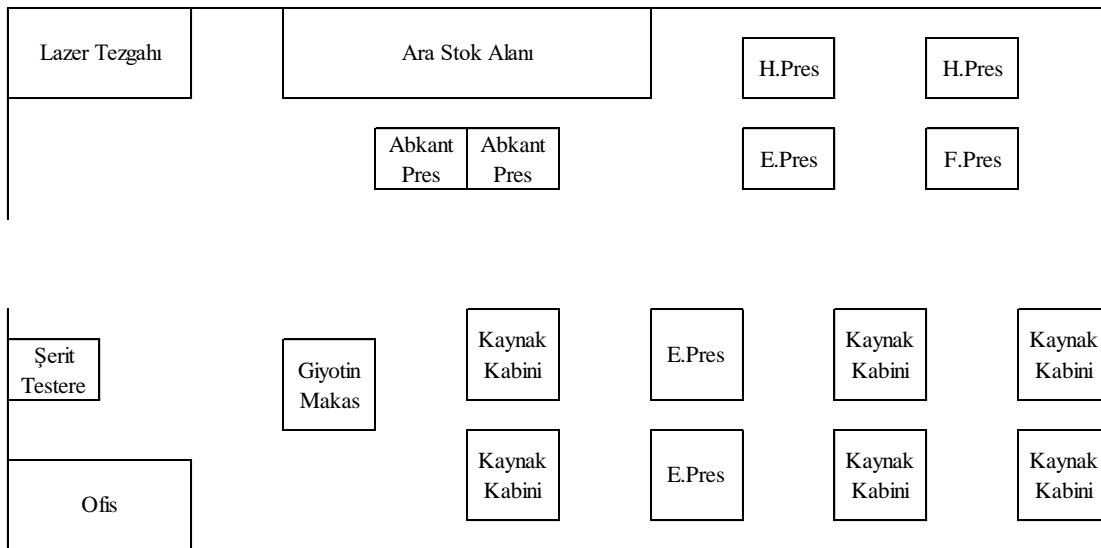
Günlük Talep= 2960/240 = 12,33  $\cong$  13 adet/gün' dür.

Takt Time = Günlük Net Çalışma Süresi / Günlük Talep  
Takt Time = 32.400 / 13 = 2627 sn/adet olarak hesaplanır. Firmanın imalat süreci ile ilgili veriler Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. İmalat süreci verileri (Data of manufacturing process)

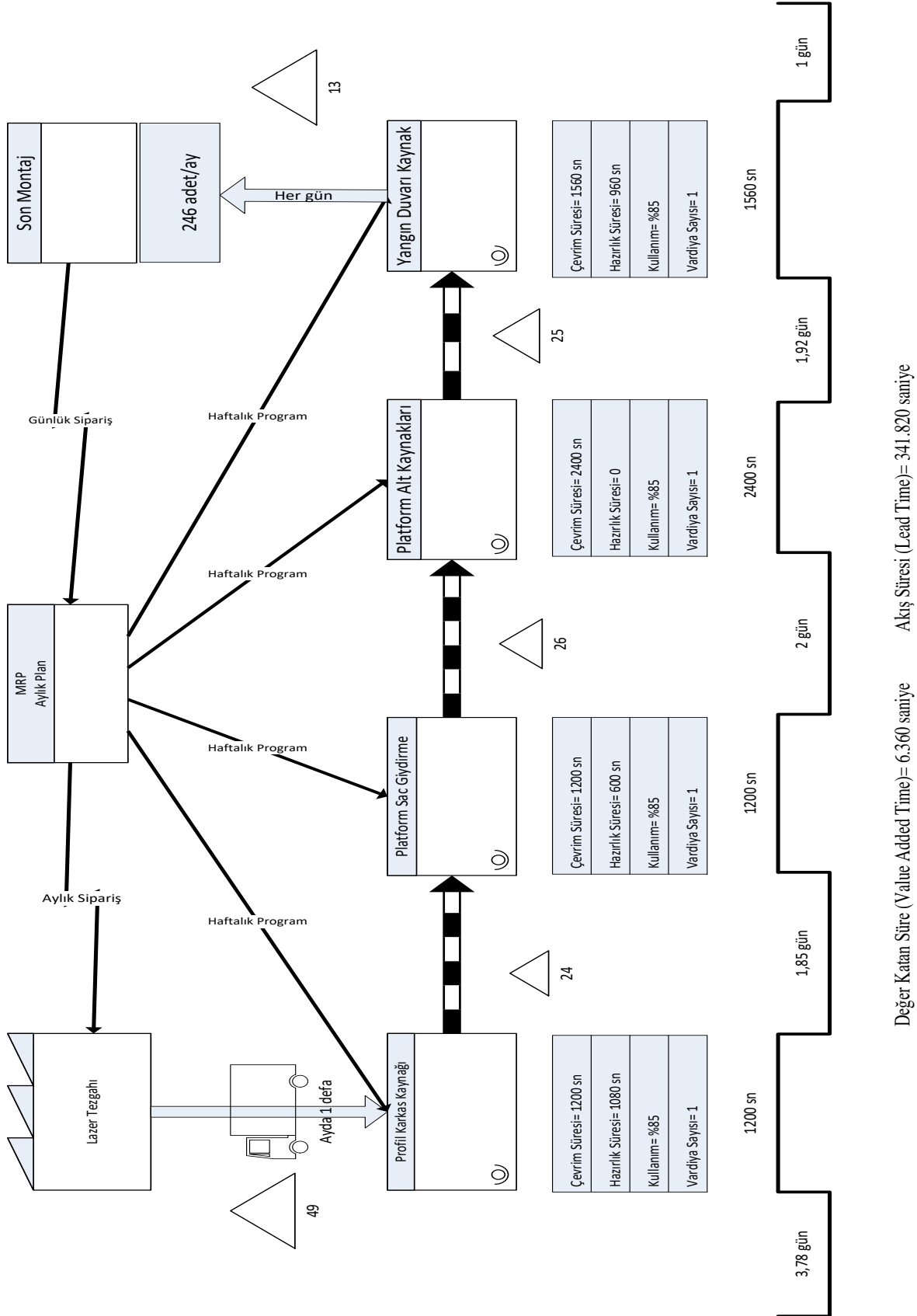
Parametreler	Profil Karkas Kaynağı	Platform Sac Giydirme	Platform Alt Kaynakları	Yangın Duvarının Platforma Kaynatılması
Çalışma Süresi (sn/gün)	32400	32400	32400	32400
Çevrim Zamanı (sn)	1200	1200	2400	1560
Hazırlık Süresi (sn)	1080	600	0	960
Kapasite Kullanımı (%)	85%	85%	85%	85%
Vardiya Sayısı	1	1	1	1

Platform imalatı gerçekleştirilen, kaynaklı imalat bölümünün mevcut yerleşim planı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Mevcut yerleşim planı (Current layout plan)

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama



Şekil 6. Mevcut durum haritası (Current status map)



## M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama

Mevcut yerleşimde kaynak kabinleri arasında bulunan iki adet pres tezgahı, kaynak kabinlerinin iletişimini engellemektedir. Bu konumlama tezgahlar arasındaki taşıma işlemlerinin artmasına sebep olmaktadır ve aynı zamanda güvenlik açısından da tehlike oluşturmaktadır. Firmanın ilerleyen dönemlerdeki hedef ve stratejileri göz önüne bulundurularak, kaynaklı imalat bölümündeki sınırlı kapasitenin ve mevcut yerleşim planındaki taşıma oranlarının DAH çalışmaları ile iyileştirilmesi ve bu alanda verimlilik artışı yapılması amaçlanmıştır.

Mevcut durum haritasını inceleyerek aşağıdaki genel değerlendirmeler sunulmaktadır:

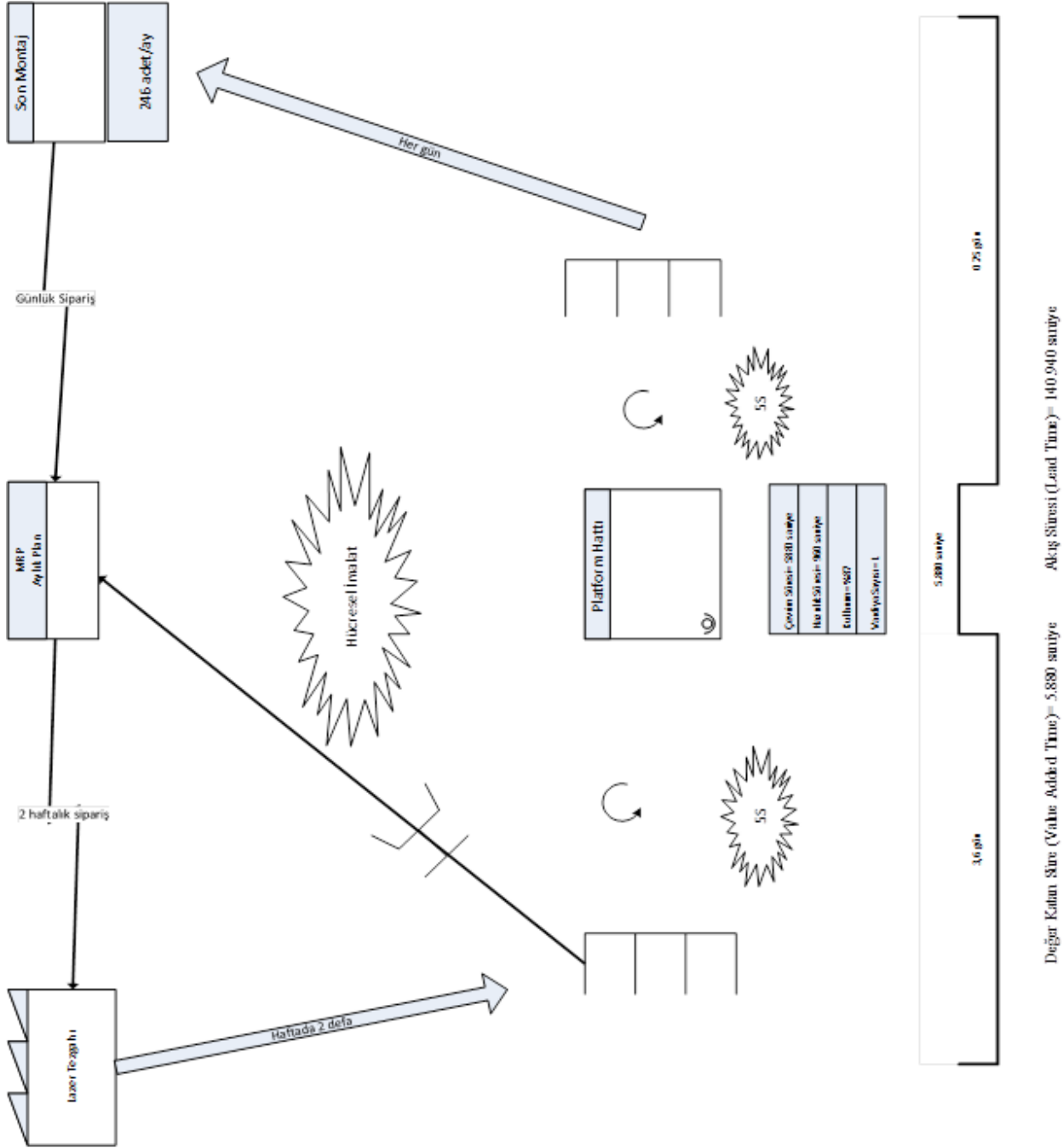
- ❖ Firmanın mevcut yerleşim planına göre süreçler arası mesafelerin çok olması, hem taşıma sürelerinin çok olmasına hem de parça aktarımlarının büyük partiler halinde yapılmasına neden olmaktadır.
- ❖ İmalat süreçleri arasında akışı sağlamak, ara stokların ve beklemlerin azalmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda kaynaklı imalat süreçleri, yeni yerleşimle birlikte bir hücrede gerçekleştirilip tek parça akışı sağlanabilir.

- ❖ Mevcut durumda tedarikçilerden malzeme sevkiyatı aylık olarak yapılmaktadır. Oysaki sac tedarikçisi firmaya yakın lokasyonda yer almaktadır. Bu nedenle malzeme sevkiyat sıklığı düşürülebilir.

### 5.3. Gelecek Durum Analizi (Analysis of the Future Status)

Mevcut durum haritası (Şekil 6) incelendiğinde, firmanın değer akışında ürüne 6.360 saniyelik değer katan faaliyetler bulunmaktadır. Buna ek olarak firmanın toplam değer akışı 423.792 sn (13,08 gün) olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla değer akışının % 98,5'i, ürüne değer katmayan faaliyetlerden oluşmaktadır. Oluşturulacak gelecek durum haritasının amacı, değer katmayan faaliyetleri yani israfları ortadan kaldırmak ya da en aza indirmektir. İsr afları ortadan kaldırılması amaçlı imalat yönteminde değişiklik önermiştir. Platform imalatında, atölye tipi üretim yerine hazırlık zamanlarının azaltılması, üretim sürelerinin, süreç içi envanter seviyelerinin, malzeme aktarma maliyetlerinin, geçiş zamanlarının, ürün maliyetlerinin azaltılması ve verimliliğin sağlanması hedeflenerek hücresel imalat yöntemine geçilmesi önerilmiştir. Bu kapsamda yapılan iyileştirmeler ile tasarlanan gelecek durum haritası Şekil 7'de sunulmaktadır.

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama



Şekil 7. Gelecek durum haritası (Future status map)

Mevcut durum haritasındaki dört ayrı imalat süreci, gelecek durum haritasında; hücresel imalata geçişin etkisi ile tek bir süreç haline gelmiştir. Gelecek durumda haritasında, 5.880 saniyelik ürüne değer katan faaliyetler bulunmaktadır. Toplam değer akışımın ise 140.940 sn (4.35) gün olması beklenmektedir.

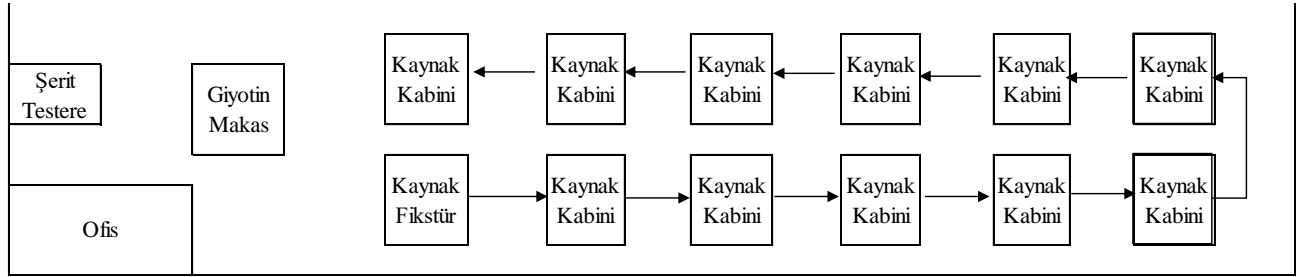
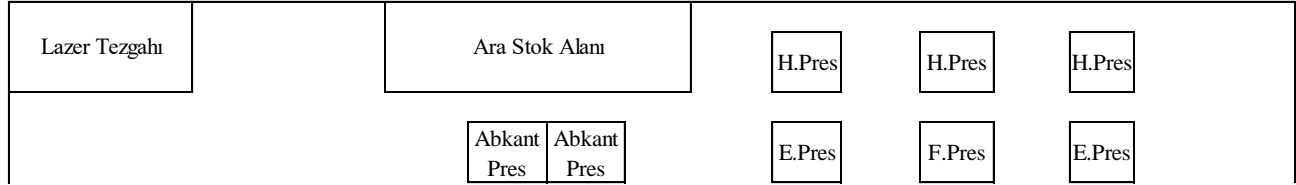
Bu durumda, ürüne değer katmayan faaliyetlerin toplam akış süresine oranı %95,8 olacaktır. Ayrıca toplam akış süresi 13,08 günden 4,35 güne düşmüştür. Bu da akış süresinde % 66,7'lik bir iyileştirme olduğunu göstermektedir.

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama

**5.4. Planlama ve Uygulama (Planning and Implementation)**

Çalışma kapsamında; platform üretiminde atölye tipi üretimden hücresel imalata geçirilmiştir. Aynı zamanda kaynak kabinleri arasında konveyör sistemi kurularak otomasyon sağlanmıştır. Firmanın yeni tesis yerleşimi Şekil 8’de gösterilmiştir.

Tasarlanan yeni yerleşim planında kaynak kabinleri arasında kalan pres tezgahları için atölyedeki diğer pres tezgahları ile birlikte ayrı pres hücresi oluşturulmuştur. Kaynak kabinleri ise modernize edilerek hücresel imalata uygun şekilde yerleştirilmiş ve sayıca artan kaynak kabinleri konveyör sistemi ile birbirine bağlanmıştır. Oluşturulan platform imalat hücresi ile birlikte istasyonlardaki çevrim süreleri Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 8. Yeni yerleşim planı (New layout plan)

Tablo 3. Gelecek durum imalat süreci verileri (Data of manufacturing process of future status)

Parametreler	Profil Karkas Kaynağı	Platform Sac Giydirmeye	Platform Alt Kaynakları	Yangın Duvarının Platforma Kaynatılması
Çalışma Süresi (sn/gün)	32400	32400	32400	32400
Çevrim Zamanı (sn)	1200	1080	2040	1560
Hazırlık Süresi (sn)	360	0	0	600
Kapasite Kullanımı (%)	87%	87%	87%	87%
Vardiya Sayısı	1	1	1	1

**6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)**

Bu çalışmada, traktör sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın sac işleme atölyesindeki platform üretiminde oluşan darboğazın montaj hatlarına olan olumsuz etkisi ele alınmıştır. Değer akış haritalama metodu kullanılarak yapılan iyileştirme projesinde, üretim sürecinin işleyişi, süreç üzerindeki israflar ve israf kaynakları belirlenmeye çalışılmıştır. Mevcut durum analizi yapılarak iyileştirme önerileri sunulmuştur. Tasarlanan süreç iyileştirme projesinde, mevcut DAH’a göre toplam akış süresi 13,08 gün olarak belirlenmiştir. Gelecek durum haritası ile toplam akış süresi 4,35 güne indirilmiştir. Atölyede uygulamaya geçilen bu yerleşim planı ile akış süresinde % 66,7’lik bir iyileştirme sağlanmıştır. Mevcut durumda (atölye tipi üretim) çevrim süresi (değer katan faaliyetler) 6.360 saniye olan platform imalatı, hücresel imalata

geçilerek, % 8’lik bir iyileştirme ile 5.880 saniyeye düşürülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda hesaplanan iyileştirme oranları, literatürdeki sonuçlar ile değerlendirildiğinde ortalamanın üzerinde bir başarı elde edildiği görülmektedir. Bu uygulama, firmanın yalın üretime geçiş sürecinde yaptığı faaliyetlerinden birisidir. Malzeme taşıma maliyetlerinde ve çevrim sürelerinde azalma gözlemlenirken, aynı zamanda süreç stokları da minimize edilmiştir. Oluşturulan haritanın diğer hatlar için de genişletilmesi gelecek çalışmalar için kaynak oluşturacaktır. DAH projeleri periyodik olarak firmanın diğer bölümlerinde de uygulanırsa, imalat süreçlerinden daha iyi performans alınabileceği öngörülmektedir.

M.R. Adalı ve diğ. / Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması:  
Büyük ölçekli bir traktör işletmesinde uygulama

**KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] W. Lin, Y. Qingmin, "Lean Accounting based on Lean Production", International Conference on Management and Service Science, pp. 2, 2009.
- [2] M. Rother, J. Shook, "Learning to See", Version 1.2., The Lean Enterprise Institute Inc, Brookline, Massachusetts, 1998.
- [3] Otomotiv Sanayii Derneği Basın Bülteni, Haziran 2016.
- [4] W. G. Sullivan, T. N. McDonald, E. M. Van Aken, "Equipment Replacement Decisions and Lean Manufacturing", Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 18, pp. 255-265, 2002.
- [5] B. Haque, M. James-Moore, "Applying Lean Thinking to New Product Introduction", Journal of Engineering Design, 15, 1, pp. 1-31., 2004.
- [6] D. Simons, K. Zokaei, "Application of Lean Paradigm in Red Meat Processing", British Food Journal, 107, 4, pp. 192-211, 2005.
- [7] D. H. Taylor, "Value Chain Analysis: An Approach To Supply Chain Improvement In Agri-Food Chains", Inter. Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 35, 10, pp. 744-761, 2005.
- [8] D. Seth, V. Gupta, "Application of Value Stream Mapping for Lean Operations and Cycle Time Reduction: An Indian Case Study", Production Planning and Control, 16, 1, pp. 44- 59, 2005.
- [9] K. Özkan, S. Birgün, P. Kılıçoğulları, "Müşteriden Tedarikçiye Değer Yaratma: Otomotiv Endüstrisinde Değer Akışı Haritalandırma Uygulaması", V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 307-312, 2005.
- [10] C. L. Comm, D. F. X. Mathaisel, "Less Is More: A Framework for a Sustainable University", International Journal of Sustainability in Higher Education, 4, 4, pp. 314-323, 2003.
- [11] P. F. Andrade, V. G. Pereiral, E. G. Del Contel, "Value stream mapping and lean simulation: a case study in automotive company", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 1-9, 2015.
- [12] Mahendran, S., A. Senthil Kumar, R. Jeyapaul, "Lean Manufacturing in a Manufacturing Industry through Value Stream Mapping and Simulation Study", International Journal of Advanced Engineering Technology, 7, 1, pp. 554-558, 2016.
- [13] Ş. Özgürler, "Değer Akışı Haritalandırma ve Conwip Sistemine Yönelik Bir Tasarım", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, s. 105-108, 2007.
- [14] M. Braglia, G. Carmignani F. Zammori, "A New Value Stream Mapping Approach For Complex

Production Systems", International Journal of Production Research, Vol.: 44, pp. 3929-3952, 2006.

## **Kâğıt atıksularından bütünleşik membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre atık minimizasyonu**

Coşkun Aydın<sup>1</sup>, Esra Can Doğan<sup>2</sup>, Berna Kırıl Mert<sup>3</sup>, Ali Oğuzhan Narıcı<sup>4\*</sup>, Elif Durna<sup>5</sup>, Umur Alkan Akbacak<sup>6</sup>

*28.06.2016Geliş/Received,14.12.2016Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.284249

### **ÖZ**

Bu çalışmada, kağıt endüstrisi atıksularının NFgevşek/NFsıkı membran filtrasyonu ile sürekli işletimi sonucu oluşan konsantre akımın, hibrit İleri Oksidasyon (Fenton ve foto-Fenton)/batık UF prosesleri ile arıtılarak minimizasyonu hedeflenmiştir. MPF-36/ESNA membran filtrasyonu ile nihai çıkış suyunda 71 mg/L KOİ ve 19 mg/L TOK değerlerine ulaşılmıştır. Oluşan konsantrenin İOP/batık UF prosesleri ile arıtımında, en iyi performans UVC-batık UF prosesinde elde edilmiştir. UF çıkış suyu TOK ve KOİ değerlerinin, kullanılan ham kağıt atıksuyuna yakın değerlerde olduğu görülmüş ve NFgevşek girişine verilebileceği belirlenmiştir. Bu sayede, membran prosesler kullanılarak su geri kazanımı sağlanırken, membran konsantrelerinde hibrit proses ile minimizasyonu sonucunda konsantre yönetimine önemli katkılar sağlanabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** kağıt atıksuları, fenton ve foto-fenton prosesi, hibrit proses, konsantre yönetimi

## **Water recovery from pulp and paper mill wastewater with integrated membrane system and minimization of concentrated waste**

### **ABSTRACT**

This study aimed to minimize the concentration obtained after the concentrate flow resulting from continuous operation of the NFloose/NFtight membrane filtration is treated through a hybrid Advanced Oxidation (Fenton and photo-Fenton)/submerged UF processes. With the MPF-36/ESNA membrane filtration, 71 mg/L COD and 19 mg/L TOC values were obtained in the final effluent. The treatment of the resultant concentrate current with the IOP/submerged UF hybrid processes, it was observed that UVC-submerged UF process provided the best performance. TOC and COD values in the UF effluent were found to be close to the values of the raw paper wastewater used and it was determined that it could be fed to the NFloose input. Thus, while water recovery is ensured, it was also observed that the minimization of the membrane concentrate through hybrid process will achieve significant contributions to concentrate waste management.

**Keywords:** paper mill wastewater, fenton and photo-fenton process, hybrid process, concentrate management

\* Corresponding Author (Sorumlu Yazar)

<sup>1</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü - aydiner@gtu.edu.tr

<sup>2</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü - esracdogan@gmail.com

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü - bernakiril@gmail.com

<sup>4</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü - alioguzhannarci@gmail.com

<sup>5</sup> Kocaeli Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü - 92elifdurna@gmail.com

<sup>6</sup> Kocaeli Üniversitesi, Çevre Müh. Bölümü - umuralkanumur@gmail.com

## C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünlük membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre atık minimizasyonu

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kâğıt endüstrisinde üretim sırasında kullanılan su miktarı ve oluşan atıksuların özellikleri, üretilen kağıdın tipine ve üretim şekline göre değişmektedir. Ortalama olarak bir ton kâğıt üretimi için 50 ton suya ihtiyaç duyulmakta ve özellikle kâğıt hamuru üretimi sırasında yüksek miktarda ve kirlilik yükünde atıksular oluşmaktadır [1]. Bu endüstrinin ana ham maddesi olan odunun hamur haline getirilmesi sırasında, susuzlaştırma, eleme ve yıkama işlemleriyle lignin, karbonhidrat ve çeşitli tipte ayrıştırıcılar atıksuya geçmekte ve bu bileşikler biyolojik ayrışabilirliği düşük bileşikler olarak nitelendirilmektedir [2]. Kâğıt üretiminin farklı aşamalarında çıkan atıklarda 250' den fazla kimyasal madde tespit edilmiştir [3]. Kâğıt üretimi sırasında kullanılan su miktarının yüksek olması ve atıksuların biyolojik olarak ayrışamayan kirleticiler içermesi, bu endüstrilerinin atıksularını çevresel yönden önemli bir problem haline getirmiştir. Ayrıca, kâğıt hamuru ve kâğıt fabrikalarında oluşan atıksular son derece zehirlilik özelliği taşımaktadır [2].

Kâğıt hamuru ve kâğıt işleme sanayi atıksularının arıtımı için genellikle havalandırılmalı lagünler ve aktif çamur sistemleri gibi biyolojik arıtma teknolojiler uygulanmaktadır. Fakat bu tür biyolojik yöntemler ile özellikle lignin ve türevleri gibi yüksek stabiliteye sahip bileşikler tam olarak parçalanamamakta ve ayrıca yeterli renk kaybı sağlanamamaktadır [4]. Kâğıt endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılan biyolojik yöntemler aynı zamanda aerobik süreç için gerekli olan geniş alan gereksinimleri, mikroorganizmalar için gerekli pH ve sıcaklık ayarı ile nütrient gereksinimlerinin sıkı kontrol gerektirmesi gibi nedenlerden dolayı tercih edilmemektedir [5]. Bu nedenle son zamanlarda bu atıksuların arıtımında çeşitli kimyasal arıtım yöntemleri, adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri (İOP), elektrokimyasal arıtım yöntemleri ve membran teknolojileri gibi alternatif üçüncül arıtım teknolojileri tek veya kademeli bir şekilde kullanılmaya başlanmış, bu sayede hem çıkış suyu standartlarına uygun arıtılmış su eldesi sağlanırken, hem de suyun geri kazanılması ile aşırı temiz su kullanımının önüne geçilmiştir [6,7]. Ters osmoz ve nanofiltrasyon gibi membran prosesleri kağıt imalat işleminde oluşan atıksuların arıtımında tuz ve organik gideriminde kullanılabilir yöntemlerdir [8]. Maliyet ve membran tıkanması göz önüne alındığında, nanofiltrasyon proseslerinin ters osmoz proseslere göre daha tercih edilebilir olduğu literatürden bilinmektedir [9].

Basınç sürücülü membran proseslerin (MF, UF, NF ya da TO) su ve atıksu arıtımında ardışık seri proses kombinasyonları şeklinde kullanımları, uygulanan bütünlük membran arıtma sisteminin rölâtif olarak

düşük su geri kazanım oranlarında işletimleri ile mümkün olmaktadır. Bunun neticesinde de, yüksek hacim ve kirletici içeriğinde ve zorunlu olarak bertaraf edilmesi gereken membran konsantreleri açığa çıkmaktadır. Uygulamalarda karşılaşılan bu durum, saha ölçeğindeki atıksulardan su ve ürün kazanımı odaklı membran proses uygulamalarında, membran kirlenmesi olayları ile birlikte konsantre atık yönetimi süreçlerinin başlıca teknik ve ekonomik kısıtlayıcı faktör olarak öne çıkmasını beraberinde getirmektedir [10,11]. Son yıllarda ileri osmoz ve membran distilasyon gibi yenilikçi proseslerle daha fazla konsantre etmeye dayalı hacim azaltımı uygulamaları yeni gelişen uygulamalar arasında yer almaktadır [11]. Artan bertaraf maliyetleri varlığının ve buna bağlı toplam tesis işletim maliyeti artışlarının dikkate değer seviyelere ulaştığı da ayrıca ifade edilmektedir [12,13]. Yoğun su tüketilen endüstrilerde basınç sürücülü membran proseslerle yüksek miktarlarda ve iyi kalitede su geri kazanımı ve asgari konsantre hacmi üretimine dayalı araştırma ve geliştirme çalışmalarının, sıfır sıvı deşarjı yaklaşımının pratikte etkin olarak uygulanabilmesi ve yaygınlaştırılmasına hizmet edecek yenilikçi bir su yönetim yaklaşımını ortaya çıkaracağı kanaatine ulaşılmaktadır. Ancak bu yaklaşımın oluşturulabilmesi için, membran proseslere ilave bir konsantre yönetimine ihtiyaç duyulacağı açıkça görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, su geri kazanım etkinlikleri literatürden bilinen, NFgeveşek/NFsıkı membran konfigürasyonu ile yürütülen sürekli denemelerde %80 oranında su geri kazanımı amaçlanarak, oluşan membran konsantrelerinin yenilikçi tezgâh-üstü İOP/batık UF hibrit prosesi ile optimum işletme şartlarında oksidasyonu gerçekleştirilerek, membran konsantre yükünün azaltılması ve bu sayede arıtma maliyetinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Oluşan membran konsantrelerinin bertarafı maliyetli olduğundan, konsantrenin bertarafı yerine minimize edilmesi ile konsantre yükünün azaltılması çok daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

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

#### 2.1. Kağıt Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu ve Analitik Yöntemler (Characterization of Pulp and Paper Mill Industry Wastewater and Analytical Methods)

Kesikli ve sürekli işletim şartlarında yürütülen deneylerde kullanılan atıksu, Kocaeli İli'nde yoğun su tüketimi olan, hammadde olarak atık kağıt kullanan, 2014 yılı itibari ile 240 bin ton/yıl üretim kapasitesine sahip bir kâğıt fabrikasının ön çöktürme çıkışından temin edilmiştir. Atıksu fabrikadan farklı zaman aralıklarında (5 kez) temin edilmiş olup, atıksuların değişen üretim



## C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünleşik membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantré atık minimizasyonu

kapasitesine bağılı olarak su kalite parametre değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları Tablo 1' de verilmiştir. Kesikli deneysel çalışma sonuçları; pH, iletkenlik, toplam çözünmüş katılar (TK), toplam organik karbon (TOK), renk, klorür ve sülfat olmak üzere 7 su kalite parametresi üzerinden izlenmiştir. Tüm deneyler Standart Metod' lara [14] uygun olarak yapılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan kağıt endüstrisi atıksularının karakterizasyonu (Characterization of pulp and paper mill wastewaters used)

Parametre	Birim	Yöntem	Ortalama	Standart Sapma
pH	-	Multiparametre yöntemi ile Hach	6.76	0.13
İletkenlik	$\mu\text{S}/\text{cm}$	HQ440d cihazı	1995	162.5
TK	mg/L	5220 D: Kapalı reflux kalorimetrik yöntemi	1006	84.7
KOİ	mg/L	Yüksek sıcaklıkta (750 °C) katalitik yakma yöntemi	1520	309.6
TOK	mg/L	5910 B: UV Absorbsiyon yöntemi	519	151.8
AOX	mg/L	HACH Lange DR5000 spektrofotometre ile Dr Lange küvet testleri	2.9	0.38
Renk (ort)	Abs		1.1	0.086
$\lambda:436-525-620\text{ nm}$				
Sülfat	mg/L		483	86.1
Klorür	mg/L		86	11.5
Demir 2+	mg/L		0.66	0.13
Demir 3+	mg/L		0.16	0.07
Fenol	mg/L		4.18	0.81

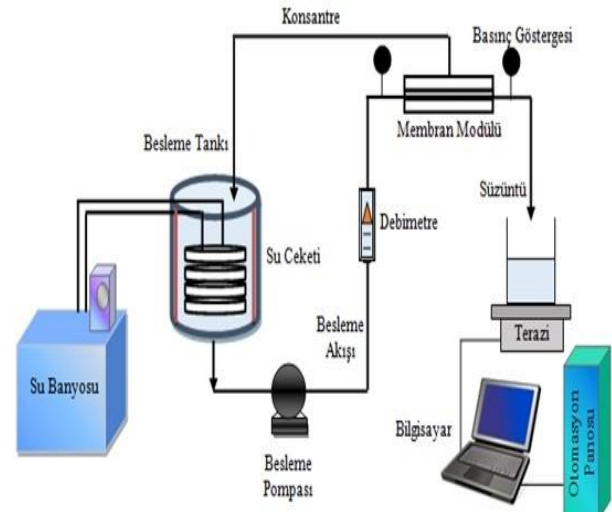
### 2.2. Çapraz Akış Membran Filtrasyon ve İOP/Batık UF Hibrit Sistemi (Cross Flow Membrane Filtration and AOP/submerged UF Hybrid System)

Su geri kazanım etkinlikleri literatürden bilinen NFgevssek/NFsıkı membran konfigürasyonu [6] kullanılarak, hedeflenen %80' lik su geri kazanım oranında yürütölen sürekli denemelerde Şekil 1' de gösterilen yüksek basınç membran filtrasyon sistemi kullanılmıştır [15]. Oluşan NFgevssek ve NFsıkı membran konsantreleri çeşitli oranlarda karıştırılarak Şekil 2' de verilen yenilikçi tezgâh-üstü İOP/batık UF hibrit reaktörü ile oksidasyona tabi tutulmuştur.

Deneysel çalışmalarda konsantré üretimi için yüksek basınçlı ve çapraz akışlı membran filtrasyon sistemi kullanılmıştır. Aktif membran alanı 80 cm<sup>2</sup> olan sistemin paslanmaz çelikten yapılmış olan numune tankı hacmi 25 L' dir. Sistem su banyosu aracılığı ile 10-60 °C aralığındaki sıcaklıklarda işledebilmektedir. Otomasyona sahip olan sistem 0-60 bar arası basınç ve 100-750 L/sa akış hızlarında bilgisayar üzerinden kontrollü olarak çalıştırılabilmektedir. Deneysel numunesininin sıcaklık, iletkenlik değerleri sistem üzerinden anlık görüntölenmektedir. Su akışının belirlenmesi amacıyla sistem, membrandan geçen su hacmini ölçen bir terazi ile donatılmış; bu sayede, bilgisayar ve otomasyona bağılı yazılım üzerinden

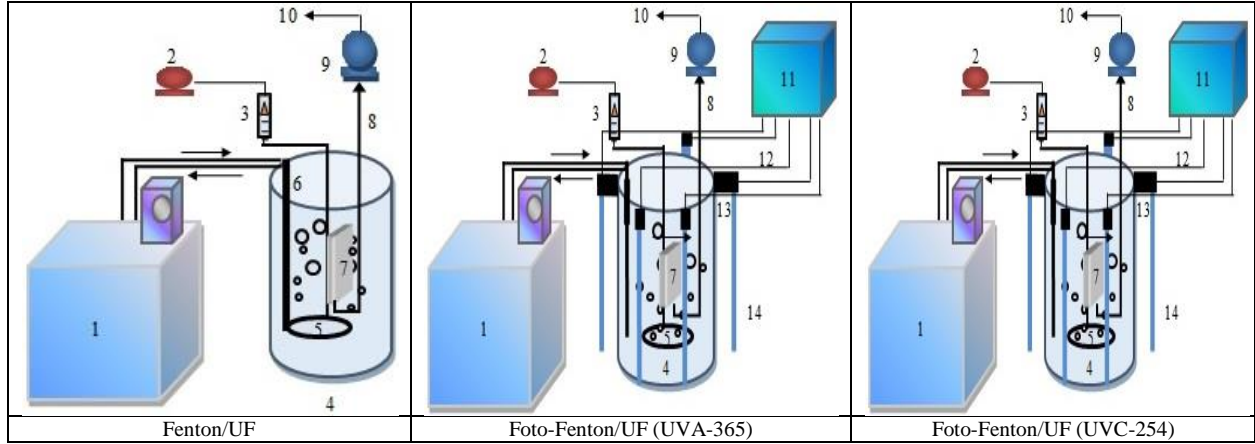
membranın su akışı ölçölerek veriler on-line olarak bilgisayara kaydedilerek izlenmiştir. 3 litre kapasiteli borosilikat camdan üretilmiş tezgâhüstü İOP/batık UF hibrit reaktörü ile konsantré arıtımı sırasında deneylerin farklı sıcaklıklarda yürütölebilmesi için su banyosu bağlantısı yapılmıştır. Reaktör ile birlikte kullanılan bütün metal parçalar paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Foto-Fenton prosesinde, UVC-254 ve UVA-365 olmak üzere iki ayrı lamba türü kullanılmıştır. Reaktör, içerisine monte edilip sökülüp takılabılır kuvars cam korumalı 4 adet 10 Watt (toplam 40 Watt) UVC-254 lamba sistemi ile simetrik yerleşimde donatılmış olup, her bir UVC lamba, harici bir enerji kaynağı kullanılarak ayrı ayrı devreye alınabilmektedir. Reaktör haznesi dışarıdan monte edilip sökülüp takılabılır, toplamda 8 Watt'lık (toplam 40 Watt) floresan ışık düzenekli 5 adet UVA-365 lambalar ile donatılmıştır.

Batık membran filtrasyon sistemi 39.4 cm<sup>2</sup> (dikdörtgen ebatlı, 14.6 cm x 2.7 cm) aktif membran alanına sahip olup batık membran modüle yerleştirilmiştir. Membran modül Delrin® malzemeden imal edilmiş olup, reaktör haznesi içerisine monte edilip, sökülüp takılabılır ve yüzeyde hava sıyırma amacıyla istenen açıda eğimlendirilebilir şekilde imal edilmiştir. Membranın modül içerisinde sabitlenmesi, çalışma sırasında sızdırmazlık sağlamak amacı ile paslanmaz elik malzemeden yapılmış modül üst bağlantı elemanı ile sağlanmıştır. Batık membran filtrasyon sistemi, su akışının belirlenmesi amacıyla peristaltik pompa yardımı ile membrandan geçen su hacmini ölçen bir terazi ile donatılmış; bu sayede, bilgisayar ve otomasyona bağılı yazılım üzerinden membranın su akışı ölçölerek veriler on-line olarak izlenerek kaydedilmiştir. İOP/batık UF hibrit reaktörü, farklı sıcaklık, havalandırma hızı, UF membranlardan su çekim hızı, ışık şiddeti ve ışık türünde işledebilir niteliktedir.



Şekil 1. Çapraz akış membran sistemi [15] (Schematic representations of cross flow membrane system)

## C. Aydıner ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünleşik membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre atık minimizasyonu



Şekil 2. İleri oksidasyon prosesi/batık ultrafiltrasyon (İOP/UF) hibrit reaktörü (Advanced oxidation process/submerged ultrafiltration (AOP/UF) hybrid reaktör) (1-su banyosu, 2-hava pompası, 3-debi metre, 4-İOP/UF hibrit reaktörü, 5-difüzör, 6-online sıcaklık ölçer, 7-batık UF membran, 8-UF süzüntü hattı, 9-peristaltik pompa, 10-UF süzüntüsü, 11-güç paneli, 12- elektrik hattı, 13-lamba bağlantısı, 14-UVA lambası, 15-kuarz camla kaplı UVC lambası)

### 2.3. Membranlar (Membranes)

Bu çalışmada UF (UH050 ve UP020), NFgevşek (MPF-36) ve NFsıkı (ESNA) membranları kullanılmıştır. Membranların özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan membranların genel özellikleri

Membran Türü	Üretici Firma	Materyal	MWC O Dalton	pH	Geçirgenlik L/m <sup>2</sup> sa bar (25 °C)	Max. Sıcaklık (°C)
UH050	Microdyn®Nadir	Hidrofilik Polieter sülfon	50000	0-14	>250	95
UP020	Microdyn®Nadir	Hidrofilik Polieter sülfon	20000	0-14	> 200	95
ESNA	Hydranautics	Kompozit poliamid	250	3-10	4.38	45
MPF-36	KOCH	-	1000	1-13	6.65	60 (25 bar)

Kaynaklar; [4, 16, 17,18,19,20, 21, 22]

### 2.4. Teknik Performans (Technical Performance)

Besleme akımını konsantre etme şartlarında gerçekleştirilen kesikli deneysel çalışmalarda, NFgevşek ve NFsıkı deneyleri için “süzüntü akıları” Eşitlik 1’ e göre hesaplanmıştır;

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; J-süzüntü akısı (L/m<sup>2</sup>.sa); A-etkili membran alanı (m<sup>2</sup>); V-toplam süzüntü hacmi (m<sup>3</sup>) ve t-filtrasyon süresini belirtmektedir.

Kesikli deneylerde “kirletici madde giderme performansları”, membran süzüntü akımından alınan kompozit numunelerde yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. Proseslerde membranların kirletici ayırma veya giderme verimleri, her bir parametre için Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_s}{C_k}\right) \times 100 \quad (2)$$

Bu eşitlikte, R-kirletici madde giderim performansını (%); C<sub>s</sub>-konsantre modunda süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonu (mg/L); C<sub>k</sub>-konsantre akımlarındaki kirletici madde konsantrasyonu (mg/L) vermektedir [15].

### 2.5. Optimum İşletme Şartları (Optimum Operating Conditions)

Basınçlı sistemde MPF-36/ESNA membran konfigürasyonu ile %80’lik su geri kazanımı dahilinde gerçekleştirilen deneylerde, Gönder ve diğ. [6] tarafından belirlenen pH (10), sıcaklık (25 °C) ve basınç (sırasıyla 12 ve 20 bar) değerlerinde ve ayrıca 600 L/sa’ lik karıştırma hızıyla sürekli şartlarda çapraz akış uygulanmıştır. Elde edilen NFgevşek ve NFsıkı konsantreleri belirlenen oranlarda karıştırılarak, Tablo 3’ deki optimum işletme şartlarında, sırasıyla Fenton, foto-Fenton (UVA-365) ve foto-Fenton (UVC-254) ile oksidasyona tabi tutulmuştur. Optimum oksidasyon süreleri (56, 42 ve 60 dak) sonunda, UF membran modülü reaktörün içerisine daldırılarak, deneyler ardışık olarak yürütülmüştür.

## C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünlük membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantré atık minimizasyonu

Tablo 3. Fenton ve foto-Fenton prosesleri için optimum işletme şartları [23] (Optimum operating conditions for Fenton and photo Fenton processes)

Parametre	Açıklama	Birim	Fenton Prosesi	Foto-Fenton Prosesi (UVA-365)	Foto-Fenton Prosesi (UVC-254)
$t$	Zaman	dk	56	42	60
$T$	Sıcaklık	°C	39.1	30.7	40.0
pH	pH	-	3.9	3.0	5.0
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TOK	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TOK oranı	g/g	6.0	9.4	6.0
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup> oranı	g/g	6.0	6.0	7.0
$v_1$	İOP reaktörü havalandırma hızı	L/dak	2.5	3.0	2.0
$I_ş$	Işık şiddeti	adet	-	3 lamba	4 lamba
$I_T$	Işık türü	-	-	UVA-365	UVC-254
-	Membran türü	-	UH050	UP020	UH050

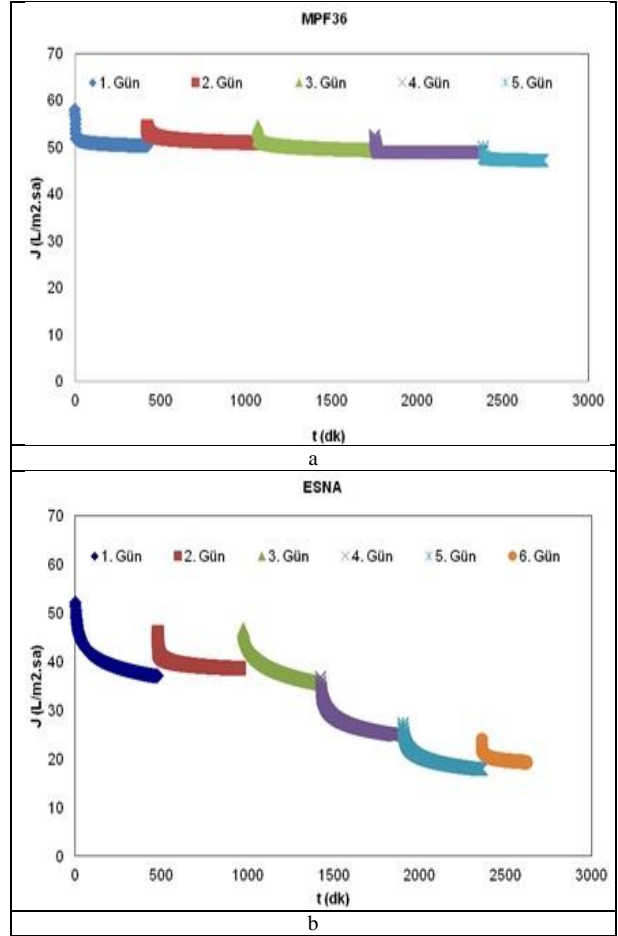
### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

İki aşamadan oluşan bu çalışmanın birinci aşamasında, kâğıt endüstrisinin ön çökeltim çıkışından temin edilen atıksu literatürde etkinliği bilinen çift kademeli NFgevşek/NFsıkı [6] membran ile uzun süreli filtrasyona tabi tutularak su geri kazanımı sağlanmıştır. İkinci aşamada ise, MPF-36/ESNA membran konfigürasyonu [24] ile arıtım sonrasında oluşan konsantré akımların, karıştırıldıktan sonra UVC-254 ve UVA-365 lambalarla donatılan İOP/batık UF hibrit prosesi ile arıtılarak en uygun teknoloji tespiti yapılarak, konsantrénin minimizasyonu ve oluşan atık bertaraf maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir.

#### 3.1. Uzun Süreli NFgevşek/NFsıkı Membran Deneyle (Experiments of Long-term NFloose/NFtight Membrane)

Atıksu için uygun membran konfigürasyonu olan çift kademeli MPF-36/ESNA membranlar ile pH (10), sıcaklık (25 °C) ve basınç (sırasıyla 12 ve 20 bar) değerlerinde olmak üzere 600 L/sa' lik karıştırma hızıyla sürekli şartlarda deneyler yürütülmüştür. Toplamda 7.5 L konsantré karışımı elde edilecek şekilde sırayla gevşek MPF-36 membran ile 5 gün, elde edilen süzütü suyu besleme suyu olarak kullanılarak sıkı ESNA membranı ile 6 gün filtrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. NFgevşek ve NFsıkı membranların zamana karşı elde edilen akı değerleri Şekil 3' de verilmiş olup, toplamda MPF-36 membran ile 49 L/m<sup>2</sup>.sa süzütü akısında 4.16 L, ESNA membran ile 22 L/m<sup>2</sup>.sa süzütü akısında 3.34 L konsantré elde edilmiştir. Çift kademeli membran konfigürasyonlarında oluşan konsantré karışımı 2.5 L kapasiteli tezgah üstü hibrit İOP/batık UF reaktöründe Fenton, foto-Fenton (UVA-365 ve UVC-254) olmak üzere 3 ayrı oksidasyon prosesi ile arıtılmıştır. Sürekli

işletimli çapraz akışlı membran filtrasyon sistemleri ile ön çökeltme çıkışından alınan kâğıt atıksuyunun iki kademeli membran filtrasyonunda elde edilen kalite parametre değerleri Tablo 4' de verilmiş olup, MPF-36 membran ile 5 gün süreyle yapılan filtrasyon işlemi sonucunda, % 74.2 KOİ ve % 73.4 TOK giderimi ile elde edilirken, ESNA membranı ile elde edilen süzütü suyunda % 96.3 KOİ ve % 95.9 TOK giderimi ile nihai olarak çıkış suyunda 71 mg/L KOİ ve 19 mg/L TOK değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 3. (a) NFgevşek (MPF36) ve (b) NFsıkı (ESNA) membranların süzütü akıları (Permeate fluxes of (a) NFloose (MPF36) and (b) NFtight (ESNA) membranes)

### C. Aydıner ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünlük membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantré atık minimizasyonu

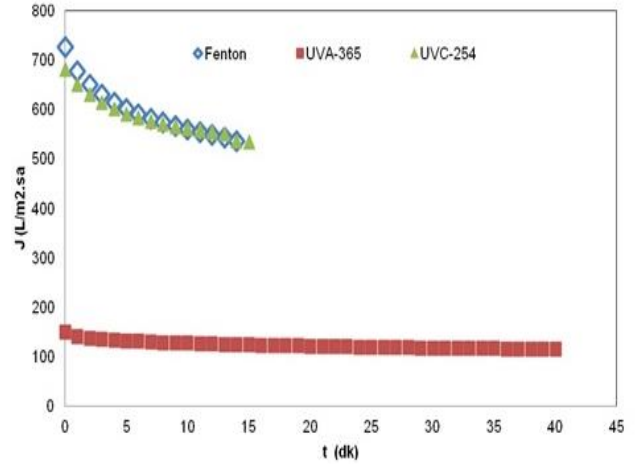
Tablo 4. NFgevsék ve NFsıkı membranlar ile filtrasyon sonucunda elde edilen su kalite analiz sonuçları (The water quality analysis results obtained by filtration through NFloose and NFtight membranes)

Parametre	Ön çöktürme çıkış suyu	5. Gün Sonu			NFgevsék Çıkış Suyu	6. Gün Sonu		
		NFgevsék (MPF-36) Prosesi				NFsıkı (ESNA) Prosesi		
		Konsantré	Süzüntü	Giderim verimi (%)		Konsantré	Süzüntü	Giderim verimi (%)
pH	7.08	7.81	8.47	-	8.47	8.29	7.48	-
İletkenlik (µs/cm)	1995	3150	1326	57.9	1326	3360	277	91.8
TÇK (mg/L)	1011	1619	659	59.3	659	1733	132	92.4
KOİ (mg/L)	1434	1986	513	74.2	552.8	1895	71	96.3
TOK (mg/L)	366.1	654.7	173.9	73.4	173.9	476.3	19	95.9
AOX (mg/L)	4.53	3.50	2.91	16.9	4.09	2.84	2.24	21.1
Renk ( $\lambda_{ortalama}$ ) (abs)	0.531	1.565	0.019	98.8	0.019	0.206	0.011	94.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	535	1150	240	79.1	240	628.6	0	100
Cl (mg/L)	64.9	40.9	38.9	4.9	38.9	179.9	0	100
Demir +2 (mg/L)	0.879	2.89	0.02	99.5	0.02	0.42	0.18	58.5
Demir +3 (mg/L)	<0.2	5.88	0.10	98.4	0.10	1.06	0.05	95.1
Fenol (mg/L)	5.5	10.28	4.42	57	4.42	6.24	0.02	99.7

### 3.2. Hibrit İOP/Batık UF Deneyleri (Hybrid AOP/submerged UF Experiments)

Can Doğan ve diğ. [23] tarafından yapılan deneysel çalışmada belirlenen en uygun UF membranları (Fenton prosesi için UH050, Foto-Fenton prosesinde UVA-365 ışık türü için UP020 ve UVC-254 ışık türü için UH050) kullanılarak gerçekleştirilen hibrit İOP/batık UF deneylerinde elde edilen UF süzüntü akı değerleri Şekil 4' deki gibidir. Konsantré karışımların İOP/batık UF ile arıtımı sonucu elde edilen çıkış sularının kalite analiz sonuçları ise Tablo 5' de verilmiştir.

Şekil 4' de görüldüğü üzere, kullanılan UF membranlarına bağlı olarak, reaktördeki su çekim hızları farklı olduğu için ardışık deneylerde oksidasyon sonrası gerçekleşen UF filtrasyon süreleri de farklılık göstermektedir. Fenton/UH050 ve foto-Fenton (UVC-254)/UH050 deneylerinde 15. dakikada sırasıyla 535 L/m<sup>2</sup>.sa ve 533 L/m<sup>2</sup>.sa' lik akı değerlerine ulaşılırken, foto-Fenton (UVA-365)/UP020 deneyinde UF batık membranın akı değeri 42. dakikada ancak 115 L/m<sup>2</sup> sa değerinde kalmıştır. Süzüntü akıları yönünden değerlendirildiğinde, en düşük süzüntü akısı foto-Fenton (UVA-365)/UP020 hibrit prosesinde elde edilmiş olup, diğer iki proste elde edilen süzüntü akı değerleri oldukça yüksektir. Bunun sebebi, Fenton ve foto-Fenton uygulamalarında farklı MWCO (en son tutulan molekül ağırlığı) değerlerine sahip membranların kullanılmasıdır.



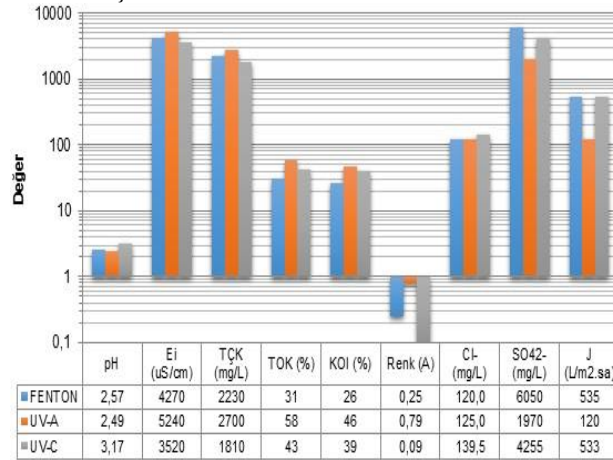
Şekil 4. Karışık konsantrélerin İOP/batık UF hibrit prosesi ile arıtımında UF membranlara ait süzüntü akıları (Permeate fluxes of UF membranes as a result of treatment of mixed concentrates with AOP/submerged UF hybrid process)

MPF-36/ESNA membran konfigürasyonu sonucunda elde edilen konsantrélerin yukarıda belirtildiği şekliyle karıştırılması sonrasında, konsantré karışımlarının İOP/batık UF hibrit reaktörü ile arıtılması ile elde edilen organik madde giderimlerinde en yüksek verim %46.2 KOİ ve %57.6 TOK giderimi ile foto-Fenton (UVA-365)/UP020 hibrit prosesi ile elde edilmiştir. Fakat demir ilavesi ile gerçekleştirilen Fenton ve foto-Fenton proseslerinde kullanılan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarının yanısıra proses sonrasında nihai atığın arıtım maliyetinde önemli bir



## C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünleşik membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre atık minimizasyonu

noktayı teşkil eden kalan demir miktarının da kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu nedenle, Fenton prosesi gibi kimyasal kullanımın olduğu ileri oksidasyon proseslerinde, organik madde gideriminin yanısıra, kalıntı  $Fe^{2+}$  ve  $Fe^{3+}$  gibi inorganik parametrelerin de kontrol altında tutulması gerekmektedir. Daha az  $H_2O_2$  kullanımı ile kimyasal tüketiminin azaltıldığı ve UF süzüntü çıkışında %92.6'lık  $Fe^{3+}$  giderimi ile  $Fe^{3+}$  konsantrasyonunun 69.1 mg/L' a kadar düştüğü Foto-Fenton (UVC-254)/UH050 hibrit prosesinin, %43.1 TOK ve %39.1 KOİ giderim verimi ile 533 L/m<sup>2</sup>.sa' lik yüksek süzüntü akısında üç proses arasında en iyi performansı gösteren proses olduğu söylenebilir. Ayrıca hibrit proses sonrasında UF çıkışında TOK ve KOİ değerlerine bakıldığında, organik madde gideriminde sırasıyla 323 mg/L ve 1245 mg/L değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, konsantre karışımlarının İOP/batık UF hibrit reaktöründe arıtımı sonucu elde edilen filtrasyon performansları su kalite parametreleri ( $E_i$ , TÇK, TOK, KOİ, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ve renk) açısından Fenton, foto-Fenton (UVA-365 ve UVC-254) için Şekil 5' özetlenmiştir.



Şekil 5. İOP/batık UF hibrit prosesinin genel performansı (General performance of AOP/submerged UF hybrid process)

Kağıt endüstrisi atıksu konsantreleri ile yapılan İOP/batık UF hibrit uygulamalarında, her üç proses için optimum olarak belirlenen sürelerde (56, 42, 60 dak), TOK ve KOİ giderim verimlerinin düşük seviyelerde olmasının nedeni olarak, kağıt endüstrisi ön çöktürme çıkışından temin edilen atıksu ile daha önceden belirlenen optimum işletme şartlarının, oluşan konsantre akımın arıtımında yeterli gelmemesidir. Özellikle  $H_2O_2$  konsantrasyonu ile buna bağlı olarak gerçekleşen demir tüketimi ve işletme süresi gibi proses verimini etkileyen önemli işletme parametrelerinin atıksu özelliğine bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Konsantre akımının İOP/batık UF hibrit prosesi ile arıtımı sonrasında çıkan süzüntü suyunun TOK ve KOİ değerleri, kullanılan ham giriş atıksu değerlerine yakın olduğu için elde edilen süzüntü suyunun NFgevşek/NFsıkı membran girişine

verilecektir. Bunun için temel ölçüt, membran çıkış suyu kalitesini bozacak düzeydeki İOP reaktöründeki atıksu kalitesinin eşik işletim değerleri olacaktır.

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Yapılan çalışmada, kâğıt endüstrisi atıksularının çapraz akışlı membran filtrasyon sistemi ile sürekli şartlarda iki kademeli membran filtrasyonu (MPF-36/ESNA) ile arıtımı gerçekleştirilmiştir. NFgevşek/NFsıkı membran ile sırasıyla 49 L/m<sup>2</sup>.sa ve 22 L/m<sup>2</sup>.sa' lik süzüntü akılarında NFsıkı sonrasında, %96.3 KOİ ve %95.9 TOK giderimi elde edilmiş ve nihai olarak çıkış suyunda 71.01 mg/L KOİ ve 19.07 mg/L TOK değerlerine ulaşılarak, basınçlı membran sistemi ile sistem işletim limitleri dahilinde %80 oranında su geri kazanımı sağlanmıştır.

Daha sonra elde edilen konsantre karışımlarının İOP/batık UF hibrit reaktörü ile arıtımı sonucu organik ve inorganik madde giderimleri ve süzüntü akı değerleri dikkate alındığında, foto-Fenton (UVC-254)/UH050 hibrit prosesinin 6.0  $H_2O_2$ /TOK ve 7.0  $H_2O_2$ / $Fe^{2+}$  oranlarında, %39.1 KOİ ve %43.1 TOK giderim verimi elde edilmiştir. 533 L/m<sup>2</sup>.sa' lik yüksek süzüntü akısında üç proses arasında en iyi performansı gösteren foto-Fenton (UVC-254) prosesi sonrasında UF çıkış suyu değerleri reaktör içersinde  $H_2O_2$  tamamen tükenmediği için ancak 321 mg/L TOK ve 1245 mg/L KOİ değerlerine kadar düşmüştür. Oluşan konsantrenin İOP/batık UF hibrit prosesi ile arıtımı sonrasında çıkan süzüntü suyunun TOK ve KOİ değerleri kullanılan kağıt atıkuyu ile yakın değerler olduğundan, elde edilen süzüntü suyunun NFgevşek/NFsıkı membran girişine verilmesi ile konsantre atık minimizasyonu sağlanmıştır.

Bu sonuçlardan hareketle, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ışığında, kağıt endüstrisi gibi yoğun su tüketimi olan endüstrilerde uygun işletme şartları tespit edilerek bütünleşik membran sistemi ile etkin, yüksek oranda ve iyi kalitede su geri kazanımı ile birlikte atık hacmi ve yükü azaltılmış membran konsantrasi üretimiyle konsantre akımların bertarafından kaynaklanan çevre kirlenmesi problemlerinin önüne geçilmiş olacaktır.

## 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olan 113Y369 nolu "Yoğun Su Tüketilen EndüstrilerdeBütünleşik İleri Oksidasyon/Membran Filtrasyon Sistemi ile Su Geri Kazanımı ve Konsantre Yönetimi" başlıklı proje kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, bu desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

## C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünlük membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantre atık minimizasyonu

Tablo 5. Membrane konsantrelerinin Fenton ve foto-Fenton (UVC-254 veUVA-365) prosesleri ile arıtımı sonucu elde edilen çıkış suyu su kalite analizleri (Water quality analysis of effluent water obtained as a result of treatment of membrane concentrates with Fenton and photo-Fenton processes)

Parametre	Birim	MPF-36/ESNA konsantre karışımı	İOP (Fenton)/UF(UH050)			İOP (foto-Fenton-UVA)/UF(UP020)			İOP (foto-Fenton-UVC)/UF(UH050)		
			Konsantre karışımı	UF süzüntü çıkışı	Giderim verimi (%)	Konsantre karışımı	UF süzüntü çıkışı	Giderim verimi (%)	Konsantre karışımı	UF süzüntü çıkışı	Giderim verimi (%)
pH	-	8.26	3.88	2.57	-	3.54	2.49	-	3.50	3.17	-
İletkenlik	(µs/cm)	3020	5250	4270	18.7	5190	5240	-	3643	3520	3.4
TÇK	(mg/L)	1548	2760	2230	19.2	2730	2700	1.1	1925	1809	6
KOİ	(mg/L)	2528	2044	1504.8	26.4	1488	800	46.2	2044	1245	39.1
TOK	(mg/L)	669	593.7	410.7	30.8	885.2	375.4	57.6	568	323	43.1
AOX	(mg/L)	2.330	1.288	0.522	59.5	0.601	0.834	-	0.425	0.455	-
Renk (ortalama)	(abs)	1.253	0.287	0.087	69.8	0.653	0.786	-	0.268	0.071	73.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	(mg/L)	572.9	2440	2360	3.3	1970	1920	2.5	1880	1870	0.5
Demir +2	(mg/L)	1.65	293.5	62.2	78.8	372.5	303.7	18.5	111	6.9	93.8
Demir +3	(mg/L)	3.03	1492	192.65	87.1	1493	1395	6.6	928	69.1	92.6
Fenol	(mg/L)	9.04	4.64	3.45	25.7	13.50	3.60	73.3	14.72	2.96	79.9
J	L/m <sup>2</sup> .sa			535			115			533	

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] E. Köken, N. Büyükkamacı, "Kağıt endüstrisi atıksu arıtma tesislerinde çamur işleme ünitelerinin toplam maliyete etkisi," *İTÜ Dergisi*, c. 20, s.1, pp. 66-76, 2010.
- [2] Ş. Camcıoğlu, B. Özyurt, H. Hapoğlu, "Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atık suyu arıtımında pH kontrolü," *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.16, pp. 107-115, 2015.
- [3] A. Muna, T.R. Sreerishnan, "Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review," *Advances in Environmental Research*, vol. 5, no. 2, pp. 175-196, 2001.
- [4] Y. Bennani, K. Kosutic, E. Drazovic, M. Rozic. "Waste water from wood and pulp industry treated by combination of coagulation, adsorption on modified clinoptilolite tuff and membrane processes," *Environmental Technology*, vol.33, no.10, pp. 1159-1166, 2012.
- [5] J. Tambosi, M. Domenico, W. Schirmer, H. Jose, R. Moreira, "Treatment of paper and pulp wastewater and removal odorous compounds by a fenton-like process at the pilot scale," *Chemical Technology and Biotechnology*, vol.81, pp. 1426-1432, 2006.
- [6] Z. Gönder, S. Arayıcı, H. Barlas, "Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: effects of operating conditions on membrane fouling," *Separation and Purification Technology*, no.76, pp. 292-302, 2011.
- [7] Z. Gönder, S. Arayıcı, H. Barlas, "Treatment of pulp and paper mill wastewater using ultrafiltration process: optimization of the fouling and rejections," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, no.51, pp. 6184-6195, 2012.
- [8] E. Negareh, A. Antony, M. Bassandeh, D. Richardson, G. Leslie, "Selective separation of contaminants from paper mill effluent using nanofiltration," *Chemical Engineering Research and Design*, no.90, pp. 576-583, 2012.
- [9] Y. Kaya, Z.B. Gönder, I. Vergili, H. Barlas, "The effect of transmembrane pressure and ph on treatment of paper machine process waters by using a two-step nanofiltration process: flux decline analysis," *Desalination*, no. 250, pp.150-157, 2010.
- [10] B.V. Bruggen, L. Lejon, C. Vandecasteele, "Critical review: Reuse, treatment, and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes," *Environmental Science & Technology*, vol.37, no.17, pp. 3733-3738, 2003.
- [11] S. Walker, J. Drewes, P. Xu, "Existing & emerging concentrate minimization & disposal practices for membrane systems", *Florida Water Resources Journal*, no. , pp. 40-48, 2006.
- [12] M.C. Mickley, "Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation," *Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 123 (2nd Edition)*, U.S. Department of the Interior-Bureau of Reclamation, 2006.



C. Aydın ve diğ. / Kâğıt atıksularından bütünleşik membran sistemi ile su geri kazanımı ve konsantré atık minimizasyonu

- [13] C.C. Pamela, W.S. Daniel, E.M. Gamal, "Membrane concentrate management options: a comprehensive critical review," *Canadian Journal of Civil Engineering*, no.36, pp. 1107-1119, 2009.
- [14] APHA, AWWA, Standart Methods for the Examination of Water and Wastewaters, 21th ed., American Public Health Association Publication, Washington, USA, 2005.
- [15] A. Yaşar, E. Can Doğan, H. S. Ayberk, C. Aydın "Kentsel artırlmış atıksulardan sulama suyu geri kazanımında ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon proseslerinin etkinliklerinin belirlenmesi," *11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, 15-17 Ekim 2015, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- [16] [<http://www.microdynnadir.com/en/Products/NA-DIR/>], 2006.
- [17] M. Hesampour, J. Tanninen, S.P. Reinikainen, S. Platt, M. Nyströma, "Nanofiltration of single and mixed salt solutions: Analysis of results using principal component analysis (PCA)," *Chemical Engineering Research and Design*, no.88, pp. 1569-1579, 2010.
- [18] P. Xu, J. E. Drewes, "Viability of nanofiltration and ultra-low pressure reverse osmosis membranes for multi-beneficial use of methane produced water," *Separation and Purification Technology*, no.52, pp. 67-76, 2006.
- [19] J. Cho, H. Choi, I.S. Kim, J. Sohn, G. Amy, "Effects of molecular weight cutoff, f/k ratio (hydrodynamic condition), and hydrophobic interactions on natural organic matter rejection and fouling in membranes," *Journal of Water Supply: Research and Technology*, Vol. 51, no.2, pp. 109-123, 2002.
- [20] [<http://www.membranes.com/docs/8inch/ESNA1-LF2-LD.pdf>], 2016. Erişim Tarihi: 03.03.2016.
- [21] [<http://www.kochmembrane.com/Membrane-Products.aspx>], 1963. Erişim Tarihi: 03.03.2016.
- [22] A. Arkell, H. Krawczyk, J. Thuvander, A.S. Jönsson, "Evaluation of membrane performance and cost estimates during recovery of sodium hydroxide in a hemicellulose extraction process by nanofiltration," *Separation and Purification Technology*, no.118, pp. 387-393, 2013.
- [23] E. Can Doğan, C. Aydın, B. Kırıl Mert, A.O. Narıcı, Ö. Kılıçoğlu, U.A. Akbacak, E. Durna, "Kâğıt endüstrisi atıksularının fenton ve foto-fenton prosesleri ile optimum arıtılabilirliğinin araştırılması," *11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Cilt II, Bursa, Uludağ Üniversitesi & Çevre Mühendisleri Odası, pp. 147-166, 2015.
- [24] E. Can Doğan, C. Aydın, B. Kırıl Mert, A.O. Narıcı, Ö. Kılıçoğlu, U.A. Akbacak, "Kağıt endüstrisi atıksularının nanofiltrasyon membran ile arıtımında uygun membran seçimi ve yeniden kullanılabilirliği," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016, kabul edildi.

## **AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi**

Atakan Alkan<sup>1\*</sup>, Haluk Çağrı Kasımoğlu<sup>2</sup>, Cemil Çelik<sup>3</sup>, Zerrin Aladağ<sup>4</sup>

*10.10.2016 Geliş/Received, 26.10.2016 Kabul/Accepted*

doi: 10.16984/saufenbilder.284227

### **ÖZ**

Küreselleşen rekabet ortamında bir firmanın başarılı olabilmesi için tedarikçi seçimi çok önemlidir. İdeal tedarikçilerin belirlenmesinde amaç; müşteri memnuniyetini arttırmak, rekabet yeteneğini geliştirmek ve minimum maliyet ile varlıklarını sürdürebilmelerini sağlamaktır. Bu çalışmada tarımsal lastik üretimi yapan bir işletmede en uygun hammadde tedarikçisi seçimi amaçlanmıştır. Çalışmada bir işletmeye ideal tedarikçinin seçilmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Promethee I-II yöntemleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda AHP ve Promethee I-II yöntemleri ile işletmenin mevcut tedarikçileri arasında en ideal tedarikçi belirlenmiş ve çeşitli öneriler getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AHP, Promethee I-II, Duyarlılık Analizi, Tedarikçi Seçimi.

## **Supplier selection for a tire company with AHP and PROMETHEE methods**

### **ABSTRACT**

Supplier selection is very important for a company to be successful in a globalized competitive environment. The aims at choosing the optimal supplier; to increase customer satisfaction, improve the competitive ability and continue to exist at minimal cost. This study was intended to choose the most suitable raw material supplier in a company engaged in the production of agricultural tires. In the study Analytical Hierarchy Process (AHP) and Promethee I-II methods were applied in order to select the most optimal supplier to a company. In conclusion, AHP and Promethee I-II methods used by the company to determine the suppliers with the optimal supplier and brought several recommendations.\*

**Keywords:** AHP, Promethee I-II, Sensitivity Analysis, Supplier Selection.

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - [aalkan@kocaeli.edu.tr](mailto:aalkan@kocaeli.edu.tr)

2 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - [hckasimoglu@gmail.com](mailto:hckasimoglu@gmail.com)

3 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - [cemil.celik@kocaeli.edu.tr](mailto:cemil.celik@kocaeli.edu.tr)

4 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - [zaladag@kocaeli.edu.tr](mailto:zaladag@kocaeli.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Müşteri isteklerinin hızlı değiştiği bu rekabet ortamında firmalar varlıklarını sürdürmek için performanslarını arttırmaları gerekmektedir. Fakat oluşan yeni rekabet ortamı bunun sadece firma içerisindeki iyileştirmelerle mümkün olmayacağını ortaya koymaktadır. Piyasanın yeni aktörleri firmalar değil, firmaların oluşturdukları tedarik zincirleridir. Bu sebepten dolayı tedarik zincirini oluşturan unsurların performansı firmaların performansı için vazgeçilmez bir etkidir. İdeal tedarikçinin belirlenmesinde tedarikçilerin birçok özelliklerini dikkate alarak, değerlendirilmesi gereken nitel ve nicel ölçütler bulunmaktadır. Literatüre baktığımız zaman tedarik zinciri açısından birden çok tanım bulabiliyoruz. Hammaddelerin tedariki, depolama ve sipariş yönetimi gibi faaliyetlerini kapsayan ve bu faaliyetlerin devam edilebilmesi için gerekli olan sistemleri de içeren yapıya tedarik zinciri denir [1, 2]. Tedarik Zinciri Yönetimi (TZY)' nin gelişimine baktığımızda, ilk gelişmeleri 1960' larda görmekteyiz. TZY' nin ilk aşamasını oluşturan; fiziksel dağıtım aşaması Bowersox tarafından ortaya konulmuştur. Ayrıca Bowersox, dağıtım fonksiyonunun, kanal içi bütünleşmesiyle, büyük bir avantaj sağlayacağını ortaya koymuştur [3].

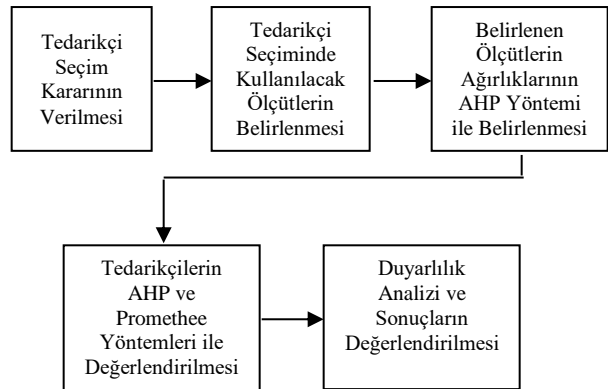
Günümüzde kararların hızlı ve etkin bir şekilde alınmak istenmesi firmaların en önemli amaçlarından biri olmuştur. Karar verme sürecinde kullanılabilecek yöntemler genellikle Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleridir [4, 5]. Tedarikçi seçimi problemi birçok ölçütün değerlendirilmesini gerekli kıldığından bir ÇÖKV problemidir. ÇÖKV problemleri alternatifleri belirli ölçüt değerlerine göre değerlendirip, en ideal uzlaşık bir çözüme ulaşmamızı sağlar. Dickson [6] tedarikçi seçim problemlerinde etkin yirmi üç ölçüt belirlemiş ve bu ölçütler ile bu alanda çalışacak olan araştırmacılara yol göstermiştir. Wang [7] değerlendirme yaparken çalışmasında; kalite, teslimat, maliyet ve tedarikçinin satış sonrası hizmeti gibi ölçütlerin oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır. Literatürde tedarikçi seçim problemleri için farklı çözüm yöntemleri önerilmiştir. Maragoudaki ve Tsakiri [8] Promethee yöntemi ile sel (taşkın) problemlerini ele almış ve bu problemlerin yol açtığı zararları azaltmak için çözüm alternatiflerinin seçim sürecini hızlandırmak için önerilerde bulunmuştur. Supçiller ve Çapraz [9] bir işletmede AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte uygulamışlardır. Gökalp ve Soylu [10] Analitik Ağ Süreci (ANP) ve Promethee yöntemlerini kullanarak ölçüt ağırlıklarını belirlemiş ve tedarikçileri sıralamışlardır. Dağdeviren ve Eraslan [5] bir işletmede Promethee yöntemi ile tedarikçi seçimi problemini ele almış ve tedarikçilerin kısmi ve tam önceliklerini belirlemişlerdir. Yılmaz ve Dağdeviren [11] bir işletmede kaynak makinesi seçimi problemine

Promethee ve bulanık Promethee yöntemini uygulamışlardır. Yapılan çalışmada kısmi ve tam sıralama belirlenmiştir. Arıkan ve Küçükçe [12] bir kamu kuruluşu için tedarikçi seçimi ve uygun bir fiyatlandırma politikası oluşturmayı hedeflemişlerdir. AHP ve Promethee II yöntemleri ile 32 tedarikçi firma sıralanmış ve en uygun tedarikçi belirlenmiştir.

Bu çalışmada tarımsal lastik üretimi yapan bir işletmede en uygun hammadde tedarikçisi seçimi amaçlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise tarımsal lastik üretimi yapan bir işletmenin tedarikçi seçim problemi için AHP ve Promethee I-II yöntemleri uygulaması ve Promethee veri giriş matrisinde maliyet ölçütüne ait kesin tercih eşliğinin ve farksızlık değerinin azaltılması ve artırılması durumlarının analizi anlatılmıştır. Son bölümde ise yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilmiş ve çeşitli öneriler getirilmiştir.

## 2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Tedarikçi seçimi birçok farklı yöntem ile birlikte kullanılabilir. Genellikle tedarikçi seçimi problemlerinde AHP, ANP, Veri Zarflama Yöntemi, ELECTRE, TOPSIS, Promethee ve bu yöntemlerin entegrasyonu kullanılmaktadır. Seçim ölçütleri ve yöntemlerinin belirlenmesi tedarikçi seçiminin en önemli özelliğidir [13]. Tedarikçi seçim işlemi yapılırken, sonuçları karşılaştırma aşamasında farkı ortaya koyabilecek; matematiksel çözüm içeren AHP ve Promethee I-II yöntemleri kullanılacaktır. Bu yöntemlerden yararlanılarak farklı bir bakış açısı sağlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca duyarlılık analizi ile de farklı senaryolar oluşturulmuş ve tedarikçiler analiz edilmiştir. Tedarikçi seçiminde izlenen süreç Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tedarikçi Seçim Süreci (Supplier Selection Process)

## A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

### 2.1. AHP Yöntemi (AHP Method)

AHP yöntemi insan beyninin olaylara bakış açısı sırasında görülen bu doğallık esas alınarak oluşturulmuştur [14]. AHP yöntemi; alternatiflerin ölçütlere göre ikili karşılaştırılmasına dayanır. AHP çok ölçütlü ve çok alternatifli problemlerin çözümünde karar vericiye destek sağlamaktadır [15]. AHP, ilk kez Myers ve Alpert tarafından 1968 yılında ortaya atılmıştır. Sonrasında Saaty tarafından 1977’ de geliştirilen AHP yöntemi beş temel adımdan oluşmaktadır. [16]. Birinci adımda; problem tanımlanır, hiyerarşik yapıda ana hedef belirlenir. İkinci adımda; ölçütler ve alternatifleri içeren hiyerarşi oluşturulur. Üçüncü adımda; ikili karşılaştırma matris(ler)i oluşturulur. Dördüncü adımda; ağırlık vektörü bulunur. Son adımda ise; tutarlılık oranı hesaplanır. Tutarlılık durumunda ikili karşılaştırmalar gözden geçirilerek tutarlı olana dek işlemler tekrarlanır.

### 2.2. Promethee Yöntemi (Promethee Method)

1982 yılında ortaya konulan Promethee yöntemi çok ölçütlü bir sıralama yöntemidir [5]. Promethee, birbiriyle çelişen ölçütleri dikkate alarak alternatiflerin sıralanmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem değerlendirme tablosu ile başlar. Bu tabloda alternatifler farklı ölçütlere göre değerlendirilir [15]. Promethee’nin uygulanması için iki türlü bilgiye ihtiyaç vardır. Bunlar [15]; her bir ölçüt cinsinden alternatiflerin katkısının karşılaştırılması için karar vericinin fonksiyon tercihleri ve düşünülen ölçütlerin göreceli önemleridir. Promethee yöntemi 7 adımdan oluşmaktadır [5]; Birinci adımda;  $w=(w_1, w_2, \dots, w_k)$  ağırlıkları ile  $k$  ölçüt  $c=(f_1, f_2, \dots, f_k)$  tarafından değerlendirilen alternatifler için  $A=(a, b, c, \dots)$  veri matrisi oluşturulur. İkinci adımda; her ölçüt için tercih fonksiyonu tanımlanır. Üçüncü adımda; alternatif çiftler için ortak tercih fonksiyonları, tercih fonksiyonları baz alınarak belirlenir. Dördüncü adımda; ortak tercih fonksiyonları baz alınarak alternatif için tercih indeksi hesaplanır. Beşinci adımda; her bir alternatif için pozitif ( $\Phi^+$ ) ve negatif ( $\Phi^-$ ) üstünlükler belirlenir. Altıncı adımda; kısmi öncelikler Promethee I ile belirlenir. Kısmi öncelikler alternatiflerin birbirleri ile olan ilişkilerini açıklar. Bu ilişkiler; alternatiflerin tercih edilme durumlarını ve birbirinden farksız olan alternatiflerin belirlenmesini ifade eder. Yedinci adımda; alternatifler için Promethee II kullanılarak için tam öncelikler hesaplanır ve hesaplanan bu değerler bütün alternatifler ile aynı düzlemde değerlendirilerek tam sıralama belirlenir.

### 2.3. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Duyarlılık analizi; alternatiflerin her bir hedefle ne kadar performans gösterdiğini ifade eder. Ayrıca bu analiz alternatiflerin hedefler bazında yapılacak değişikliklere

ne kadar duyarlı olduklarını ifade etmektedir [18, 19]. Alternatifler sıralandıktan sonra çalışmanın sonuçlarını değerlendirmek amacıyla, alternatifleri sıralamanın yargılardaki değişikliklere karşı ne kadar hassas olduğu değerlendirilmelidir [19, 20].

## 3. LASTİK ÜRETİCİSİ BİR FİRMA İÇİN TEDARİKÇİ SEÇİMİ (SUPPLIER SELECTION FOR A TIRE COMPANY)

Bu çalışmada tarımsal lastik üretimi yapan bir işletmede tedarikçi seçimi uygulaması yapılmıştır. Çalışmada AHP ve Promethee I-II yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada AHP yöntemi ile ölçüt ağırlıkları belirlenmiş ve Promethee I-II yöntemi ile değerlendirmeye alınan tedarikçiler sıralaması oluşturulmuştur. Ayrıca maliyet ölçütüne ait kesin tercih eşliğinin ve farksızlık değerinin azaltılması ve artırılması durumlarının analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda AHP ve Promethee I–II yöntemleri ile işletmenin mevcut tedarikçileri sıralanıp en ideal tedarikçi belirlenmiş ve çeşitli öneriler getirilmiştir. AHP ve Promethee I–II yöntemlerinin adımlarına ait hesaplamalar için Microsoft Excel 2013 ve Visual Promethee paket programları kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında; uygulamaya başlanmadan önce satın alma ekibiyle yapılan görüşmede firmanın tedarikçi performansını değerlendirmeye tabi tuttuğu ölçütler gözden geçirilmiş ve standart bir değerlendirme çalışması yapılmıştır. Mevcut tedarikçi değerlendirme tablosu incelendikten sonra satın alma ekibi ile yapılan görüşme sonucunda ölçütün belirlenmesinde her bir ölçüt için 1–5 ölçütlü bir değerlendirme yapılmıştır. Belirlenen değerlendirme ölçütüne göre literatürde çeşitli çalışmalarda kullanılmış ve satın alma ekibi ile akademik personellerin önerisi üzerine ölçüt listesi oluşturulmuştur. Değerlendirme sonucu her bir ölçüt için satın alma personeli tarafından verilen puanların geometrik ortalaması alınmıştır. Geometrik ortalamanın üzerinde olan ve satın alma ekibinin son onayından geçen ölçütler Tablo 1’de gösterilmiştir.

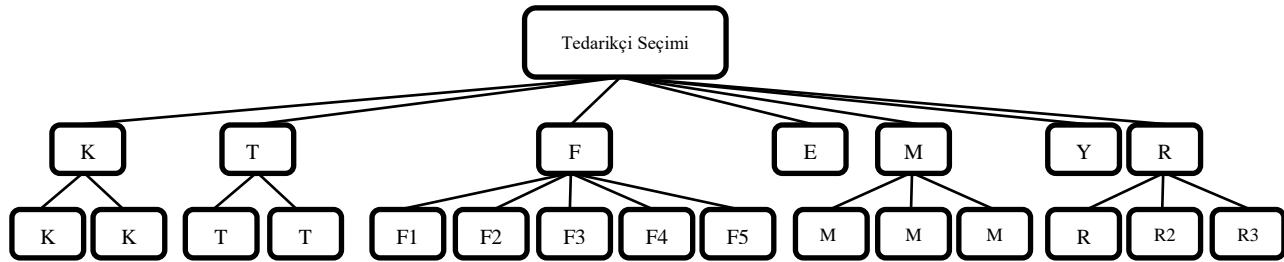
Çalışmanın ikinci aşamasında; ölçütlerin önem derecesinin belirlenmesi için AHP yöntemi kullanılmıştır. Tedarikçi seçimi probleminde hiyerarşide en üstte yer alacak olan ana ölçütler (kalite, teslimat, fiyat, esneklik, müşteri ilişkileri, rekabet gücü ve yenilikçilik) belirlenmiş ve tedarikçi seçimi için Şekil 2’de gösterilen hiyerarşi oluşturulmuştur. Değerlendirmede yedi ana ölçüt ve on beş alt ölçüt kullanılmıştır.

## A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

Tablo 1. Tedarikçi seçimi probleminde kullanılacak ana ve alt ölçütler (Used main and sub-criteria in supplier selection problem)

Sembol	Ana Ölçüt	Ana Ölçüt Geometrik Ortalaması	Görelî Önem Ağırlıkları (%)	Sembol	Altı Ölçüt	Alt Ölçüt Geometrik Ortalaması	Görelî Önem Ağırlıkları (%)
K	Kalite	2,5	0,40	K1	Reddedilen Ürün Yüzdesi	4,3	0,76
				K2	Ürün Performansı	4,3	0,24
T	Teslimat	3,2	0,17	T1	Teslim Performansı	4,3	0,24
				T2	Taşıma/Nakliye Maliyeti	4,3	0,76
F	Fiyat	3,5	0,23	F1	Birim Fiyat	5	0,10
				F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	5	0,47
				F3	Satın Alman Miktarına Bağlı Fiyat İndirimi	4,6	0,28
				F4	Sektörel Fiyat Koşullarına Uyum	4	0,08
				F5	Ödeme Kolaylığı	4	0,07
E	Esneklik	2,7	0,07	E1	Müşteri İsteklerine Uyum	4	0
M	Müşteri İlişkileri	2,7	0,06	M1	İletişim Sistemleri	4,3	0,12
				M2	İşbirlikçilik	4,3	0,30
				M3	Güvenirlilik	4,3	0,58
R	Rekabet Gücü	2,5	0,04	R1	Profesyonellik	4,3	0,14
				R2	Üretim/Satış Kapasitesi	4	0,26
				R3	ÖZKA ile İş Hacmi/Alış Veriş Sıklığı	4	0,60
Y	Yenilikçilik	2,5	0,03	Y1	Yeni Ürün Sunabilme Yeteneği	4,3	0

\* Esneklik ve Yenilikçilik ana ölçütlerinin alt ölçütü olmamakla beraber açıklama mahiyetinde tabloda gösterilmiştir. Bu sebepten alt ölçütün değeri yoktur.



Şekil 2. Hiyerarşik Yapı (Hierarchy structure)

Sonrasında ana ve alt ölçütlere yönelik ikili karşılaştırmalar ve tutarlılık analizi yapılmıştır. Ana ve alt ölçütlerin normalleştirilme işlemi ve tutarlılık oranlarının hesaplanmasından sonra her bir ölçütün görelî önem ağırlıkları Tablo 1’de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. AHP ölçüt ağırlıklarının sonucuna göre % 40 ile Kalite en önemli ana ölçüt olurken kaliteyi fiyat (% 23), teslimat (% 17), esneklik (% 7), müşteri ilişkileri (% 6), rekabet gücü (% 4) ve yenilikçilik (% 3) takip etmektedir.

Ana ölçütlerin ikili karşılaştırma değerlendirmesinde tutarsızlık oranı 0,052 ve alt ölçütlerin ana ölçütler bazında ikili karşılaştırma değerlendirmesinde tutarsızlık oranları; kalite için 0, teslimat için 0, fiyat için 0,037, müşteri ilişkileri için 0,003, rekabet gücü için 0 olarak hesaplanmıştır. Ölçüt ağırlıklarının belirlenmesinden sonra AHP yöntemine göre en uygun tedarikçinin seçilmesi için alt ölçütler bazında alternatif tedarikçilerin ikili karşılaştırılması yapılmıştır. Alt ölçütler için

alternatif tedarikçilerin ikili karşılaştırma matrisleri ve görelî önem ağırlıkları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Alternatif tedarikçilerin ölçütler nezdinde almış olduğu değerler Tablo 3’de gösterilmiştir. Tablo 3’de yer alan ana ölçütler bazındaki tedarikçi toplam değerleri hesaplanırken; her bir tedarikçinin alt ölçüt için almış olduğu değer alt ölçüt ağırlık değeri ve bu alt ölçütün ana ölçüt ağırlık değeri ile çarpılmış ve sonunda toplanmıştır.

Tablo 3’de görüldüğü üzere Tedarikçi 1 ( $0,1 + 0,048 + 0,11 + 0,02 + 0,018 + 0,004 + 0,013 = 0,313$ ) en uygun tedarikçi olmuş, Tedarikçi 4 ( $0,1 + 0,048 + 0,037 + 0,02 + 0,016 + 0,011 + 0,014 = 0,246$ ), Tedarikçi 2 ( $0,1 + 0,038 + 0,052 + 0,02 + 0,013 + 0,011 + 0,006 = 0,24$ ) ve Tedarikçi 3 ( $0,1 + 0,038 + 0,03 + 0,01 + 0,013 + 0,004 + 0,006 = 0,201$ ) sıralaması ortaya çıkmıştır.

A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

Tablo 2. Alternatiflerin alt ölçütler bazında göreceli önem ağırlıkları (Weights of alternatives)

K1-K2- T2-F3- F5-M3	T1	T2	T3	T4	W	T1 - R3	T1	T2	T3	T4	W	F1	T1	T2	T3	T4	W
T1	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T1	1,00	3,00	3,00	1,00	<b>0,38</b>	T1	1,00	3,00	5,00	4,00	<b>0,54</b>
T2	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T2	0,33	1,00	1,00	0,33	<b>0,13</b>	T2	0,33	1,00	3,00	2,00	<b>0,23</b>
T3	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T3	0,33	1,00	1,00	0,33	<b>0,13</b>	T3	0,20	0,33	1,00	0,50	<b>0,08</b>
T4	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T4	1,00	3,00	3,00	1,00	<b>0,38</b>	T4	0,25	0,50	2,00	1,00	<b>0,14</b>
<b>F2</b>	T1	T2	T3	T4	W	<b>F4</b>	T1	T2	T3	T4	W	<b>E1</b>	T1	T2	T3	T4	W
T1	1,00	6,00	7,00	6,00	<b>0,64</b>	T1	1,00	2,00	4,00	3,00	<b>0,47</b>	T1	1,00	1,00	2,00	1,00	<b>0,29</b>
T2	0,17	1,00	4,00	3,00	<b>0,20</b>	T2	0,50	1,00	3,00	2,00	<b>0,28</b>	T2	1,00	1,00	2,00	1,00	<b>0,29</b>
T3	0,14	0,25	1,00	0,50	<b>0,06</b>	T3	0,25	0,33	1,00	0,50	<b>0,10</b>	T3	0,50	0,50	1,00	0,50	<b>0,14</b>
T4	0,17	0,33	2,00	1,00	<b>0,10</b>	T4	0,33	0,50	2,00	1,00	<b>0,16</b>	T4	1,00	1,00	2,00	1,00	<b>0,29</b>
<b>M1</b>	T1	T2	T3	T4	W	<b>M2</b>	T1	T2	T3	T4	W	<b>R1</b>	T1	T2	T3	T4	W
T1	1,00	2,00	2,00	0,50	<b>0,25</b>	T1	1,00	2,00	2,00	2,00	<b>0,40</b>	T1	1,00	0,50	0,50	1,00	<b>0,17</b>
T2	0,50	1,00	1,00	0,25	<b>0,13</b>	T2	0,50	1,00	1,00	1,00	<b>0,20</b>	T2	2,00	1,00	1,00	0,50	<b>0,24</b>
T3	0,50	1,00	1,00	0,25	<b>0,13</b>	T3	0,50	1,00	1,00	1,00	<b>0,20</b>	T3	2,00	1,00	1,00	0,50	<b>0,24</b>
T4	2,00	4,00	4,00	1,00	<b>0,50</b>	T4	0,50	1,00	1,00	1,00	<b>0,20</b>	T4	1,00	2,00	2,00	1,00	<b>0,35</b>
<b>R2</b>	T1	T2	T3	T4	W	<b>Y1</b>	T1	T2	T3	T4	W						
T1	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T1	1,00	0,33	1,00	0,33	<b>0,13</b>						
T2	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T2	3,00	1,00	3,00	1,00	<b>0,38</b>						
T3	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T3	1,00	0,33	1,00	0,33	<b>0,13</b>						
T4	1,00	1,00	1,00	1,00	<b>0,25</b>	T4	3,00	1,00	3,00	1,00	<b>0,38</b>						

Tablo 3. Alternatif tedarikçilerin ölçütlerden almış olduğu değerler (Value of the suppliers)

Ana Ölçüt	Ağırlık	Sembol	T1	T2	T3	T4	Ana Ölçüt	Ağırlık	Sembol	T1	T2	T3	T4
K	0,40	K1	0,25	0,25	0,25	0,25	T	0,17	T1	0,38	0,13	0,13	0,38
		Değer	0,076	0,076	0,076	0,076			Değer	0,016	0,005	0,005	0,016
		K2	0,25	0,25	0,25	0,25			T2	0,25	0,25	0,25	0,25
		Değer	0,024	0,024	0,024	0,024			Değer	0,032	0,032	0,032	0,032
		Toplam	0,1	0,1	0,1	0,1			Toplam	0,048	0,038	0,038	0,048
F	0,23	F1	0,54	0,23	0,08	0,14	E	0,07	E1	0,29	0,29	0,14	0,29
		Değer	0,012	0,005	0,002	0,003			Değer	0,02	0,02	0,01	0,02
		F2	0,64	0,2	0,06	0,1			Toplam	0,02	0,02	0,01	0,02
		Değer	0,069	0,022	0,006	0,011							
		F3	0,25	0,25	0,25	0,25							
		Değer	0,016	0,016	0,016	0,016							
		F4	0,47	0,28	0,1	0,16							
		Değer	0,009	0,005	0,002	0,003							
		F5	0,25	0,25	0,25	0,25							
		Değer	0,004	0,004	0,004	0,004							
Toplam		0,11	0,052	0,03	0,037	Toplam		0,004	0,011	0,004	0,011		
M	0,06	M1	0,25	0,13	0,13	0,5	R	0,04	R1	0,17	0,24	0,24	0,35
		Değer	0,002	0,001	0,001	0,004			Değer	0,001	0,001	0,001	0,002
		M2	0,4	0,2	0,2	0,2			R2	0,25	0,25	0,25	0,25
		Değer	0,007	0,004	0,004	0,004			Değer	0,002	0,002	0,002	0,002
		M3	0,25	0,25	0,25	0,25			R3	0,38	0,13	0,13	0,38
		Değer	0,009	0,009	0,009	0,009	Değer	0,009	0,003	0,003	0,009		
		Toplam		0,018	0,013	0,013	0,016	Toplam		0,013	0,006	0,006	0,014



## A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

Tedarikçi seçiminde kullanılacak ölçütlerin ağırlıkları AHP yöntemi ile tespit edildikten sonra değerlendirmeye tabi tutulacak tedarikçilerin sıralamaya alınması için Promethee yöntemi kullanılmıştır. Bu aşamada; satın alma ekibi tarafından tedarikçiler ölçütlere göre değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları Tablo 4’de görüldüğü gibidir. Promethee uygulamasında 2 adet senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolarda Maliyet (F2)

ölçütü analiz edilmiştir (Tablo 4 değerleri Senaryo 1 modeline aittir). Alternatif tedarikçilerin ölçütlere göre değerlendirilmesinden sonra Promethee uygulamasının oluşabilmesi için hiyerarşik yapıda bulunan ölçütler yapısı tek seviyeli bir ölçüt yapısına dönüştürülmüştür. Bu hesaplama alt ölçütün ana ölçütünden aldığı pay ile ana ölçütün değerinin çarpılmasıyla oluşmaktadır. Yeni ölçüt ağırlıkları Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Tedarikçilerin ölçütlere göre değerlendirilmesi (Evaluation criteria)

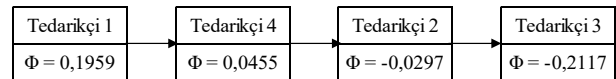
Ölçüt / Tedarikçi	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4	Ölçüt
K1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	Yüzde Olarak
K2	8	8	8	8	10 Üzerinden
T1	1,58 USD	1,89 USD	1,97 USD	1,95 USD	Para Birimi (Dolar)
T2	186705,44 TL	222746,68 TL	232790,96 TL	230427,60 TL	Para Birimi (TL)
F1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	Yüzde Olarak
F2	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	10 Üzerinden
F3	90	90	90	90	Vade (Gün)
F4	8	7	7	8	10 Üzerinden
F5	Tedarikçiye Ait (Evet)	Tedarikçiye Ait (Evet)	Tedarikçiye Ait (Evet)	Tedarikçiye Ait (Evet)	Tedarikçiye Ait (Evet) - (Hayır)
E1	7	7	6	7	10 Üzerinden
M1	7	6	6	8	10 Üzerinden
M2	8	7	7	7	10 Üzerinden
M3	8	8	8	8	10 Üzerinden
R1	7	7	7	8	10 Üzerinden
R2	-	-	-	-	Yüzde Olarak
R3	İyi(4)	Orta(3)	Orta(3)	İyi(4)	Çok Kötü-Kötü-Orta-İyi-Çok İyi
Y1	7	9	7	9	10 Üzerinden

Tablo 5. Tek seviyeli görel önem ağırlıkları, tercih fonksiyonları ve parametreleri (Weights and selected functions and parameters)

Sembol	W (%) (1)	Sembol	W (%) (2)	T1	T2	T3	T4	W	Tercih Fonksiyonu Türü	Par. Q	Par. P
K	0,4	K1	0,76	0	0	0	0	<b>0,304</b>	Birinci Tip (Olağan)	n/a	n/a
		K2	0,24	GV-G (8)	GV-G (8)	GV-G (8)	GV-G (8)	<b>0,096</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0
T	0,17	T1	0,24	GV-G (8)	G (7)	G (7)	GV-G (8)	<b>0,041</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,3
		T2	0,76	Evet (1)	Evet (1)	Evet (1)	Evet (1)	<b>0,129</b>	İkinci Tip (U – Tipi)	1	n/a
F	0,23	F1	0,1	1,58	1,89	1,97	1,95	<b>0,023</b>	Beşinci Tip (Lineer)	0,05	0,1
		F2	0,47	186705TL	222746TL	232790TL	230427TL	<b>0,108</b>	Beşinci Tip (Lineer)	7500	12500
		F3	0,28	0	0	0	0	<b>0,064</b>	Birinci Tip (Olağan)	n/a	n/a
		F4	0,08	İyi (4)	İyi (4)	İyi (4)	İyi (4)	<b>0,018</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0
		F5	0,07	90	90	90	90	<b>0,016</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0
E	0,07	E1	-1	G (7)	G (7)	A-G (6)	G (7)	<b>0,07</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,2
		M1	0,12	G (7)	A-G (6)	A-G (6)	GV-G (8)	<b>0,007</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,4
M	0,06	M2	0,3	GV-G (8)	G (7)	G (7)	G (7)	<b>0,018</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,2
		M3	0,58	GV-G (8)	GV-G (8)	GV-G (8)	GV-G (8)	<b>0,035</b>	Birinci Tip (Olağan)	n/a	n/a
		R1	0,14	G (7)	G (7)	G (7)	GV-G (8)	<b>0,005</b>	Birinci Tip (Olağan)	n/a	n/a
R	0,04	R2	0,26	n/a	n/a	n/a	n/a	<b>0,012</b>	Birinci Tip (Olağan)	n/a	n/a
		R3	0,6	İyi (4)	Orta (3)	Orta (3)	İyi (4)	<b>0,023</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,3
Y	0,03	Y1	-1	G (7)	VG (9)	G (7)	VG (9)	<b>0,03</b>	Üçüncü Tip (V – Tipi)	n/a	0,5
<b>Doğruluk (Sütun Toplamı)</b>								<b>1,00</b>			

Promethee yönteminin uygulanabilmesi için uygun tercih fonksiyonu seçilmiş ve Tablo 5’de gösterilmiştir. Tercih fonksiyonlarının belirlenmesinden sonra Promethee yönteminin uygulaması için Visual Promethee paket programı kullanılmıştır. Veri ekranına değerlendirmeye alınacak tedarikçilerin bilgileri ve ölçütlere ait tercihlerin girilmesinden sonra problem çözüme ulaştırılmıştır. Veriler Promethee I ve II’ye göre değerlendirilmiştir. Bu aşamada, Promethee I ile kısmi sıralama belirlenmiştir ve kısmi sıralamaya göre Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi seçilmiştir. Sıralamayı Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 takip etmekte olup bu durum Şekil 3’de gösterilmiştir. Herhangi bir

tedarikçinin net olarak kıyaslanamama sorunu yaşanmamasına rağmen Promethee II ile kesin sonuçlar görülmüştür.



Şekil 3. Promethee I ile sıralama sonuçları (Ranking results with Promethee I)

Promethee II ile yapılan ideal sıralamaya göre Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiştir, diğer tedarikçiler ise Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde

## A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

sıralanmıştır. Kıyaslamada herhangi bir netsizlik olmadığından Promethee I ve II sıralamaları aynı sonucu vermiştir.

### 3.1. Maliyet Ölçütü Temelli Duyarlılık Analizi (Cost-Based Sensitivity Analysis)

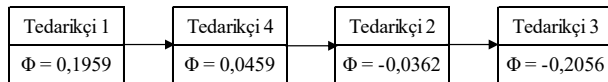
Senaryo 1 ile sonuçlara vardıldıktan sonra ölçütler üzerinde analiz yapabilmek için Senaryo 2 devreye sokulmuştur. Senaryo 2 için kullanılan tercih fonksiyonları ve parametreleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Bu senaryoda Maliyet (F2) ölçütü incelenmiştir.

Tablo 6. Senaryo 2 için seçilen tercih fonksiyonları ve parametreleri (Selected functions and parameters for Scenario 2)

Durum	Sembol	Ölçüt	W	Tercih Fonksiyonu Türü	Parametre	
					Q	P
Mevcut	F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	0,108	Beşinci Tip (Lineer)	7500	12500
Yeni Durum 1	F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	0,108	Beşinci Tip (Lineer)	7500	15000
Yeni Durum 2	F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	0,108	Beşinci Tip (Lineer)	5000	12500
Yeni Durum 3	F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	0,108	Beşinci Tip (Lineer)	5000	10000
Yeni Durum 4	F2	Maliyet (Sipariş Maliyeti)	0,108	Beşinci Tip (Lineer)	10000	15000

Senaryo 2'de 4 yeni durum ayrı ayrı incelenmiştir. Yeni Durum 1'e göre Promethee I değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre kısmi sıralama şu şekildedir; Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiştir, diğer tedarikçiler ise Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde sıralanmıştır.

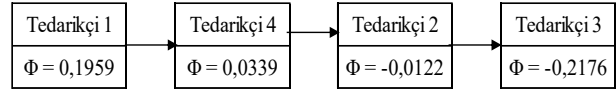
Senaryo 2 için Yeni Durum 1'de sıralama olarak bir fark oluşmamıştır. Fakat Tedarikçi 1 hariç diğerlerinin pozitif ve negatif üstünlüklerinde değişim görülmüştür. Promethee II kesin sıralamalarını ise yine Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiş, diğer tedarikçiler Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde sıralanmıştır.



Şekil 4. Senaryo 2; yeni durum 1 için Promethee I ile sıralama sonuçları (Ranking results with Promethee I)

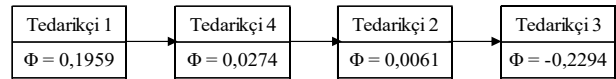
Senaryo 2 için Yeni Durum 2'de sıralama olarak bir fark oluşmamıştır. Promethee I kısmi sıralama sonuçları Şekil 5'de gösterilmiştir. Kesin sıralamada ise yine Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiş, diğer tedarikçiler

Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde sıralanmıştır.



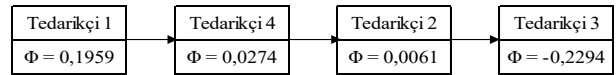
Şekil 5. Senaryo 2 için yeni durum 2 Promethee I ile sıralama sonuçları (Ranking results with Promethee I)

Senaryo 2 için Yeni Durum 3'de farklılık olarak kıyaslanamama oluşmuştur. Promethee I'e göre Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi seçilirken Tedarikçi 4 ve 2 kıyaslanamamaktadır. Tedarikçi 3 ise sonuncu tedarikçi olmuştur. Promethee II kesin sıralamalarını ise yine Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiş, diğer tedarikçiler Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde sıralanmış ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Senaryo 2 için yeni durum 3 Promethee II ile sıralama sonuçları (Ranking results with Promethee II)

Senaryo 2 için Yeni Durum 4'de yine sıralama olarak bir fark oluşmamıştır. Promethee I kısmi sıralama sonuçları Tedarikçi 1 hariç diğerlerinin pozitif ve negatif üstünlüklerinde değişim görülmektedir. Promethee II kesin sıralamalarını ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Kesin sıralamada ise yine Tedarikçi 1 en iyi tedarikçi olarak belirlenmiş, diğer tedarikçiler Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 şeklinde sıralanmıştır.



Şekil 7. Senaryo 2 için yeni durum 4 Promethee II ile sıralama sonuçları (Ranking results with Promethee II)

Senaryo 1 ve Senaryo 2'den aldığımız sonuçları Tablo 7'de gösterilmiştir. Senaryolarda kesin tercih eşiği ve farksızlık değerinin değiştirilmesine karşın tepkiler Tablo 7'de toplanmıştır.

Tablo 7. Senaryo 1 ve Senaryo 2 değerlendirme sonuçları (Evaluation results with scenario 1 and 2)

Senaryo	Durum	Tedarikçi 1	Tedarikçi 2	Tedarikçi 3	Tedarikçi 4
		Senaryo 1	0,1959	-0,0297	-0,2117
Senaryo 2	Yeni Durum 1	0,1959	-0,0362	-0,2056	0,0459
	Yeni Durum 2	0,1959	-0,0122	-0,2176	0,0339
	Yeni Durum 3	0,1959	0,0061	-0,2294	0,0274
	Yeni Durum 4	0,1959	-0,049	-0,1937	0,0468

## A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

Tablo 7'den de görüldüğü üzere her iki senaryoda Tedarikçi 1'e ait kesin sonuç değeri değişmemektedir. Senaryo 1 ile kıyaslandığında Yeni Durum 1'de kesin tercih eşiği arttırıldığında Tedarikçi 4, Tedarikçi 1'e yaklaşırken Tedarikçi 2 uzaklaşmakta ve Tedarikçi 3 ise yaklaşmaktadır. Burada Tedarikçi 4'ün yükselişi diğer ölçütteki üstünlükleri ve bazı ölçütlerdeki eşitlikleri olmasına karşın Maliyet (F2) ölçütündeki müsahahanın arttırılması sebebiyle gerçekleşmiştir. Yeni Durum 2 incelendiğinde; farksızlık değerinin düşürülmesi Tedarikçi 4'ü Tedarikçi 1'den uzaklaştırırken, Tedarikçi 2'ye yaklaştırmış ve Tedarikçi 3'ü uzaklaştırmıştır. Yeni Durum 3 incelendiğinde ise hem farksızlık değerinin hem de kesin tercih eşiğinin düşürülmesi Tedarikçi 4'ü Tedarikçi 1'den uzaklaştırırken, Tedarikçi 2'ye yaklaştırmış ve Tedarikçi 3'ü uzaklaştırmıştır. Ayrıca Yeni Durum 2'ye göre de uzaklaşan daha fazla uzaklaşmakta ve yakınlaşan ise daha fazla yakınlaşmaktadır. Yeni Durum 4 incelendiğinde ise hem farksızlık değerinin hem de kesin tercih eşiğinin arttırılması; Yeni Durum 1'de olduğu gibi Tedarikçi 4 Tedarikçi 1'e yaklaşırken Tedarikçi 2 uzaklaşmakta ve Tedarikçi 3 ise yaklaşmaktadır. Bu uzaklaşma ve yakınlaşma değerleri ise Yeni Durum 1'e göre daha fazla gerçekleşmektedir.

### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

İşletmelerin faaliyetlerini yerine getirilebilmesi için; ideal tedarikçinin seçimi diğer işletmeler ile rekabet edebilmesi açısından olumlu yönde etkileyebilecek önemli bir karar sürecidir. Bu nedenle işletmeler daima ideal hizmet ve maliyet avantajı sağlayabilecek tedarikçileri bulma arayışı içindedirler. Günümüze kadar yapılan ve halen yapılmaya devam eden tedarikçi seçim problemlerinin çözümünde ÇÖKV yöntemlerinden birçok farklı yöntem geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edecektir. Bu yöntemlerden uygulama mantığı açısından hem de karar vericiye sunduğu kolaylık açısından, AHP ve Promethee I-II yöntemleri ön plana çıktığından tedarikçi seçim probleminde kullanılmıştır.

Bu çalışmada tarımsal lastik üretimi yapan bir işletme için tedarikçi seçimi problemi ele alınmıştır. Satın alma ekibinin beklenti ve isteklerini karşılayabilecek 7 ana ölçüt ve 15 alt ölçüt belirlenmiştir. Yapılan ikili karşılaştırmalar neticesinde en önemli ölçüt (%40) ile kalite olurken sıralamayı fiyat (%23), teslimat (%17), esneklik (%7), müşteri ilişkileri (%6), rekabet gücü (%4) ve yenilikçilik (%3) takip etmiştir. Satın alma ekibinin hammadde tedarikinde değerlendirmeye alınan 4 tedarikçi için uygulanan çalışma sonucunda ilk önce AHP ile tedarikçilerin değerlendirilmesinde Tedarikçi 1 en uygun tedarikçi seçilirken sıralamayı Tedarikçi 4, Tedarikçi 2 ve Tedarikçi 3 takip etmiştir. Sonrasında AHP'den elde edilen ölçüt ağırlıklarının kullanılmasıyla

Promethee yöntemi ile tedarikçilerin değerlendirilmesinde Tedarikçi 1 tekrar en uygun tedarikçi seçilirken sıralama yine aynı kalmıştır. Ayrıca Promethee yönteminde maliyet (F2) ölçütüne ait parametrelerde değişiklik yapılarak yapılan analizde kesin tercih eşiğinin ve farksızlık değerinin azalması ve artması Tedarikçi 1'i en uygun tedarikçi olmasını değiştirmemesine karşın hem kesin tercih eşiğinin hem de farksızlık değerinin azaltılması Tedarikçi 2'nin ön plana çıkmasına neden olmaktadır. Burada Tedarikçi 2'nin maliyet açısından Tedarikçi 4'e göre avantajlı olmasına karşın kalite ve diğer ölçütler açısından Tedarikçi 4'e yakın olması bu durumun ortaya çıkmasındaki etken olarak görülebilmektedir.

AHP ve Promethee yöntemleri sonucunda sıralamanın aynı çıkmasına karşın Promethee'nin parametrelerde değişiklik yapılmasına imkân sağlaması AHP ve Promethee yöntemini daha avantajlı kılmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerin birbiriyle kullanılmasının yanı sıra diğer yöntemlerle beraber de kullanılması karar vericilere daha farklı bakış açıları kazandırabilecektir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan yöntemler, diğer işletmelerin farklı ürün tedarikçilerinin seçiminde de kullanılabilir.

### KAYNAKÇA

- [1] H. Yüksel, "Tedarik Zincirleri için Performans Ölçüm Sistemlerinin Tasarımı", Celal Bayar Üniversitesi İ.İ.B.F. Yönetim ve Ekonomi Dergisi, cilt: 11, sayı: 1, pp. 143-154, 2004.
- [2] G. Akman, A. Alkan, "Tedarik Zincir Yönetiminde Bulanık AHP Yöntem Kullanılarak Tedarikçilerin Performansının Ölçülmesi: Otomotiv Yan Sanayinde Bir Uygulama", İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, yıl: 5, sayı: 9, pp. 23-46, 2006.
- [3] D.J. Bowersox, B.J. La Londe, E.W. Smykay, Readings in Physical Distribution Management: The Logistics of Marketing. Eds. MacMillan, New York, USA, 1969.
- [4] M. Dağdeviren, "Performans Değerlendirme Sürecinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Bütünleşik Modellenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [5] M. Dağdeviren, E. Eraslan, "PROMETHEE Sıralama Yöntemi İle Tedarikçi Seçimi", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt: 23, no: 1, pp. 69-75, 2008.
- [6] G.W. Dickson, "An analysis of vendor selection systems and decisions", Journal of Purchasing, cilt: 2/1, pp. 5-17, 1966.
- [7] W.P. Wang, "A fuzzy linguistic computing approach to supplier evaluation", Applied

A.Alkan ve diğ. / AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile lastik üreticisi bir firma için tedarikçi seçimi

- Mathematical Modelling, cilt: 34, pp. 3130-3141, 2010.
- [8] R. Maragoudaki, G. Tsakiris, "Flood Mitigation Planning Using PROMETHEE", European Water, cilt: 9(10), pp. 51-58, 2005.
- [9] A. A. Supçiller, O. Çapraz, "AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Tedarikçi Seçimi Uygulaması", İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Ekonometri Ve İstatistik Dergisi, sayı:13, pp. 1-22, 2011.
- [10] B. Gökalp, B. Soylu, "Tedarikçinin Süreçlerini İyileştirme Amaçlı Tedarikçi Seçim Problemi", Journal of Industrial Engineering, cilt: 23(1), pp. 4-15, 2012.
- [11] B. Yılmaz, M. Dağdeviren, "Ekipman Seçimi Probleminde Promethee ve Bulanık Promethee Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt: 25(4), pp. 811-826, 2010.
- [12] F. Arıkan, Y.S. Küçükçe, "Satın Alma Faaliyeti İçin Bir Tedarikçi Seçimi – Değerlendirme Problemi ve Çözümü", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 27(2), pp. 255-264, 2012.
- [13] A. Kokangül, Z. Susuz, "Integrated analytical hierarchy process and mathematical programming to supplier selection problem with quantity discount", Applied Mathematical Modelling, cilt: 33(3), pp. 1417-1429, 2009.
- [14] B. Çiftçiöğlü, "İnşaat Sektöründe AHP Yöntemi İle Alt Yüklenici Seçimi: Bir Konut Projesinde Uygulama", Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
- [15] N. Ömürbek, M. Karaatlı, H. Eren, B. Şanlı, "AHP Temelli PROMETHEE Sıralama Yöntemi İle Hafif Ticari Araç Seçimi", Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, cilt: 19, sayı: 4, pp. 47-64, 2014.
- [16] T. Saaty, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill International Book Company, USA, pp. 107-117, 1980.
- [17] E.H. Forman, M.A Selly, Decision by Objectives: How to Convince Others that You are Right, First Published, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp. 22, 2001.
- [18] Ö.F. Ünal, "Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Personel Seçimi Alanında Uygulamaları", Akdeniz Üniversitesi Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi, cilt: 3, sayı: 2, pp. 18-38, 2011.
- [19] G. Keçek, E. Yıldırım, "Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) Sisteminin Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile Seçimi: Otomotiv Sektöründe Bir Uygulama", Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, cilt: 5(1), pp. 193-211, 2010.



## Tepe akım modu kontrollü Zeta dönüştürücünün küçük işaret analizi

Abdurrahman Yılmaz<sup>1\*</sup>, Muhammet Garip<sup>2</sup>

13.12.2016 Geliş/Received, 01.03.2017 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.277598

### ÖZ

Bu çalışmada, tepe akım-modu kontrollü, izole edilmemiş Zeta dönüştürücünün küçük işaret analizi sunulmuştur. Yapılan analizde PWM anahtarlama modeli Sürekli İletim Modu'nda (SİM) değerlendirilmiştir. Kontrol işaretinden çıkış gerilimine olan transfer fonksiyonu çıkış kondansatöründeki esr (eşdeğer seri direnç) de dâhil olmak üzere sembolik formda elde edilmiştir. Transfer fonksiyonuna ait sıfırların kesin çözümleri sembolik olarak verilmiştir. Ancak, elde edilen tepe akım modu kontrollü PWM anahtarlama modelinin paydası 5. mertebeden bir polinom olduğundan, kutupların ve kalite faktörlerinin sembolik formda bulunması için yaklaşık kök analizi kullanılması gerekmektedir. Bu analiz kullanılarak yaklaşık kutuplar ve kalite faktörleri de sembolik formda türetilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** zeta dönüştürücü, pwm anahtarlama modeli, tepe akım-modu kontrol

## Small signal analysis of peak current mode controlled Zeta converter

### ABSTRACT

In this study, small signal analysis of peak current-mode controlled, non-isolated Zeta converter is presented. The PWM-switch model in Continuous Conduction Mode (CCM) is utilized in the analysis. The control to output voltage transfer function is derived in symbolic form including the esr of the output capacitor. The exact zeros of the transfer function are given in symbolic form. However, the peak current-mode PWM-switch model yields 5<sup>th</sup> order polynomial in its denominator, which necessitates approximate root analysis in finding the symbolic equations of its poles and quality factors. By using this analysis, the approximate poles and quality factors also derived symbolically in the paper.

**Keywords:** zeta converter, pwm-switch model, peak current-mode control

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul - abyilmaz@yildiz.edu.tr

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mgarip@yildiz.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1980’li yılların sonunda Józwick ve Kazimierczuk tarafından “Sepic dönüştürücünün dualı” ismi ile sunulan DA-DA (doğru akım - doğru akım) dönüştürücüye [1], literatürde Zeta DA-DA dönüştürücü denilmektedir. Bu dönüştürücü topolojisine “Zeta” ismi verilmesinde dönüştürücünün literatüre giren altıncı DA-DA dönüştürücü olması yatmaktadır. Zeta Yunan alfabesindeki altıncı harf olduğu için dönüştürücüye Zeta ismi verilmiştir [2]. Zeta dönüştürücü iki kondansatör ve iki indüktöre sahip dördüncü mertebeden bir DA-DA dönüştürücüdür ve giriş gerilimini yükselten ya da düşüren modlarda çalışabilir [3-6]. Cuk dönüştürücü ve tek indüktörlü düşüren/yükselten (buck/boost) dönüştürücülerin aksine giriş ve çıkış gerilimlerinin aynı polariteye sahip olması, Zeta dönüştürücüyü dağıtımlı güç sistemlerinde kullanılmaya daha uygun hale getirir [1]. Çalışmada gösterileceği üzere Zeta dönüştürücü çıkışında yer alan LC filtresi sayesinde Sepic türü dönüştürücüye göre çıkış geriliminde daha düşük dalgalanmaya sahiptir.

DA-DA dönüştürücü tasarımında gerilim-modu kontrole göre sağladığı pek çok avantaj nedeniyle bu çalışmada akım-modu kontrol ele alınmıştır. Bu avantajlardan bazıları [7]:

- Çıkıştaki LC filtresini iki kutuptan tek kutba düşürerek kontrolden indüktör akımına herhangi bir faz gecikmesinin olmamasını sağlaması ve DA-DA dönüştürücülerinin kompozasyonu kolaylaştırması
- Kullanıldığı dönüştürücüyü doğasında olan akım sınırları sayesinde aşırı yükten koruması ve dönüştürücü çıkışlarının paralellenmesini kolaylaştırabilmesi
- Giriş gerilimindeki statik ve dinamik değişimlere karşı tabiatı gereği duyarsız olması
- Geçici yük değişimlerinde çok hızlı bir düzeltme yöntemi elde etmeyi sağlaması ve çıkış geriliminde meydana gelebilecek sapmaları en aza indirmek için çıkış akımının ileri beslemeli kullanılması uygulamasını kolaylaştırması

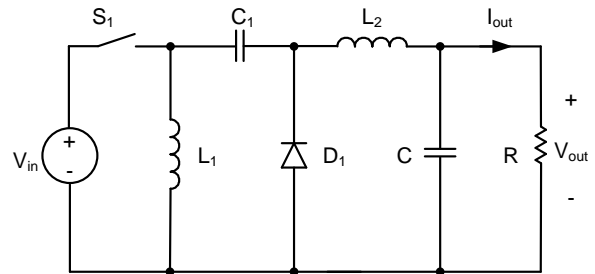
olarak verilebilir.

Zeta dönüştürücü için küçük işaret analizi sabit frekanslı gerilim-modu kontrol için [8]’de yapılmıştır ancak tepe akım-modu kontrol için küçük işaret analizi yapılmamıştır. Bu çalışmada sürekli iletim modunda (SİM) çalışan tepe akım-modu kontrollü Zeta dönüştürücü için küçük işaret analizi sunulmuştur. Bu analizde PWM anahtarlama modeli [9,10] kullanılmıştır. Tepe akım-modu kontrolünde PWM anahtarlama, modele anahtarlama frekansının yarısı civarında 180°’lik

faz çevirici etki yapan bir kapasite ekler ve bu kapasite sayesinde daha doğru bir model elde edilir. Ayrıca bu çalışma, küçük işaret analiziyle elde edilen transfer fonksiyonun doğruluğunu artırmak amacıyla Şekil 1’de görülen C çıkış kapasitesine ait esr etkisini de göz önünde bulundurmaktadır.

[8] numaralı çalışmada belirtildiği üzere sabit frekansta gerilim-modu kontrollü Zeta dönüştürücü 4. mertebeden bir paydaya sahiptir. Akım modu kontrolün avantajları kısmında belirtildiği üzere, kutuplardan birisi akım modu kontrol ile kaldırıldığı için akım-modu kontrollü Zeta dönüştürücü transfer fonksiyonu paydasının 3. mertebeden olması beklenmektedir. Ancak, PWM anahtarlama modelinin kullanılması, anahtarlama frekansının yarısı civarında ekstra bir kutup çiftini transfer fonksiyonuna ekler ve transfer fonksiyonunun paydasını 5. mertebeye yükseltir.

Analize başlamadan önce izole edilmemiş Zeta dönüştürücü devresi üzerinde topolojiyi değiştirmeyecek şekilde bazı değişiklikler yapılarak PWM anahtarlama modeli uygulanabilir hale getirilmiştir. Ardından kontrol işaretinden çıkış gerilimine olan transfer fonksiyonu türetilmiştir. Sonuçta oluşan transfer fonksiyonu sırasıyla 3. ve 5. dereceden pay ve paydaya sahiptir. Pay kısmı biri tek sıfır diğeri sıfır çifti şeklinde ikiye parçalanabildiğinden, herhangi bir yaklaşıklık yapılmaksızın sıfırlar sembolik formda elde edilebilmiştir. Öte yandan transfer fonksiyonunun paydası 5. mertebeden olduğu için, payda fonksiyonu kutupların birbirinden yeterince ayrı konumlandığı varsayımı altında yaklaşık olarak analiz edilmelidir. Bu varsayım sonucunda bir adet alçak frekans bölgesinde yer alan reel kutup, bir adet orta frekans bölgesinde yer alan kutup çifti ve bir adet yüksek frekans bölgesinde (anahtarlama frekansının yarısı civarında) yer alan kutup çifti için sembolik bağıntılar elde edilmiştir.



Şekil 1. İzolesiz Zeta dönüştürücü devresi (Non-isolated Zeta converter)

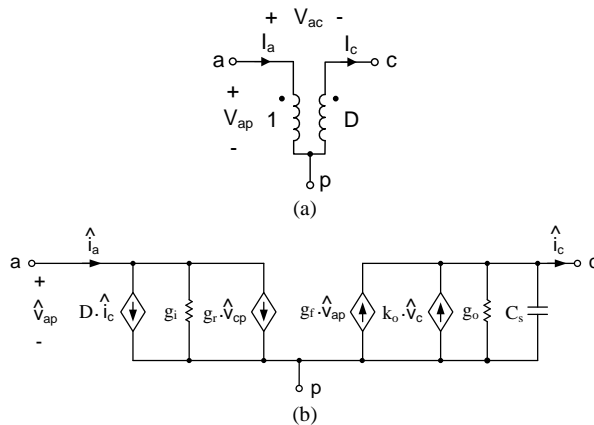
Bu makalede sunulan çalışma, literatürde tepe akım-modu kontrolü ile Zeta dönüştürücünün küçük işaret davranışını analiz eden herhangi bir çalışma olmadığından yenidir. Örnek bir Zeta dönüştürücü üzerinden sayısal analiz daha kolay yapılabilir ancak



özellikle bu çalışmadaki Zeta dönüştürücü gibi dördüncü merteye dönüştürücülerin sembolik analizlerinin yapılması yüksek mertebeden transfer fonksiyonları elde edildiği için zordur. Ayrıca tepe akım-modu kontrolü PWM anahtarlama modeli akım-modu kontrolde var olan altharmonik osilasyonları hesaba katarak, transfer fonksiyonunu daha doğru olarak elde etmeyi sağlar, fakat bununla birlikte transfer fonksiyonu payda mertebesi artacağından yapılan analizin karmaşıklığı artacaktır.

## 2. TEPE AKIM MODU KONTROLDE PWM ANAHTARLAMA MODELİNE GENEL BAKIŞ (OVERVIEW OF PWM SWITCH MODEL WITH PEAK CURRENT-MODE CONTROL)

PWM anahtarlama modeli ilk olarak 1990 yılındaki [11] çalışmasıyla sunulmuştur. Burada DA-DA dönüştürücü topolojilerinde yer alan anahtar çifti üç uçlu kombinasyon anahtarı şeklinde gösterilir. Kombinasyon anahtarının uçları aktif, pasif ve ortak uç olmak üzere bu uçlar sırasıyla İngilizce kelime karşılıklarından yola çıkarak "a", "p" ve "c" ile gösterilir. Devre üzerinde yer alan kontrol ve serbest geçiş anahtarları ortak uca, aktif anahtar aktif uca ve serbest geçiş anahtarı pasif uca bağlanır.



Şekil 2. (a) DA PWM anahtarı modeli (Dc PWM-switch model) (b) Tepe akım-modu kontrol için SİM modu çalışmada AA PWM anahtarı modeli (Ac PWM-switch model with peak current-mode control in CCM)

PWM anahtarı modeli DA bir başka deyişle büyük işaret eşdeğer modeline ve küçük işaret eşdeğer modellerine sahiptir. Şekil 2a PWM anahtarı modelinin DA eşdeğer devresini gösterirken, şekil 2b AA (alternatif akım) eşdeğer devresini tepe akım-modu kontrol için göstermektedir. Büyük işaret modeli bu çalışma için gerekli değildir ancak detaylı bilgi [10]'da bulunabilir. Şekil 2'de yer alan büyük harfli parametreler sürekli hal DA parametrelerini ifade ederken, inceltme işareti vurgusu (^) ile gösterilen küçük harfli parametreler küçük işaret (ya da AA) değişkenlerini ifade etmektedir.

Şekil 2'de yer alan model parametrelerinin karşılıkları (1)'de listelenmiştir.

$$k_o = \frac{1}{R_i}, \quad g_o = \frac{T_s}{L} \cdot \left( D' \cdot \frac{S_e}{S_n} + 0.5 - D \right),$$

$$g_f = D \cdot g_o - \frac{D \cdot D' \cdot T_s}{2 \cdot L}, \quad g_i = -\frac{I_a}{V_{ap}}, \quad (1)$$

$$g_r = \frac{I_c}{V_{ap}}, \quad C_s = \frac{4}{L \cdot \left( \frac{2\pi}{T_s} \right)^2}$$

Burada D sürekli haldeki darbe doluluk oranını,  $R_i$  PWM anahtarı ortak (c) ucundan kontrol gerilimine olan kazancı ( $\Omega$ ),  $T_s$  anahtarlama periyodunu (s), L ise (2) eşitliğindeki gibi hesaplanan eşdeğer indüktörü (H),  $D' = 1 - D$  darbe boşluk oranını,  $S_e$  kompanzasyon rampasının eğimini (V/s) ve  $S_n$  ise (3) eşitliğiyle hesaplanabilen PWM anahtarın ortak ucundaki (c) akımının kontrol gerilimine yansıyan eğimini (V/s) ifade etmektedir.

$$L = L_1 // L_2 = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (2)$$

$$S_n = \frac{V_{ac}}{L} \cdot R_i \quad (3)$$

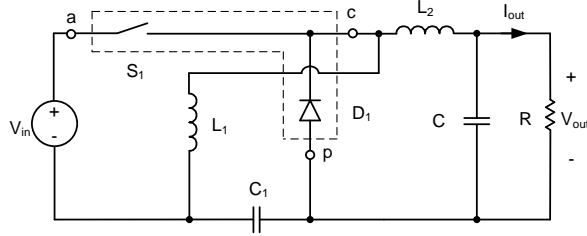
Şekil 2b'deki  $C_s$  kapasitesi akım çevrimindeki alt harmonik kararsızlıkları modellemek amacıyla devreye eklenmiştir. Model parametreleri konusunda daha detaylı bilgiye [10] ile ulaşılabilir.

PWM anahtarı modelini kullanmanın yolu öncelikle Şekil 2a'da verilen DA PWM anahtarı modelinin analiz edilerek DA-DA dönüştürücü topolojisi içine yerleştirilmesi ve ardından dönüştürücüye ait ortalama gerilim ve akım büyüklüklerinin ( $D$ ,  $I_a$ ,  $I_c$ ,  $V_{ap}$ ) çözülmesidir. Elde edilen bu çözümler (1) numaralı eşitlikte verilen küçük işaret PWM anahtarı modeli parametrelerinde kullanılır ve lineer bir model olan AA PWM anahtarı modeli dönüştürücü topolojisi içine yerleştirilerek kontrol işaretinden çıkış gerilimine olan transfer fonksiyonu elde edilir. Transfer fonksiyonunu elde etmek için kullanılacak bir diğer yöntem durum uzayı ortalama (state space averaging) tekniğidir ancak PWM anahtarı modelinin kullanılmasının durum uzayı ortalama tekniği üzerindeki en büyük avantajı matris işlemleri yerine lineer devre analizi yöntemlerinin kullanılmasıdır. [12]'de PWM anahtarı modeli kullanılan SEPIC dönüştürücünün (Zeta dönüştürücü duali) gerilim

modu kontrolü ele alınmıştır. Burada dönüştürücüye ait küçük işaret modeli, dönüştürücünün süreksiz iletim modunda çalışması için sembolik formda, bilgisayar destekli olarak elde edilmiştir.

### 3. ZETA DÖNÜŞTÜRÜCÜ KÜÇÜK İŞARET ANALİZİ (SMALL SIGNAL ANALYSIS OF ZETA CONVERTER)

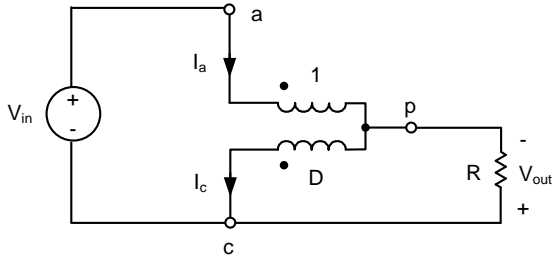
PWM anahtar modelini Zeta dönüştürücünün küçük işaret analizinde kullanabilmek için, Şekil 1'deki  $S_1$  ve  $D_1$  elemanlarının çevresindeki bağlantılarda değişiklik yapmak gerekmektedir. Bu amaçla  $C_1$  kondansatörü üst koldan alt kola alınmıştır. Bu değişiklik topolojide herhangi bir değişikliğe neden olmazken PWM anahtar modelinin kullanılmasına imkân verir. Şekil 3, PWM anahtar modeli ile analiz etmek için uygun hale getirilmiş izole edilmemiş Zeta dönüştürücü devresini göstermektedir.



Şekil 3. Zeta dönüştürücünün PWM anahtar modeliyle gösterimi (Representation of the Zeta converter by PWM-switch model)

#### 3.1. DA Analizi (DC Analysis)

Şekil 2a'daki DA PWM anahtar modeli kullanılarak Zeta dönüştürücünün DA parametrelerine ait ifadeler elde edilmelidir. Bu amaçla Şekil 3'teki  $L_1$  ve  $L_2$  indüktörleri kısa devre,  $C_1$  ve  $C$  kapasiteleri açık devre edilmiş ve DA PWM anahtar modeline Şekil 2a'da verilen eşdeğeri yerleştirilmiştir. Sonuçta Zeta dönüştürücünün DA eşdeğer devresi Şekil 4'te gösterildiği gibi elde edilir.



Şekil 4. Şekil 3'teki Zeta dönüştürücünün DA eşdeğer modeli. (DC equivalent model of the Zeta converter in Fig. 3.)

Kirchoff akım (KCL) ve gerilim kanunları (KVL) kullanılarak Şekil 4'te görülen devreye ait eşitlikler yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{D}{1-D}, \quad D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}, \\ V_{ap} &= \frac{V_{out}}{D}, \quad I_c = \frac{V_{out}}{R \cdot (1-D)}, \quad I_a = \frac{V_{out}}{R} \cdot \frac{D}{(1-D)}, \\ V_{ac} &= V_{in}, \quad V_{cp} = V_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 'teki devre parametrelerinin sürekli haldeki değerler olduğu dikkate alınmalıdır. Bu konuda daha detaylı bilgi için [2]'ye bakınız. Sürekli hal ifadeleri (1) ve (3)'te bulunan denklemlerde yerine konursa  $g_i$ ,  $g_r$  ve  $S_n$  şu şekilde yeniden yazılabilir:

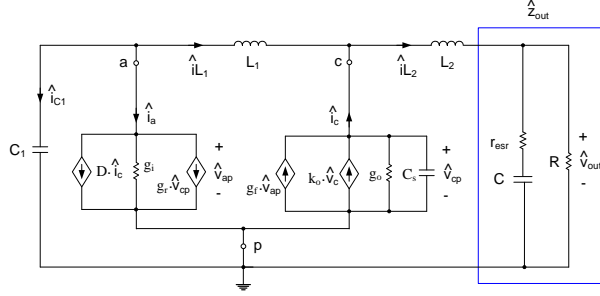
$$\begin{aligned} g_i &= -\frac{D^2}{R \cdot (1-D)}, \quad g_r = \frac{D}{R \cdot (1-D)}, \\ S_n &= V_{out} \cdot \frac{1-D}{D} \cdot \frac{R_i}{\frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}} \end{aligned} \quad (5)$$

#### 3.2. AA küçük işaret analizi (AC small signal analysis)

Giriş gerilimi  $V_{in}$ 'in kısa devre edilmesi ve AA PWM anahtar modelinin (Şekil 2b) Şekil 3'te yerine konulması ile Şekil 5'te gösterilen Zeta dönüştürücü için AA küçük işaret eşdeğer devresi elde edilir. Küçük işaret analizinin tamamlanabilmesi için  $\hat{v}_{out}/\hat{v}_c$  transfer fonksiyonunun Şekil 5'ten türetilmesi gerekmektedir.

KCL ve KVL yardımıyla Şekil 5'e ait aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$\begin{aligned} \hat{i}_a &= D \cdot \hat{i}_c + \hat{v}_{ap} \cdot g_i + g_r \cdot \hat{v}_{cp} \\ \hat{i}_c &= \hat{v}_{ap} \cdot g_r + k_o \cdot \hat{v}_c - \hat{v}_{cp} \cdot (g_o + s \cdot C_s) \\ \hat{v}_{cp} &= (\hat{i}_{L1} + \hat{i}_c) \cdot (s \cdot L_2 + \hat{z}_{out}) \\ \hat{v}_{ap} &= \hat{v}_{cp} - \left( \hat{i}_a + \frac{\hat{v}_{ap}}{1} \right) \cdot (s \cdot L_1) \\ \hat{i}_{L1} &= - \left( \hat{i}_a + \frac{\hat{v}_{ap}}{s \cdot C_1} \right) \\ \hat{v}_{out} &= (\hat{i}_{L1} + \hat{i}_c) \cdot \hat{z}_{out} \end{aligned} \quad (6)$$



Şekil 5. PWM anahtar modeli ile Zeta dönüştürücünün AA küçük işaret modeli (AC small signal model of the Zeta converter with PWM-switch model)

(6) 'daki denklemler aynı anda çözümlenerek,  $\hat{v}_{out}/\hat{v}_c$  aşağıdaki gibi türetilir:

$$\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_c} = \frac{k_o \cdot R \cdot (a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3)}{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + b_3 \cdot s^3 + b_4 \cdot s^4 + b_5 \cdot s^5} \quad (7)$$

Tablo 1, (7) 'de verilen transfer fonksiyonunun pay ve payda katsayılarını göstermektedir. Tablo 1'deki  $k_o$ ,  $g_o$ ,  $g_f$ ,  $g_i$ ,  $g_r$ ,  $C_s$  model parametreleri, eşitlik (1) 'de verilmiştir.

(7) 'deki transfer fonksiyonunun payı ve paydası, (8) 'de gösterildiği gibi düzenlenebilir.

$$\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_c} = K \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{o,z} \cdot Q_z} + \frac{s^2}{\omega_{o,z}^2}\right)}{\left[\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{o,p1} \cdot Q_{p1}} + \frac{s^2}{\omega_{o,p1}^2}\right)\right] \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{o,p2} \cdot Q_{p2}} + \frac{s^2}{\omega_{o,p2}^2}\right)} \quad (8)$$

(7)'de  $s=0$  yazılarak (8)'deki DA kazancı  $K$ , aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$K = \frac{k_o \cdot R \cdot a_0}{b_0} = \frac{k_o \cdot R \cdot (1-D)}{1+R \cdot (g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f))} \quad (9)$$

(1) ve (4) eşitlikleri (9)'da yerine konduğunda, DA kazancı  $K$  ifadesi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$K = \frac{R}{R_i} \cdot \frac{2S_n \cdot L(1-D)}{(1-D)^3 \cdot (2S_e + S_n)R \cdot T_s + 2L \cdot S_n(1+D)} \quad (10)$$

Eşitlik (8)'in pay kısmı tablo 1'de verilen  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  katsayıları kullanılarak (11)'deki gibi verilmiştir.

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{o,z} \cdot Q_z} + \frac{s^2}{\omega_{o,z}^2}\right) = (C \cdot r_{esr} \cdot s + 1) \cdot (C_1 \cdot L_1 \cdot s^2 + L_1 \cdot g_i \cdot s + 1 - D) \quad (11)$$

Tablo 1. Eşitlik (7)'deki transfer fonksiyonu katsayıları. (Coefficients of the transfer function in (7))

$$a_0 = 1 - D$$

$$a_1 = C \cdot r_{esr} \cdot (1 - D) + g_i \cdot L_1$$

$$a_2 = L_1 \cdot (C \cdot g_i \cdot r_{esr} + C_1)$$

$$a_3 = C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot r_{esr}$$

$$b_0 = \frac{1 + g_i \cdot R - g_f \cdot R + g_f \cdot D \cdot R - g_o \cdot D \cdot R + g_r \cdot R + g_o \cdot R}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

$$b_1 = \frac{g_i \cdot L_1 + C_s \cdot R + C \cdot R + g_f \cdot D \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} + g_o \cdot L_2 - g_f \cdot L_2 + g_i \cdot L_2 + g_r \cdot L_2 - D \cdot C_s \cdot R + C \cdot r_{esr} + g_r \cdot g_f \cdot L_1 \cdot R + g_r \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} - g_f \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} + g_i \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} + g_f \cdot D \cdot L_2 + g_o \cdot g_i \cdot L_1 \cdot R + C_1 \cdot R - g_o \cdot D \cdot L_2 + g_f \cdot D \cdot L_1 + g_o \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} - g_o \cdot D \cdot C \cdot R \cdot r_{esr}}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

$$b_2 = \frac{C_1 \cdot L_2 + C_1 \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} + g_o \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + C_1 \cdot L_1 + g_o \cdot g_i \cdot L_1 \cdot L_2 + g_i \cdot C_s \cdot L_1 \cdot R + g_o \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot R + g_i \cdot C \cdot L_1 \cdot r_{esr} - g_f \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_r \cdot g_f \cdot L_1 \cdot L_2 + C_s \cdot L_2 - g_f \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_f \cdot D \cdot C \cdot L_1 \cdot R + g_i \cdot C \cdot L_1 \cdot R + g_r \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_r \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_i \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_i \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} - D \cdot C_s \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} + C_s \cdot C \cdot R \cdot r_{esr} - g_o \cdot D \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_r \cdot g_f \cdot C \cdot L_1 \cdot R \cdot r_{esr} + g_o \cdot C \cdot L_2 \cdot R - g_o \cdot D \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_f \cdot D \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_f \cdot D \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_f \cdot D \cdot C \cdot L_1 \cdot r_{esr} - D \cdot C_s \cdot L_2 + g_o \cdot g_i \cdot C \cdot L_1 \cdot R \cdot r_{esr}}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

$$b_3 = \frac{g_r \cdot g_f \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot r_{esr} + C_1 \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_o \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + g_i \cdot C_s \cdot L_1 \cdot L_2 + C_s \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot R + g_r \cdot g_f \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R + C_s \cdot C \cdot L_2 \cdot R + g_o \cdot C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot R \cdot r_{esr} + C_1 \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_o \cdot g_i \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R + g_o \cdot g_i \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot r_{esr} + C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot R + C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot r_{esr} + C_s \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} - D \cdot C_s \cdot C \cdot L_2 \cdot R - D \cdot C_s \cdot C \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_i \cdot C_s \cdot C \cdot L_1 \cdot R \cdot r_{esr}}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

$$b_4 = \frac{g_o \cdot C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot r_{esr} + g_o \cdot C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R + g_i \cdot C_s \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot r_{esr} + C_s \cdot C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot R \cdot r_{esr} + C_s \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + g_i \cdot C_s \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

$$b_5 = \frac{C_s \cdot C_1 \cdot C \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot (R + r_{esr})}{g_r \cdot R + g_o \cdot R}$$

Burada sıfır çiftine ek olarak çıkış kapasitesi (C) esr'si kaynaklı bir sıfır daha görülmektedir. (11) eşitliğinin sağ ve sol tarafı eşitlendiğinde  $\omega_z$ ,  $\omega_{o,z}$  ve  $Q_z$  çözümleri sırasıyla (12), (13) ve (14)'teki gibi elde edilir.

$$\omega_z = \frac{1}{C \cdot r_{esr}} \quad (12)$$

$$\omega_{o,z} = \sqrt{\frac{1-D}{C_1 \cdot L_1}} \quad (13)$$

$$K = \frac{R}{R_i} \cdot \frac{2S_n \cdot L(1-D)}{(1-D)^3 \cdot (2S_e + S_n)R \cdot T_s + 2L \cdot S_n(1+D)} \quad (14)$$

(14) eşitliğinden  $Q_z$ 'nin her zaman negatif değeri olacağı görülmektedir. Bu sonuç sıfır çiftinin sağ yarı s düzleminde yer aldığını gösterir. Ayrıca,  $|Q_z| > 0.5$  olması durumunda bu sıfır çifti karmaşık eşleniktir.

(8) eşitliğinin paydası 5. mertebeden bir polinom olduğundan kutupların ifadelerinin herhangi bir varsayımı yapılmaksızın sembolik formda elde edilmesi mümkün değildir.  $\omega_{o,p2}$ ,  $C_s$  kapasitesi tarafından belirlenen bir açısal frekanstır ve anahtarlama frekansı açısal değerinin yarısı civarında bir değere sahiptir. Bu nedenle  $\omega_{o,p1} \ll \omega_{o,p2}$  varsayımını pratikte kabul etmek makuldür. Buna ek olarak  $\omega_p \ll \omega_{o,p1}$  varsayımı yapılması halinde  $\omega_p$ ,  $\omega_{o,p1}$ ,  $\omega_{o,p2}$ ,  $Q_{p1}$  ve  $Q_{p2}$  için yaklaşık sembolik çözümler (15) – (17) eşitliklerindeki gibi elde edilebilir. (Bir polinomun köklerine ait yaklaşık çözümlerin bulunması konusunda detaylı bilgi için [13]'ün 8.1.8 bölümüne bakınız.)

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right) \cong \left(1 + s \cdot \frac{b_1}{b_0}\right) \quad (15)$$

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_{o,p1} \cdot Q_{p1}} + \frac{s^2}{\omega_{o,p1}^2}\right) \cong \left(1 + \frac{b_2}{b_1} \cdot s + \frac{b_3}{b_1} \cdot s^2\right) \quad (16)$$

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_{o,p2} \cdot Q_{p2}} + \frac{s^2}{\omega_{o,p2}^2}\right) \cong \left(1 + \frac{b_4}{b_3} \cdot s + \frac{b_5}{b_3} \cdot s^2\right) \quad (17)$$

Eşitliklerin (15 – 17) sağ ve sol tarafları eşitlendiğinde (18) elde edilir. Tablo 1'de verilen  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  ve  $b_5$  (18) eşitliğinde yerine konup gerekli sadeleştirme işlemleri yapıldığında;  $\omega_p$ ,  $\omega_{o,p1}$ ,  $\omega_{o,p2}$ ,  $Q_{p1}$  ve  $Q_{p2}$ 'ye ait eşitlikler (19) – (23)'teki gibi elde edilir. (19) – (21)

eşitliklerinde kolaylık olması amacıyla  $r_{esr} = 0$  ve  $C_s = 0$  varsayımları yapılmıştır. (22) ve (23) eşitliklerinde ise  $r_{esr} = 0$  varsayımı yapılmasına rağmen  $C_s$ ,  $\omega_{o,p2}$ 'yi anahtarlama açısal frekansının yarısına yerleştirdiğinden  $C_s = 0$  varsayımı yapılamaz.

$$\omega_p = \frac{b_0}{b_1}, \quad \omega_{o,p1} = \sqrt{\frac{b_1}{b_3}}, \quad Q_{p1} = \frac{\sqrt{b_1 \cdot b_3}}{b_2}, \quad (18)$$

$$\omega_{o,p2} = \sqrt{\frac{b_3}{b_5}}, \quad Q_{p2} = \frac{\sqrt{b_3 \cdot b_5}}{b_4}$$

$$\omega_p = \frac{1+R \cdot [g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f)]}{\left( L_1 \cdot [g_i + R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o) + D \cdot g_f] + L_2 \cdot [g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f)] + R \cdot (C + C_1) \right)} \quad (19)$$

$$\omega_{o,p1} = \sqrt{\frac{\left( R \cdot (C + C_1) + L_2 \cdot [g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f)] + L_1 \cdot [g_i + R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o) + D \cdot g_f] \right)}{\left( L_1 \cdot L_2 \cdot \left[ \frac{C_1 \cdot g_o + C \cdot R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o)}{L_1 \cdot C \cdot C_1 \cdot R + C \cdot C_1 \cdot L_2 \cdot R} \right] + \right)}} \quad (20)$$

$$Q_{p1} = \frac{\left( R \cdot (C + C_1) + L_2 \cdot (g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f)) + L_1 \cdot (g_i + R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o) + D \cdot g_f) \right)}{\left( L_1 \cdot \left[ \frac{L_2 \cdot C \cdot R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o)}{L_2 \cdot C_1 \cdot g_o + C \cdot C_1 \cdot R} \right] + C \cdot C_1 \cdot L_2 \cdot R \right)} \cdot \frac{1}{\left( L_1 \cdot [C_1 + R \cdot (C_1 \cdot g_o + C \cdot (g_f \cdot D + g_i))] + L_2 \cdot [C \cdot R \cdot (g_i + g_r + (1-D) \cdot (g_o - g_f)) + C_1 + L_1 \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o)] \right)} \quad (21)$$

$$\omega_{o,p2} = \sqrt{\frac{\left( C_1 \cdot C \cdot R \cdot L_2 + C_s \cdot \left[ \frac{(1-D) \cdot C \cdot R \cdot L_2}{L_1 \cdot (g_i \cdot L_2 + C_1 \cdot R)} \right] + L_1 \cdot \left\{ \frac{C_1 \cdot C \cdot R + L_2 \cdot C_1 \cdot g_o}{L_2 \cdot C \cdot R (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o)} \right\} \right)}{C \cdot C_1 \cdot R \cdot L_2 \cdot L_1 \cdot C_s}} \quad (22)$$

$$Q_{p2} = \frac{\left[ \begin{array}{l} C_s \cdot \left[ \begin{array}{l} (1-D) \cdot C \cdot R \cdot L_2 \\ + L_1 \cdot (g_1 \cdot L_2 + C_1 \cdot R) \end{array} \right] + \\ C_1 \cdot C \cdot R \cdot L_2 + \\ L_1 \cdot \left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot C \cdot R + L_2 \cdot C_1 \cdot g_o + \\ L_2 \cdot C \cdot R \cdot (g_f \cdot g_r + g_i \cdot g_o) \end{array} \right\} \\ (C_1 \cdot C_s \cdot C \cdot R \cdot L_2 \cdot L_1) \end{array} \right]}{L_2 \cdot L_1 \cdot [C_1 \cdot C_s + C \cdot R \cdot (C_1 \cdot g_o + C_s \cdot g_i)]} \quad (23)$$

Özetle, (8)'deki transfer fonksiyonu, bir reel sıfıra ( $\omega_z$ ), sağ yarı düzlemde bir sıfır çiftine ( $\omega_{o,z}$ ), bir düşük frekanslı reel kutba ( $\omega_p$ ), orta frekans bölgesinde bir kutup çiftine ( $\omega_{o,p1}$ ) ve yüksek frekans bölgesinde (anahtarlama frekansının yarısı civarında) bir kutup çiftine ( $\omega_{o,p2}$ ) sahiptir.

(22)'deki  $\omega_{o,p2}$  ifadesi, bir dizi model parametresi içermektedir ancak, (1)'de hesaplanan  $C_s$ , anahtarlama frekansının yarısında bir rezonans frekansına sahip olduğundan aslında  $\omega_{o,p2} \cong \pi \cdot f_s$  ifadesini kullanmak yanlış olmayacaktır.

#### 4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu çalışmada sunulan analiz, çıkış kondansatörünün esr'sini hesaba katmaktadır, ancak transfer fonksiyonu boyutunu makul bir seviyeye getirmek için Zeta dönüştürücünün güç topolojisindeki diğer reaktif bileşenlerin parazitik dirençlerini dikkate almamaktadır. Hâlbuki pratik dünyada bu parazitik dirençler de mevcuttur. Deney düzeneği kurularak transfer fonksiyonu laboratuvar ortamında çıkarılırsa, bu analizde göz ardı edilen parazitik dirençlerin, sunulan sonuçlara kıyasla transfer fonksiyonunda bazı frekanslar için bir miktar sapmaya neden olduğu görülebilir.

Ölçülen ve hesaplanan transfer fonksiyonları arasındaki farkın olası bir başka nedeni ise deney düzeneğinde meydana gelebilecek olan gürültüdür. Dönüştürücünün çalışma noktasını bozmamak için birkaç mili volt genellikle enjekte edilmiş sinüzoidal sinyal ile küçük işaret ölçümü gerçekleştirilmesi, ölçüm düzeneğini gürültüye karşı duyarlı hale getirir. Deney düzeneğindeki gürültü seviyesini düşürmek için; sinyal iletim tellerini ve gürültüyü algılayan problemleri ekranlama gibi yollarla korumak, deney düzeneğinin toprağı ve ölçüm aletinin toprağını aynı noktaya bağlamak ve farklı frekanslarda enjekte edilen sinyalin genliğini devrenin DC çalışma noktasını bozmayacak şekilde ayarlamak gibi gerekli önlemler alınmalıdır. Devre üzerindeki elemanların düzgün yerleşimi, ölçümdeki gürültü seviyesini

düşürmeyi sağlayacak bir başka önemli husustur. Bu nedenle, gürültünün ölçüm sonuçlarındaki etkisini en aza indirmek için güç elektroniği devre çizim kurallarına uyulmalıdır.

Ele alınan güç elektroniği devrelerinin pratik uygulamalarında akım, anahtar veya devredeki indüktör gibi güç bileşenlerinden birisi aracılığıyla algılanır. PWM anahtar modelinin, "c" terminal akımının ölçülmesi üzerine kurulması, Şekil 3'teki  $S_1$  ve  $D_1$  anahtarlarının veya  $L_1$  ve  $L_2$  indüktörlerin akımlarının toplanmasını gerektirir. Bu da teorik çalışmanın pratik uygulamalarında ortaya çıkabilecek en temel zorluklardan birisidir.

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede izole edilmemiş Zeta dönüştürücü topolojisinin dinamik analizi yapılmıştır. Bu analizde sürekli iletim modunda çalışma için PWM anahtarı modeliyle tepe akım modu kontrollü bir yapı ele alınmıştır. Kontrol işaretinden çıkış gerilimine transfer fonksiyonu başarıyla türetilmiştir. Transfer fonksiyonu kutupları ve sıfırları analiz edilmiştir. Transfer fonksiyonu, bir reel sıfıra, sağ yarı düzlemde bir sıfır çiftine, düşük frekans bölgesinde bir reel kutba, orta frekans bölgesinde bir kutup çiftine ve anahtarlama frekansının yarısı civarında (yüksek frekans bölgesinde)  $180^\circ$ 'lik faz çevirici etki yapan bir kutup çiftine sahiptir. Transfer fonksiyonunun paydası beşinci mertebeden olduğundan, kutupların ve kalite faktörlerinin sembolik denklemleri kutupların birbirinden yeterince uzak olduğu varsayımı yapılarak yaklaşık olarak elde edilmiştir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J. J. Jozwik ve M. K. Kazimierczuk, "Dual sepic PWM switching-mode DC/DC power converter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 36, no. 1, pp. 64-70, 1989.
- [2] A. Ioinovici, Power electronics and energy conversion systems, fundamentals and hard-switching converters, John Wiley & Sons, 2013.
- [3] J. de Britto, A. Junior, L. de Freitas, V. Farias, E. Coelho ve J. Vieira, "Zeta DC/DC converter used as led lamp drive", *In IEEE European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007.
- [4] H. Khaleghi, A. Y. Varjani ve M. Mohamadian, "A new bidirectional zeta DC/DC converter", *In IEEE Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2014.
- [5] A. M. S. S. Andrade, J. R. Dreher ve M. L. d. S. Martins, "High step-up integrated DC-DC converters: methodology of synthesis and analysis", *In IEEE Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2013.

- [6] A. Trejos, C. A. Ramos-Paja ve S. Serna, "Compensation of DC-link voltage oscillations in grid-connected PV systems based on high order dc/dc converters", *In IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE)*, 2012.
- [7] R. Redl ve N. O. Sokal, "Current-mode control, five different types, used with the three basic classes of power converters", *In IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1985.
- [8] E. Vuthchhay, C. Bunlaksananusorn ve H. Hirata, "Dynamic Modeling and Control of a Zeta Converter", *In IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2008.
- [9] V. Vorperian, "Analysis of current-mode controlled PWM converters using the model of the current-controlled PWM switch", *In Power Conversion and Intelligent Motion Conference*, 1990.
- [10] V. Vorperian, *Fast analytical techniques for electrical and electronic circuits*, Cambridge University Press, 2002.
- [11] V. Vorperian, "Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. Part I: Continuous conduction mode.", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, cilt 26, no. 3, pp. 497-505, 1990.
- [12] E. Cengelci, "Software Makes Transfer Functions More Manageable", *Power Electronics Technology*, cilt 34, no. 6, pp. 14-21, 2008.
- [13] R. W. Erickson ve D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, 2004.