

Cilt 1 Sayı 2 Aralık 2020  
Volume 1 Number 2 December 2020

ISSN: 2717-8811(Online)

**JOURNAL**

**Materials  
and  
Mechatronics:A**

**Editor-in-Chief  
Yusuf KAYALI**

# **JOURNAL**

**Materials**

**and**

**Mechatronics: A**

**e-ISSN: 2717-8811**

**Cilt: 1 Sayı: 2 Aralık 2020**

**Volume:1 Number:2 December 2020**

**Editor-in-Chief**

**Yusuf KAYALI**

# JOURNAL of MATERIALS and MECHATRONICS:A

<b>Editör Kurulu / Editorial Board</b>		
Yusuf KAYALI (Editor-in-Chief)	ykayali@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Şükrü TALAŞ (Section Editor)	stalas@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Aysel BUYUKSAĞIŞ (Section Editor)	absagis@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Said Mahmut ÇINAR (Section Editor)	smcinar@aku.edu.tr	Afyon Kocatepe University, TURKEY

<b>Danışma Kurulu / Advisory Board</b>	
Dr. Adem KURT	Gazi University, TURKEY
Dr. Adnan MAQBOOL	Institute of Space Technology, PAKISTAN
Dr. Ali GÜNEN	İskenderun Teknik University, TURKEY
Dr. Ali Sabea HAMMOOD	University of Kufa, IRAQ
Dr. Anas Al ATTIEH	German University of Jordan, JORDAN
Dr. Anne Schuzl BEENKEN	South Westphalia University of Applied Sciences, GERMANY
Dr. Aytekin HİTİT	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Dursun ÖZYÜREK	Karabük University, TURKEY
Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Hazizan Md AKİL	Sains Malaysia University, MALAYSIA
Dr. İsmail YABANOVA	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Kubilay ASLANTAŞ	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Michał KULKA	Poznan University of Technology, POLAND
Dr. M. Serhat BAŞPINAR	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Metin ÖZGÜL	Afyon Kocatepe University, TURKEY
Dr. Mourad KEDDAM	University of Science and Technology Houari Boumediene, ALGERIA
Dr. Oğuz ARSLAN	Bilecik Seyh Edebali University, TURKEY
Dr. Ramazan KAÇAR	Karabük University, TURKEY
Dr. Selçuk AKTÜRK	Muğla University, TURKEY
Dr. Süleyman GÜNDÜZ	Karabük University, TURKEY
Dr. Shabana SHEIK	University of Pune, Department of Physics, INDIA
Dr. Sumanjit SINGH	Senior Audi Engineer, GERMANY
Dr. Yılmaz YALÇIN	Afyon Kocatepe University, TURKEY

<b>Yayımcı / Publisher</b>	
Yusuf KAYALI	ykayali@aku.edu.tr

JOURNAL of  
**MATERIALS and MECHATRONICS:A**

İçindekiler/Contents	Sayfa/Page
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Entegre Demir Çelik Fabrikasında Pulverize Kömür Enjeksiyon (PCI) Uygulaması Pulverized Coal Injection (PCI) Application in Integrated Iron and Steel Factory Bölükbaşı, Ö. S.</p>	55-65
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Bağlantı Bölgelerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi Investigation the Mechanical Behavior of Joints of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Atlı, İ.S., Kurt, R., Yeşil, M.</p>	66-75
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Heat Treatment and Microstructural Analysis of 54SiCr6 and 60SiMn5 Spring Steels 54SiCr6 ve 60SiMn5 Yay Çeliklerinin Isıl İşlemi ve Mikroyapısal Analizi Talaş, Ş., Sarı, M.S., Sow, A., Aktaş, H.</p>	76-84
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>Rulmanlı Yatak Uygulamaları için Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen ve Döküm Poliamit Termoplastik Esaslı Polimerlerin Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması Comparison of Tribological Performance of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene and Casting Polyamide Thermoplastic Based Polymers for Roller Bearing Applications Ünal, H., Ermiş, K.</p>	85-96
<p><b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b></p> <p>3 Serbestlik Dereceli Kaynak Konumlandırıcının İleri Kinematik Modelinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi Obtaining Forward Kinematic Model of 3 Degrees of Freedom Welding Positioner by Artificial Neural Networks Ada, Ş., Çaşka, S.</p>	97-102

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Entegre Demir Çelik Fabrikasında Pulverize Kömür Enjeksiyon (PCI) Uygulaması**

Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimler Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İskenderun, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8862-009X>, osaltuk.bolukbasi@iste.edu.tr

**Geliş/ Recieved:** 17.07.2020;

**Kabul / Accepted:** 17.08.2020

**ÖZET:** Pulverize kömür (PC), metalurjik kok kömürü ile birlikte yüksek fırına şarj edilmekte ancak tamamı ile metalurjik kok kömürü yerine kullanılamamaktadır. Metalurjik kok kömürü yüksek fırın içinde sadece yakıt olarak değil, aynı zamanda fırının gaz geçirgenliğini düzenleme, demir cevheri ve flaks malzemelerinin fırın içinde düzgün dağılmasını sağlama ve termal stresleri azaltma gibi işlevleri de yerine getirmektedir. Pulverize kömür enjeksiyon (PCI) sisteminin de yüksek fırına, pozitif ve negatif bazı etkileri vardır. Olumsuz etkileri yok etmek veya en az seviyeye indirmek, olumlu etkilerinden de en iyi şekilde yararlanmak gerekmektedir. PCI'unun yüksek verimle kullanabilmesi, yüksek fırındaki tüm parametrelerin optimizasyonunun sağlanması ile mümkündür. Pulverize kömür enjeksiyonu süresince optimize edilmesi gereken tüm faktörlerin ve proses parametrelerinin optimum bir değer aralığında olması gerekmektedir. Bu çalışmada, bir entegre demir çelik fabrikasında yakıt olarak PCI kullanımından önce ve sonra elde edilen kalite değerlerinin yüksek fırın performansına etkileri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Pulverize kömür, Enjeksiyon, Yüksek fırın, Metalurjik kok, Yakıt.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [osaltuk.bolukbasi@iste.edu.tr](mailto:osaltuk.bolukbasi@iste.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Bölükbaşı, Ö.S. (2020). Entegre Demir Çelik Fabrikasında Pulverize Kömür Enjeksiyon (PCI) Uygulaması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 55-65.

## **Pulverized Coal Injection (PCI) Application in Integrated Iron and Steel Factory**

**ABSTRACT:** Pulverized coal (PC) is charged to the blast furnace along with metallurgical coke, but it cannot be used as a substitute for metallurgical coke completely. Metallurgical coke not only serves as fuel in the blast furnace, but also performs functions such as regulating the gas permeability of the furnace, ensuring uniform distribution of iron ore and flux materials in the furnace and reducing thermal stresses. Pulverized coal injection (PCI) system also has some positive and negative effects on the blast furnace. It is necessary to eliminate or minimize the negative effects and make the most of the positive effects. Using PCI with high efficiency is possible by optimizing all parameters in the blast furnace. All factors and process parameters that need to be optimized during pulverized coal injection must be within an optimum range of values. In this study, the effects of quality values obtained before and after the use of PCI as fuel in an integrated iron and steel factory on blast furnace performance were investigated.

**Keywords:** Pulverized coal, Injection, Blast furnace, Metallurgical coke, Fuel.

### **1. GİRİŞ**

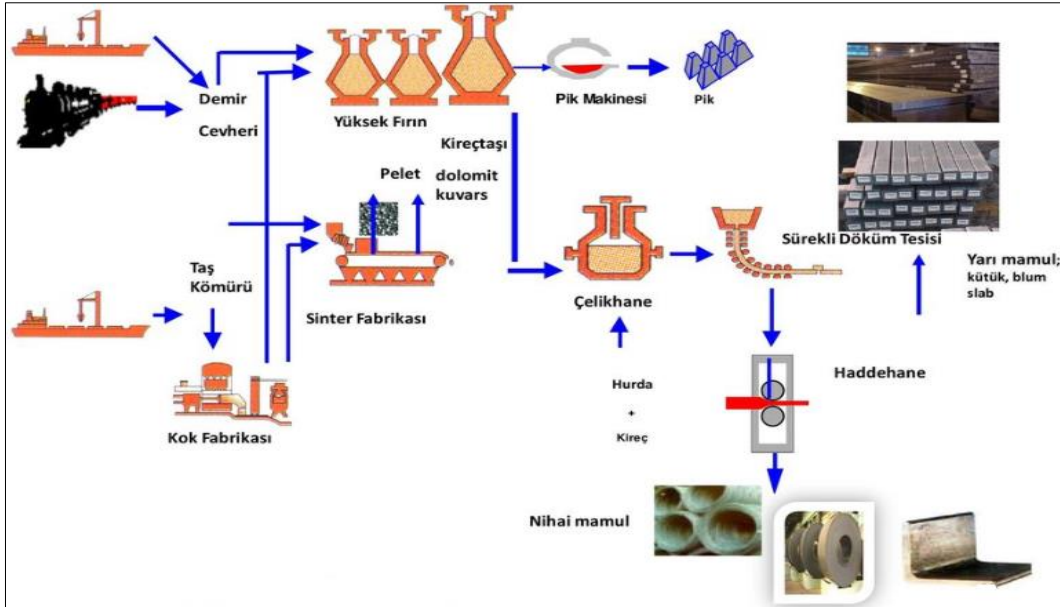
Demir çelik sektörü dünya ve Türkiye açısından büyük önem arz etmektedir. 2019 yılı itibariyle dünyanın toplam çelik üretimi 1.869 milyar ton civarında olup; bu miktarın yaklaşık %2 kadarı Avrupa çelik üretiminde 2. sırada olan Türkiye tarafından üretilmektedir. 2019 yılında Türkiye’de 20,3 milyon ton uzun, 13,4 milyon ton yassı olmak üzere 33,7 milyon ton seviyelerinde çelik üretimi gerçekleşmiştir (İnt.Ky.1).

Pulverize kömür enjeksiyonu, ham kömürün PCI ünitesinde boyut küçültme ve kurutma işlemlerinden sonra, boyutunun 80 mikron, nem oranının ise %1’in altına düşürülerek yüksek fırınlara tüyerlerden şarj edilmesi işlemidir (Poos ve Pongis, 1990; Babich, 2017). Dünya çelik sektöründe, giderek yoğunlaşan rekabet koşullarında firmaların başarılı olabilmeleri ancak rakiplerine karşı rekabet avantajı sağlayabilecek tedbirleri alabilmeleri ile mümkün olmaktadır (Yongning, 1995; Ahmed, 2018). Bu bağlamda, modern üretim anlayışı çerçevesinde maliyet düşürücü ve kapasite arttırıcı yatırımların firmalar tarafından gerçekleştirilebilmesi önem arz etmektedir (Babich ve Senk, 2019; Isao ve Morimasa, 2004). Günümüzde birçok modern ve teknolojik yüksek fırınlarda özellikle enerji ve maliyet tasarrufu sağlamak, fırın hacminden daha fazla faydalanmak ve dolayısıyla birim zamanda üretim artışı elde etmek için Pulverize Kömür Enjeksiyon (PCI) Sistemleri kullanılmaktadır (Peters ve ark., 1990; Ishii, 2000). Bilindiği üzere yüksek fırınlarında mevcut durumda metalürjik koka ilave olarak herhangi bir yakıt (doğalgaz, katran, fuel oil vs.) PCI sistemi kadar etkin kullanılamamaktadır. Günümüz çelik sektöründe pazardaki rekabet koşulları büyük oranda fiyat politikalarına dayalı olarak gelişmektedir. Entegre demir çelik tesislerinde, ton sıvı ham demir başına (TSHD) yüksek fırına şarj edilmesi hedeflenen PC miktarı 100-150 kg/ton arasında değişmektedir (Du, 2015; Yan ve ark., 2014).

### **2. YÜKSEK FIRIN PROSESİ**

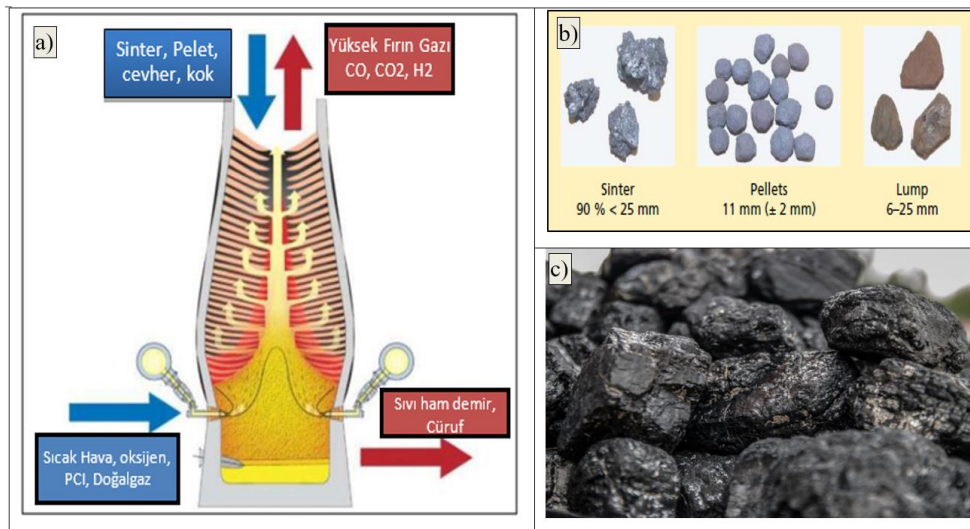
Çelik üretiminde iki farklı metot kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek fırın, diğeri elektrik ark fırın metodudur. Bu iki metot birbirlerinden hem kullanılan hammadde hem de üretilen malzeme açısından farklılık göstermektedir. Yüksek fırın prosesi genel olarak yassı ürünler üretimi ile öne çıkarken, elektrik ark fırın prosesi ise daha çok uzun ürünlerde ön plana çıkmaktadır (Yeh ve ark, 2012). Birincil üretim olan yüksek fırın prosesi kok ve kömürü redükleyici kaynak olarak

kullanarak; sinter, pelet ve parça cevherden çelik üretimi yaparken; ikincil üretim olan elektrik ark fırın prosesi elektrik enerjisi ile hurda ergitme işlemi yapmaktadır (Maki ve ark., 1996). Günümüzdeki ark fırınlarının da yassı üretim yapabilme kapasiteleri bulunmaktadır. Fakat yüksek fırın ve çelikhane metodu hala dünyada öncelikli çelik üretim şekli olarak yerini korumaktadır (Peacy ve Davenport, 2016). Şekil 1’de tipik bir entegre demir çelik tesisi üretim akım şeması görülmektedir.



Şekil 1. Entegre demir ve çelik tesisi proses akım şeması (Çimen, 2014)

Yüksek fırın, demir içerikli şarj malzemeleri ile fırın altından üflenen sıcak hava arasındaki karşılıklı ısı değişim ve indirgeyici yakıt ile oksijenin cevheri redüklemesiyle kütle transferinin gerçekleştiği ortam olarak düşünülebilir. Fırın içerisinde yük aşağı doğru hareket ederken sıcak gaz yukarı doğru hareket etmektedir (Biswas, 1981). Yüksek fırında hareket yönü ve çıkışı temsili olarak Şekil 2-a’da, kullanılan demir içerikli hammaddeler Şekil 2-b’de, yakıt ve indirgen olarak kullanılan metalurjik kok kömürü Şekil 2-c’de görülmektedir.



Şekil 2-a) Yüksek fırın girdi ve çıktıları (Geerdes ve ark., 2015), 2-b) Yüksek fırın demir içerikli şarj malzemeleri (Geerdes ve ark., 2015, 2-c) Metalurjik kok kömürü (Chaigneau ve ark., 2009)

Tamamen karbondan oluşan, iç yapısındaki kuvvetli bağ yapısı nedeniyle ergimeyen ve indirgen bir özelliğe sahip olan kok, yüksek fırın için olmazsa olmaz bir malzemedir. Kok oksijenle gerçekleştirdiği reaksiyon sonucu cevheri ergitmek için gerekli olan sıcak gaz üretiminde kullanılır. Yüksek fırın prosesinde cevherin ergimesi ve kok tüketimi fırın içerisinde boşluk oluşturur ve bu boşluk da sürekli olarak yukarıdan inen malzeme tarafından doldurulur. Üflenen hava içerisindeki oksijen, karbon monoksit (CO) üretmek için koku gazlaştırır (Suzuki ve ark., 1986; Wozek, 1990). Yüksek fırına gönderilen sıcak hava, fırın içerisindeki kok ve cevher katmanlarından geçerek fırının tepesine ulaşır.

Yüksek fırın prosesinde demir cevheri ve redükleyiciler (kok ve kömür) ergimiş metalin oluşmasını sağlar. Cüruf, demir cevherinin gang minerallerinden, kok ve kömür tozlarından oluşur. Ergimiş metal ve akışkan cüruf birbirleriyle karışmazlar ve yoğunluk farklarından dolayı cüruf üst tarafta kalacak şekilde ergimiş metalin üzerinde yüzer. Böylece döküm esnasında ergimiş demir cüruftan kolaylıkla ayrışır (Schoppa, 1992).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Demir çelik sektöründe maliyet açısından PCI'nun avantajından dolayı çelik sektöründe rekabetin bir ölçüsü olarak, özellikle son 15 yılda yüksek fırınlarda metalurjik kok kömürünün yanında PCI kullanımına yönelik çalışmalar artmıştır. Laboratuvar çalışmaları, simülasyon denemeleri ve yüksek fırınlarda fiili olarak uygulanan testler ile PCI teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Yüksek fırın işlemi çok karmaşık ve oldukça etkileşimli bir işlem olduğundan, yüksek fırınlarda aktif olarak yapılan çalışmaların sonuçları laboratuvar testleri ve simülasyon denemeleri ile desteklenmektedir. Bu çalışmada, PCI teknolojisine geliştirilmesine yardımcı olmak için, entegre demir çelik fabrikasında PCI uygulamasının yüksek fırın performansı üzerine etkileri araştırılmış ve yorumlanmıştır. Kömür hazırlama sistemi, ham kömürün depolanması, öğütülmesi, kurutulması, filtrelenmesi, Pulverize kömürün depolanması aşamalarını kapsayan işlemler bütünüdür. Deneysel çalışmalar çoğunlukla kömür enjeksiyon oranlarının değiştirilmesi ve işlem üzerindeki etkilerinin gözlenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, enjeksiyon tankları ve enjeksiyon sistemi ile başlamaktadır. Yüksek fırınlara pnömatik olarak kömür transferi ve tüyerlere kömür enjeksiyonu ile sonlanmaktadır. Şekil 3'de çalışmada kullanılan öğütülmüş 80 mikron altı kömür tozu makro fotoğrafı görülmektedir. PCI sistem kömürünün, teknik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de, metalurjik kokun kimyasal analiz değerleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Yüksek fırına şarj edilen demir içerikli sinter, pelet ve parça cevher malzemelerinin kimyasal kompozisyonu da Çizelge 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Pulverize kömür (<80 mikron)



**Çizelge 1.** Test çalışmalarında kullanılan PCI kömürünün teknik ve kimyasal özellikleri

Kömür Cinsi	Kömür Teknik Özellikleri (%)				Kömür Kimyasal Özellikleri (%)				
	Kül (%)	Uçucu (%)	Karbon (%)	Isı (Cal/Kg)	S	C	H	N	O
1	12,20	34,01	56	6928	0,59	74,01	4,55	1,69	8,52
2	11,10	34,23	57	6889	0,39	79,01	4,81	1,52	2,95
3	8,45	32,09	63	6954	0,45	80,06	4,56	1,77	4,58
4	10,78	24,06	59	7230	0,39	78,32	4,72	1,46	2,93
<b>Ortalama</b>	<b>10,63</b>	<b>31,10</b>	<b>58,75</b>	<b>7000</b>	<b>0,46</b>	<b>77,85</b>	<b>4,66</b>	<b>1,61</b>	<b>4,75</b>

**Çizelge 2.** Test çalışmalarında kullanılan kokun kimyasal analiz değerleri ve fiziksel özellikleri

% Nem	% Kül	% Uçucu	Karbon (C)	%S	Stabilite	+75mm.	+25mm.	-25mm.
5,21	10,22	0,98	84,98	0,62	57	7	87	6

**Çizelge 3.** Test çalışmalarında kullanılan demir içerikli malzemelerin kompozisyonu (%)

Demirli Malzeme	Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Mn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
<b>Sinter</b>	56,25	9,01	5,98	0,98	2,11	9,31	2,18	0,02	0,03	0,05
<b>Pelet</b>	62,21	7,50	3,44	1,25	1,67	1,58	1,18	0,01	0,02	0,01
<b>Parça Cevher</b>	58,93	8,10	3,36	1,46	1,22	0,52	0,18	0,07	0,06	0,02

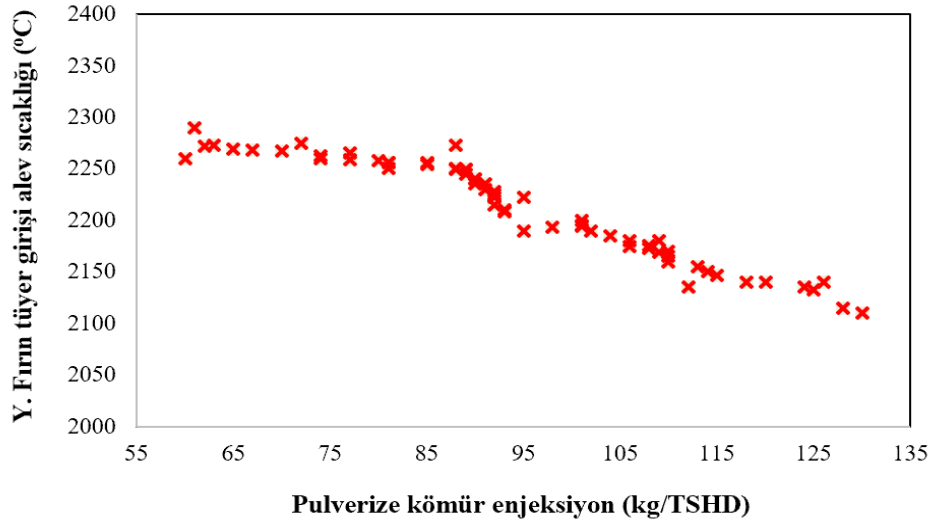
Test çalışmaları PCI kömürü kullanılmadan önce ve kullanıldıktan sonra; yüksek fırına üflenen hava sıcaklığı ve yüksek fırın verimliliği açısından incelenmiş ve yorumlanmıştır. Bu çalışmada, düşük koklaşma özelliğine sahip bitümlü kömürler, yüksek fırına kömür enjeksiyonu için kullanılmıştır. Yüksek fırın gaz geçirgenliği ve tüyer alev sıcaklığında meydana gelen değişimlerin yüksek fırın prosesinde oluşturduğu değişimler grafikler ile anlatılmıştır. Sıcaklık ölçümleri termokupol ile yapılmış olup, değerler sistem üzerinden günlük ortalama alınarak takip edilmiştir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Boyutu küçültülmüş PCI'nun yüksek fırın kalitesi üzerindeki etkileri; sistemin yüksek fırınlarda kullanımı esnasında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Yüksek fırın işleminin çok kompleks bir faaliyet olması ve işlemin her aşamasının birebir yansıtılmasının çok zor olması nedeniyle test çalışmalarından elde edilen sonuçları formüle etmek yerine, sürecin etkileri ve eğilimleri ortaya konmuştur. Bu çalışmadan elde edilen veriler yüksek fırının proses özelliklerine, hammaddelerin kalitesine, mevcut teknik sistemlere ve üretim stratejisine göre değişim gösterebilir. Bununla birlikte, genel eğilimler ve etkiler açısından yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar dünyadaki yüksek fırınlardan elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

##### 4.1 PCI Kömür Kullanımının Fırın Tüyer Alev Sıcaklığı Üzerine Etkisi

Yüksek fırınlarda gerçekleştirilen testlerde kullanılan PCI ile tüyer alev sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 4'de görülmektedir. Bu aşamada, Pulverize kömür enjeksiyonunun sadece alev sıcaklığına etkisinin araştırılması amaçlandığı için, diğer proses değişkenleri (hava sıcaklığı, oksijen miktarı, nem, şarj edilen hammadde miktarları) sabit tutulmuş ve PCI miktarı belli oranlarda arttırılmıştır. Şekil 4'de görüldüğü gibi, PCI kömür kullanımı ton sıvı ham demir başına (TSHD) 60 kg'dan 130 kg'a kadar arttırıldığı zaman tüyer alev sıcaklığı 2250 °C'den 2150 °C'ye düşmüştür.



**Şekil 4.** PCI kömür kullanım oranı ile tüyer girişi alev sıcaklığı değişimi

Tüyer alev sıcaklığındaki bu düşüş, erime kapasitesinde bir azalma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu da metalurjik kömür kullanımını düşürmeyi hedefleyen PCI uygulaması mantığına terstir. Yüksek fırın ile çelik üretimde tüyer alev sıcaklığının sabit ve optimal bir değerde olması arzu edilir. Tüyer alev sıcaklığının değişkenlik göstermesi, yumuşama-erime bölgesinin (yapışkan bölge) bozulmasına ve yüksek fırın prosesinin kontrol edilememesine neden olur. Bu durum da fırın gövdesinde ısı yükünün artması, fırın içi ısı dengesinin bozulması, iş yükünün artması gibi bazı zorluklara neden olur (Li ve ark., 2013). Yukarıdaki açıklamalarda da anlaşılacağı üzere, ilave enerji kaynağı olarak proste PCI ile kömür kullanım oranı artırılırken, tüyer alev sıcaklığının kontrol edilmesi çok önemlidir. Bu açıdan PCI şarjı yüksek fırınlar için ideal alev sıcaklık aralığı 2100°C-2200°C arasında olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu değer, fırın işlem şartlarına ve fırın özelliklerine göre değişebilir.

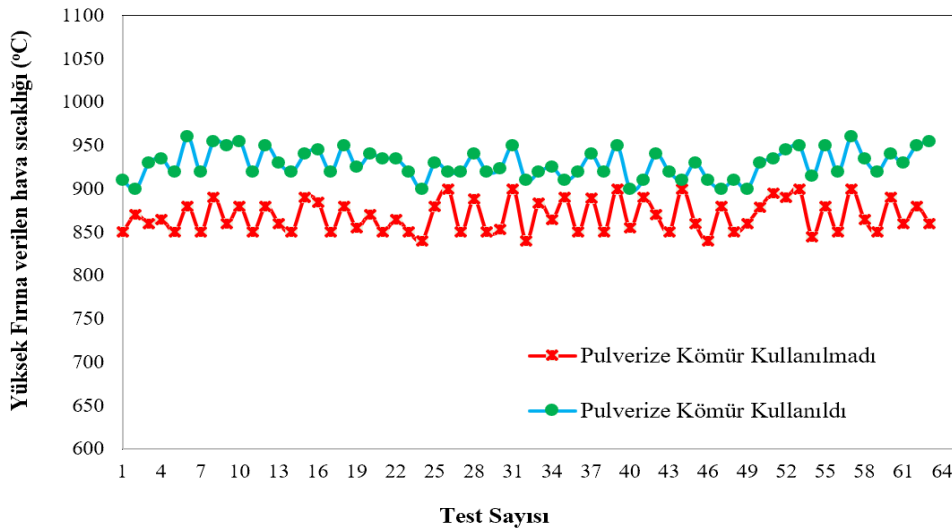
Toz haline getirilmiş kömür kullanımının alev sıcaklığını azaltma etkisinin bir avantaja dönüşmesi durumunda, kullanılan kok miktarı azalır, fırın üretimi artar, sıcak metalin kalitesi artar, işlem kolaylaşır ve maliyetlerde düşüş elde edilir. Toz haline getirilmiş kömür enjeksiyonunun alev sıcaklığını azaltması ancak aşağıdaki durumda avantaja dönüşür. Alev sıcaklığı düştüğünde kömür enjeksiyon miktarı azalır. Tüyer alev sıcaklığının azalmasını önlemek için, verilen oksijen oranı ve üflenen havanın sıcaklığı artırılır ve sıcak havanın nemi düşürülür. Böylece, kanaldaki oksijen yoğunluğu artar ve PCI kömürünün yanma aktivitesi yükselir. Kömürün kanal içindeki reaksiyonlarına göre oksijen miktarındaki artış daha fazla CO üretimi anlamına gelir (3) CO artışı da, demir cevheri (4) olarak kullanılan hematit ( $Fe_2O_3$ ) miktarının daha hızlı azalması anlamına gelir (Wunning ve Wunning, 1997; Kakiuchi ve ark., 1994).



Kömür enjeksiyonunun yapılmaması halinde, indirgeyici gaz (CO) sadece kok kömürünün yanmasıyla sağlanır. Raceway'in ihtiyaç duyduğu yanma koşullarında, demirli malzemenin redüklenmesi için kullanılan CO'nin bir bölümü toz haline getirilmiş kömürün yanması sayesinde karşılanır ve bu sayede yüksek fırına enerji kaynağı olarak yüklenen kok oranı azalır (Kakiuchi ve ark., 1994).

#### 4.2 PCI Kullanımı ile Fırın Atmosferinin Sıcaklık Değişimi

Yüksek Fırınlara Pulverize kömür enjeksiyonu yapılması halinde tüyerin alev sıcaklığında düşme gözlenir. Alev sıcaklığındaki düşme de yüksek fırın ergitme kapasitesinde azalmaya neden olur. Yüksek fırın tüyer alev sıcaklığının azalmasını önlemek için sıcak hava sıcaklığı yüksek tutularak fırın alev sıcaklığı kontrol edilmektedir. Fırın hava sıcaklığının yükseltilmesi kömürün yanma aktivitesini yükseltmekte ve metalurjik kok kömürünün soğutma özelliğini ortadan kaldırdığı için yakıtın yanma özelliği artmaktadır. Bu uygulamada Pulverize kömür kullanım miktarı artırılarak metalurjik kömür kullanım oranı düşürülebilir. PCI kullanımı ile yüksek fırına verilen havanın sıcaklığı Şekil 5'de görüldüğü gibi artmaktadır.



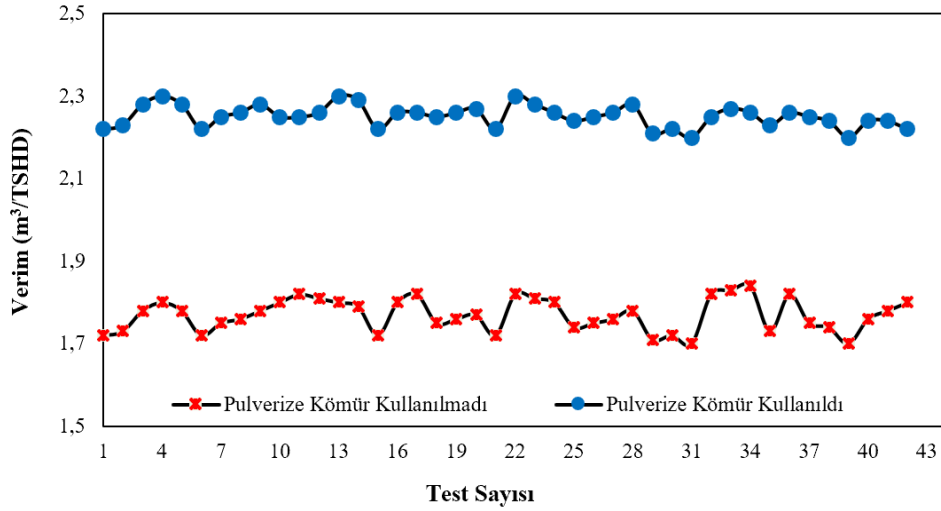
Şekil 5. Pulverize kömür kullanımı ve kullanılmaması durumunda yüksek fırına verilen hava sıcaklığı değişimi

Kömürün sağlayacağı enerji, kok'dan daha düşük enerjiye sahip olan enjeksiyon kömürü tarafından sağlanmaktadır. Kömür enjeksiyonunun miktarı artarken, fırın sıcaklık potansiyelinde değişiklikler gözlenmiş ve bu değişiklikler göz önünde bulundurularak proses değişkenleri ayarlanmıştır. PCI enjeksiyonunun miktarı artırılırken metalurjik kok kullanım oranını düşürmek için, enjekte edilen PCI kömürünün yüksek fırın prosesi üzerindeki etkisi gözlenmiştir. PCI işlemi; fırın işletme koşullarını bozmadan fırın sıcaklığını arttırıcı bir etkiye sahip olduğundan, enjeksiyon miktarı arttırılırken kok oranı azaltılır (Lundgren ve ark., 2012; Yongning, 1995).

#### 4.3 PCI Kullanımına Bağlı Fırın Verimliliği Değişimi

Pulverize kömür enjeksiyon miktarındaki artışla birlikte alev sıcaklığı azalır. Alev sıcaklığındaki bu azalma, yüksek fırına verilen havanın oksijen ve sıcaklığını arttırmaya, hava nemini düşürmeye, aynı zamanda metalurjik kok oranını azaltmaya ve yüksek fırın verimliliğini arttırmaya yönelik bir avantaj sağlar. Yüksek fırın alev sıcaklığı sabit tutulmaya çalışılmalı ve değişkenlik göstermesine izin verilmemelidir. Yüksek fırınların üretim performansını belirleyen önemli parametrelerden biri de yüksek fırın verimliliğidir. Yüksek fırın verimliliği, fırının kullanılan birim

iç hacmine karşılık gelen sıvı ham demir üretim miktarıdır ( $m^3/TSHD$ ). Verimliliği artırmanın en temel kuralı yüksek fırına giren oksijen miktarının artırılmasıdır. Bu nedenle fırınlarda PCI uygulaması aynı zamanda oksijeni de zenginleştirdiğinden, fırın içi hava sıcaklığının artırılmasının en uygun yolu olarak görülmektedir. PCI kullanımıyla, kömürün yanması sonucu oluşan indirgeyici gaz miktarındaki artışla beraber daha fazla cevher eritme fırsatı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca PCI uygulamasında, oksijenin zenginleştirilmesinin sağlanması ile yüksek fırının kullanılan iç hacminin artması ve bunun sonucu olarak üretim kapasitesinin de artması sağlanmaktadır. Pulverize kömür enjeksiyon miktarındaki artış ile fırın verimliliğinde ortaya çıkan artış Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Pulverize kömür kullanımı ve kullanılmaması durumunda yüksek fırın verimliliği değişimi

#### 4.4 PCI Enjeksiyonunun Fırın Geçirgenlik Üzerine Etkisi

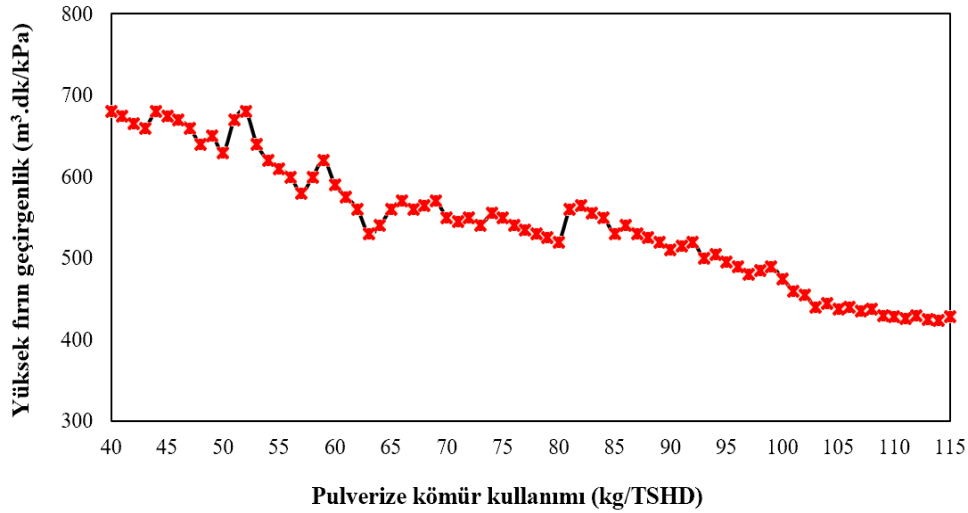
Pulverize kömür enjeksiyonu yüksek fırınlarda; kok kullanım oranını düşürmek, süreç takibini kolaylaştırmak, üretim performansını artırmak ve enerji maliyetini azaltmak amacı ile uygulanan ilave bir yakıt besleme prosesidir. Tüm proses parametreleri sabit tutularak PCI kullanım miktarı 40 kg/TSHD değerinden başlayarak düzenli olarak 115 kg/TSHD seviyesine kadar artırılmış ve bu değişimin proses parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Yüksek fırınlarda geçirgenlik aşağıdaki formül ile takip edilmektedir.

$$\text{Geçirgenlik} = V / (\Delta P \times 100) \quad (5)$$

Formülden de anlaşılacağı üzere, birim fark basınçta fırına girebilen hava miktarının artması durumunda geçirgenlik artmaktadır (Furtun, 2013).

PCI'nun verimli olarak kullanılabilmesi için; yanma sistematığı iyi kontrol edilmeli, ihtiyaç duyulan işletme şartları sağlanmalı ve yüksek fırın işletmesine olan yan etkiler azaltılarak iyi bir besleme sistematığı oluşturulmalıdır. Yüksek Fırının PCI ile çalışmasında karşılaşılan en büyük problem, gaz geçirgenliğinin bozulmasıdır. Tüyerde yeteri kadar yanmayan Pulverize kömür partikülleri fırın içinde gaz akışını azaltarak gazın geçirgenliğini düşürür ve fırın geçirgenliğine olumsuz yönde etki yapar. PCI uygulamasının başarılı olabilmesi için gaz geçirgenliğini artıracak tedbirlerin de alınması gerekmektedir.



Şekil 7. Pulverize kömür kullanımının yüksek fırın gaz geçirgenliği üzerine etkisi

Tüm proses değişkenleri sabit tutularak PC miktarının 40 kg/TSHD seviyesinden başlayarak 115 kg/TSHD seviyesine kadar artırılması halinde, yüksek fırın geçirgenliğinde meydana gelen değişim Şekil 7'de görülmektedir. Yüksek Fırına, hammadde ve çalışma parametrelerini olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde PC kullanım miktarı 115 kg/TSHD olarak belirlenmiştir ve bu seviyede kullanım ile fırın proses parametreleri kabul edilebilir seviyede olmuştur. Yüksek fırınlarda PC kullanım miktarını etkileyen birçok parametre vardır. Genel olarak, kömür enjeksiyon miktarının artışı ile fırın iç basıncında yükselme ve fırın gaz geçirgenliğinde azalma gözlenir. Ancak, fırın geçirgenliği ile PC kullanımı arasında diğer parametrelere bakmadan bir bağlantı kurmak zordur. PC şarj miktarını belirlerken genelde; metalurjik kömür katman kalınlığı, enjekte edilecek kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, sinter şarj oranı, döküm alım süresi, CO'ın CO<sub>2</sub>'e dönüşme oranı, fırın tepe basıncı, kül miktarı gibi parametreler etkili olmaktadır. Bu değerlerin kabul edilebilir sınırlar içinde olmaması halinde fırın geçirgenliği azalmakta ve dolayısı ile PC kullanımını düşürmek gerekmektedir (Ishii ve ark., 2017; Ahmed, 2018; Yakeya ve ark., 2020). Bu durumda PC kullanımı azaltılarak veya tamamen kesilerek fırın normal rejime girene kadar geleneksel metalurjik kömür (on-coal) ile çalıştırılır. Sistem normal çalışma rejimine ulaştığında kademeli olarak PC kullanımını artırılır.

## 5. SONUÇ

PCI uygulamasının amacı, geleneksel olarak kullanılan metalurjik kok miktarını azaltmak ve bunun yerine daha az maliyetli toz haline getirilmiş PC kullanımını arttırmaktır. Yüksek fırınlarda PC kullanım oranı yükseltilirken işletme kalite parametrelerini etkilemeyecek şekilde en az metalurjik kok kullanımı yoluna gidilmelidir. Yüksek fırında yapılan çalışmalar sonucunda, mevcut çalışma koşullarında yüksek fırın kalite parametrelerini bozmadan kullanılacak PC miktarının 115 kg/TSHD olduğu görülmüştür. PC kullanım oranı fırın proses parametreleri ve PC'ın kimyasal ve fiziksel özellikleri irdelenerek tespit edilmiştir. PC kömürünün kül oranının, kükürt (S), fosfor (P) değerlerinin yüksek olması, yanma özelliğinin iyi olmaması, fırın basıncının yükselmesi, kok katmanlarının geçirgenliğinin ve süzme kapasitesinin düşmesi fırın geçirgenliğini azaltan unsurlardır. Bu problemler, yüksek fırında malzeme dağılımının kontrolü, ham madde özelliklerinin iyileştirilmesi ve kömürün yanma verimliliğinin artırılmasıyla aşılabilir. Yüksek fırınlarda PCI beslemesi yapılırken fırın tüyer önü alev sıcaklığının 2150-2250 °C aralığında olmasına dikkat edilmelidir.

## 6. KAYNAKLAR

- Ahmed, H., New trends in the application of carbon-bearing materials in blast furnace iron-making. *Minerals*, 8(12), 561, 2018.
- Babich, A., Application of Reducing Agents. In: Proceedings of the 4th International Vdeh-Seminar Ironmaking. Germany, Cologne, 288-302, 2017.
- Babich, A., Senk, D, Coke in the iron and steel industry. In: New Trends in Coal Conversion. Woodhead Publishing, 367-404, 2019.
- Biswas, A.K., Principles of Blast Furnace Ironmaking, Cootha Publishing House, Brisbane, Australia, 53-66, 1981.
- Chaigneau, R., Vander, T., Wise, J. Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction (2009); Second Edition, Ios Press: The Netherlands, 182-186, 2009, Amsterdam.
- Du, S. W., Pulverised coal injection into blast furnace: a practical study of an integrated iron and steel works, Doctoral dissertation, University of Newcastle, 2015.
- Furtun, F., Pulverize kömür enjeksiyonunun yüksek fırın prosesine etkileri ve Kardemir 4. Yüksek fırın uygulaması, Yüksek Lisans, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- Geerdes, M., Chaigneau, R., Kurunov, I., Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction (2015); Ios Press: The Netherlands, 102-105, 2015, Amsterdam.
- İnt.Ky.1. <https://tr.steelorbis.com/celik-fiyatları/celik-istatistikleri/> (Erişim Tarihi: 03.07.2020).
- Isao, O., I. Morimasa, Tetsu-To-Hagane 90(9), 2-10, 2004.
- Ishii, K., “Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation”, Research Group of Pulverized Coal Combustion in Blast Furnace, Ironmaking 54th Committee, Japan Society for the Promotion of Science and Technical Division of High-Temperature Processes, 208-210, 2000, Japan.
- Ishii, J., Murai, R., Sumi, I., Yong xiang, Y., Boom, R., “Gas permeability in cohesive zone in the ironmaking blast furnace”. ISIJ international, 2017, 57(9), 1531-1536.
- Kakiuchi, K., S. Matsunaga, A. Sakamoto, H. Matsuoka, H. Ueno And K. Yamaguchi: Camp-ISIJ, 7, 126, 1994.
- Li, J., Biagini, E., Yang, W., Tognotti, L., Blasiak, W., “Flame Characteristics of Pulverized Torrefied-Biomass Combusted with High-Temperature Air,” Combustion and Flame, Vol. 160, No. 11, 2585–2594, 2013.
- Lundgren, M., Okvist, L. S., Hyllander, G., Jansson, B., & Bjorkman, B., High temperature coke characteristics in the blast furnace: evaluation of coke properties in the raceway area. In International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking: 10-13 June 2012, MEFOS, Vol. 2, pp. 157-168.
- Maki, A., Sakai, A., Takagaki, N., Mori, K., Ariyama, T., Sato, M. and Murai, R., High rate coal injection of 218 kg/t at Fukuyama No. 4 blast furnace, ISIJ International, vol. 36, 650-657, 1996.
- Peacey, J. G., Davenport, W. G., The iron blast furnace: theory and practice. Elsevier, 114-118, 2016.
- Peters, K. H., Peters, M., Korthas, B., Mulheims, K., Kreibich, K., Limits of Coal Injection. In IISC. The Sixth International Iron and Steel Congress, Vol. 2, Pp. 492-499, October 1990.
- Poos, A., Ponghis, N., Potentials and Problems of High Coal Injection Rates. In Ironmaking Conference Proceedings, Vol. 49, Pp. 443-453, Mart 1990.
- Schoppa, R. K., Contours of Revolutionary Change in a Chinese County, 1900-1950. The Journal of Asian Studies, 770-796, 1992.
- Suzuki, T., L.D. Smoot, T.H. Fletcher, P.J. Smith, Combustion Science and Technology, 88-92, 1986.

- Wozek, J., Zuke, A., “An Integrated Approach To Coal Quality And Its Impact On Primary Operations At Inland Steel Company,” In Ironmaking Conference Proceedings., Vol. 49, 1990, pp.235–242.
- Wunning, J. A., Wunning J. G., “Flameless Oxidation to Reduce Thermal No-Formation,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, Pp. 81–94, 1997.
- Yan, B. H., Cao, C. X., Cheng, Y., Jin, Y and Cheng, Y., Experimental investigation on coal devolatilization at high temperatures with different heating rates, Fuel, vol. 117, 1215-22, 2014.
- Yeh, C. P. Du, S. W., Tsai, C. H. and Yang, R. J., Numerical analysis of flow and combustion behavior in tuyere and raceway of blast furnace Fueled with pulverized coal and recycled top gas”, Energy, vol. 42, p. 233-240, 2012.
- Yongning, F., Blast Furnace Coke, pp. 56-58, 1995.
- Yakeya, M., Kasai, A., Tadai, R. Nozawa, K. “Gas Permeability Improvement Mechanism at the Blast Furnace Cohesive Zone by Mixed Coke Charging in Ore Layer and Effect of Coke Mixing for Different Cohesive Zone Condition on Gas Permeability”. ISIJ International, 60(7), 1438-1444, 2020.

Araştırma Makalesi / Research Article

**Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Bağlantı Bölgelerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi**

İ. Sinan ATLI<sup>1\*</sup>, Recep KURT<sup>2</sup>, Mesut YEŞİL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5899-4082>, sinanatli@aku.edu.tr

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0759-3465>, recepkurt4142@gmail.com

<sup>3</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6717-1996>, myesil@terraco.com.tr

Geliş/ Recieved: 14.08.2020;

Kabul / Accepted: 20.08.2020

**ÖZET:** Bu çalışmada polimer matrisli kompozit malzeme parçalarının farklı yöntemlerle birleştirilmesi sonrası, farklılıkların birleşme bölgesinin çekme kuvvetine etkileri incelenmiştir. Öncelikle çift yönlü dokumaya sahip karbon fiber kumaş takviyeli epoksi kompozit çekme testi numuneleri üretilmiştir. Kompozit numune üretiminde elle yatırma sonrası sıcak presle presleme yöntemi kullanılmıştır. Üretilen numuneler ASTM D412 standardına uygun ölçülerde boyutlandırılmıştır. Numuneler tam ortadan ikiye bölünerek farklı yöntemlerle birleştirilmiştir. Birleştirme yöntemleri vida ile vidalama, piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli bir çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırma, kompozit malzemenin üretildiği laminasyon reçine ile yapıştırma ve aynı laminasyon reçinenin karbon fiber tozu ile katkılandırılarak yapıştırılması şeklindedir. Yapıştırılan numuneler çekme testine tâbi tutularak birleşme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Vida ile birleştirilen bölgenin kopma kuvveti en az değeri verirken piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırılan bölgelerin kopma kuvveti en yüksek değeri vermiştir ve bu değerler sırasıyla 2278,67 N ve 12062 N'dur. Yapılan çalışma kapsamında en düşük kuvvet değeri vidalama tekniği ile birleştirilen numunelerde, en yüksek değer ise çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerde gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Epoksi, Karbon fiber, Birleşme bölgesi, Çekme mukavemeti.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [sinanatli@aku.edu.tr](mailto:sinanatli@aku.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Atlı, İ.S., Kurt, R., Yeşil, M. (2020). Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Bağlantı Bölgelerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 66-75.



## Investigating the Mechanical Behavior of Joints of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites

**ABSTRACT:** In this study, after bonding polymer matrix composite joints via different methods, the effect of the methods to tensile force were investigated. Firstly, tensile test specimens of plain weaved carbon fiber fabric reinforced epoxy composite were manufactured. Hot pressing after hand layup method were utilized in production. Specimens were sized in accordance with the ASTM D412 standard. Each sample were cut into half and bonded with different methods. Bonding methods include fastening with bolts, bonding with a low-cost two-component adhesive, widely available in the market, bonding with lamination resin from which the composite material is produced by, and bonding with the same lamination resin with carbon fiber powder. Bonded specimens were subjected to tensile test according to compare joint forces. While the breaking force of the region joined by the bolts gives the least value, the tensile strength of the regions bonded with the low-cost two-component adhesive that can be found in the market has the highest value and these values are 2278,67 N and 12062 N, respectively.

**Keywords:** Epoxy, Carbon fiber, Joint, Tensile strength.

### 1. GİRİŞ

Günümüzde farklı alanlarda kullanımı oldukça yaygınlaşan polimer matrisli kompozit elemanların tek parça üretilemeyip birleştirme yolu ile bir araya getirilmesi gereken yapılar vardır. Bütün yapının mekanik özellikleri birleştirme bölgesinin mekanik özelliklerine bağlıdır ve bu yüzden birleştirme yöntemini doğru seçmek oldukça önemlidir. Polimer matrisli malzemelerin birleştirilmesinde Thoppul ve ark. (2009)'na göre mekanik olarak vidalama, yapıştırıcı yardımı ile bağlama ve hibrit vidalama-yapıştırma yolu ile bağlama olarak adlandırılabilir üç çeşit birleştirme yöntemi vardır. Mekanik vidalama yöntemi birleştirilecek yüzeylerde delik açılarak vidanın bu deliklerden geçirilmesi ve civata ile sıkılması prensibine dayanır. Vinson (1989), Schwartz (1994) ve Ashcroft ve ark. (2000) mekanik olarak bağlamanın metal eklentiler gerektirdiğini ve bu durumun ağırlık artışına sebep olduğunu belirtmektedirler. Prabhakaran (1982) ve Vinson (1989) polimer matrisli kompozit malzemelerin birleşme yerlerinde vidalama deliklerinin açılması ile sürekli fiberlerin kesilmeye uğradığı, süresiz hale geldiği ve açılan her deliğin etrafında gerilme yığılması meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kweon ve ark. (2006) bu delikler etrafında oluşan mikro çatlakların gerilme yığılmaları ile birlikte hasar başlangıç noktası olarak davranacağı ve erken hasara sebebiyet vereceğini söylemişlerdir. Collings ve ark. (1987) bu gerilme yığılmalarının zamanından önce çekme veya kayma hasarlarına sebep olduğunu vurgulamışlardır. Her ne kadar mekanik olarak vidalama yönteminin bahsedilen dezavantajları olsa da Collings (1982) ve Todd (1990) havacılık malzemelerinde bu yöntemin kullanılmasının tahmin edilebilir sonuçları olmasından dolayı daha güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi akışkan bir polimerin birleştirilecek yüzeylere uygulanmasından sonra yüzeylerin bir araya getirilmesi ve reçinenin kürlenmesi ile yüzeylerin birleşmesidir. Banea ve Da Silva (2009)'a göre bu yöntemin mekanik vidalamaya göre uygulama kolaylığı olması, delik açma ile tahrip etme gereksinimi olmaması, birleştirme ile eklenecek ağırlıkların daha az olması gibi avantajları vardır. Bunun yanında Encinas ve ark. (2014), Paranjpe ve ark. (2018) ve Joseph ve ark. (2018)'e göre iletken kompozit malzemelerin bu özelliklerini etkilemeyecek şekilde uygulanabilir bir yöntemdir. Kim ve ark. (2006) bir yapıştırıcı ile yapıştırma

yönteminde delik açılması gerekmediği için uygulanan yükün kompozitin parçaları arasında daha eşit bir şekilde transfer olacağını vurgulamışlardır. Hart-Smith (2002) ve Pantelakis ve Tserpes (2014)'e göre, yapıştırıcı ile birleştirme gerçekleştirilmeden önce yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinin çevre şartları ile birlikte kompozit malzemenin performansını etkilemektedir.

Polimer matrisli kompozit malzeme parçalarının birleştirilmesinde kullanılan bir başka yöntemde hibrit vidalama-yapıştırma yöntemidir. Adından da anlaşılacağı üzere bu yöntemde hem polimer bir yapıştırıcı hem de mekanik vidalama işlemlerini içerir. Bu yöntemde uygulanan yükün hem vida hem yapıştırıcı tarafından taşınmayacağı, daha rijit olan yapıştırıcı tarafından taşınacağı Clarke (2003) tarafından söylenmiştir. Kelly (2006) yaptığı çalışmalarda, düşük elastik modül özelliğine sahip bir yapıştırıcının kullanıldığı birleşim yerlerinin vidalama ile kuvvetlendirilmesi ile mukavemetlerinin, sıklıklarının ve yorulma dirençlerinin gözle görülür şekilde arttığını, fakat yüksek elastik modüle sahip yapıştırıcı ile birleştirilen bölgelerin bahsedilen bu özelliklerinin vidalama ile çok fazla artmadığını bulmuştur.

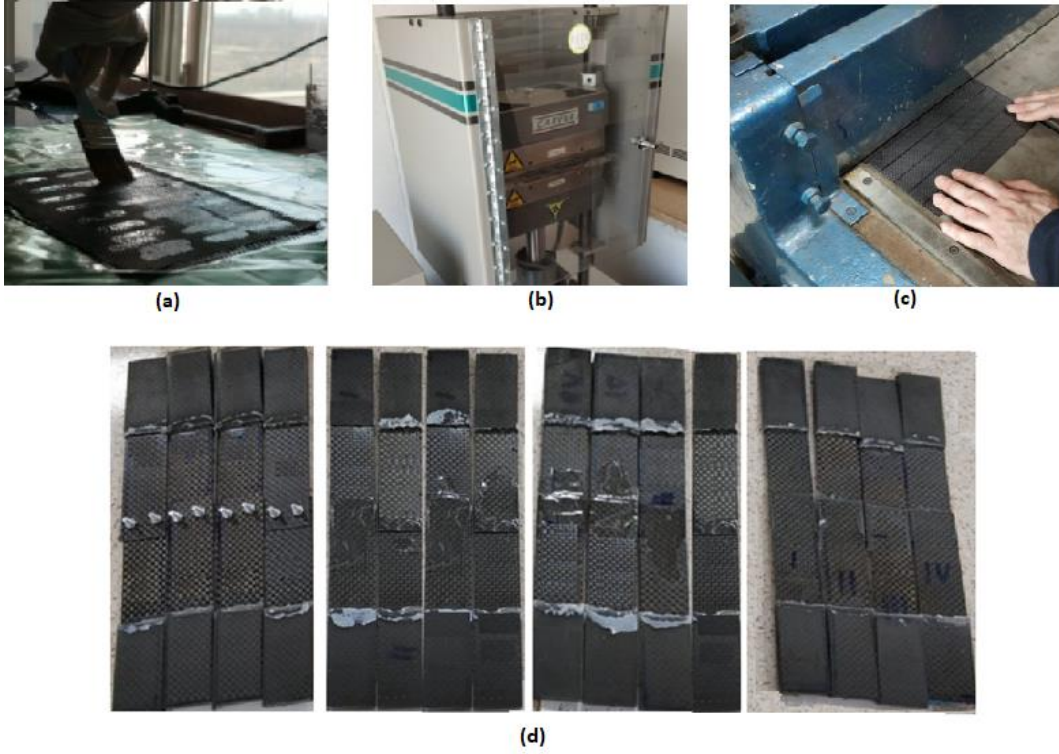
Bu çalışmada birleştirme yöntemi olarak vidalama ve polimer bazlı yapıştırıcılarla yapıştırma yöntemleri kullanılarak yapışma kuvvet değerleri çekme testi ile ölçülerek kullanılan yöntemler arasında karşılaştırma yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozitlerin farklı birleştirme yöntemleri ile birleştirildikten sonra ayrılma dayanımlarının test edilmesi amacı ile, numuneler üretilerek çekme testi uygulanmıştır.

### 2.1 Deney Numunelerin Üretimi

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde takviye elemanı olarak Tenax-E HTA 40 3k düz dokumalı karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Kumaşın metrekare ağırlığı 200 gr, dokuma sıklığı 5 adet/cm olup bir fiber demetinde 3000 adet karbon fiber bulunmaktadır. Matris elemanı olarak ise LR300/LH300 çift bileşenli laminasyon epoksi seti kullanılmıştır. Şekil 1.a'da görüldüğü gibi elle yatırma yöntemi ile ön şekil verilen 4 tabakalı kompozit malzeme daha sonra hava kabarcıklarından ve fazla epoksiden kurtulma amacı ile Şekil 1.b'deki Carver marka sıcak presi cihazı ile 1,09 MPa basınç altında preslenerek 100°C'de 1 saat kürlenmiştir. Basınç miktarı daha önce bu cihazla yapılan çalışmalarda kullanılan optimum miktardır. Belirlenen kürleme sıcaklığı matris malzemesi olan epoksinin kullanım talimatlarında belirtilen kürleme sıcaklığıdır. Cihaz sıcaklık ve basıncı eş zamanlı olarak uygulayabilmektedir. Cihazda basınç altında kürleme işlemi sona erdikten sonra elde edilen 250 mm x 180 mm ölçülerindeki kompozit levha, ASTM D412 standartlarına uygun şekilde 250mm x 25 mm x 0,67 mm (uzunluk x genişlik x kalınlık) ölçülerinde giyotin yardımı ile boyutlandırılmıştır. Boyutlandırma işlemi Şekil 1.c'de gösterilmiştir



**Şekil 1.** a) Elle yatırma yöntemi ile tabakaya ön şekil verme prosesi, b) Presleme ve kürlenme işlemlerinin yapıldığı Carver marka sıcak pres cihazı, c) Kompozit plakanın ASTM D412 standartlarına göre boyutlandırılması işlemi, d) Ortadan kesildikten sonra birleştirilen ve teste hazır hale getirilen numuneler

Numuneler, kesme işlemi sona erdikten sonra, daha sonra farklı yöntemlerle birleştirilmek üzere, boylamasına ortadan kesilmiştir. Ortadan kesilen numunelere vida, piyasada yaygın olarak bulunabilen Jalasanj marka az maliyetli bir çift bileşenli yapıştırıcı, kompozit malzemenin üretildiği laminasyon reçinesi ve karbon fiber tozu katkılı laminasyon reçinesi ile birleştirme yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Çift bileşenli yapıştırıcının kürleyici ve yapıştırıcı bileşenleri 5 dk boyunca karıştırılarak yüzeye uygulanmış, yüzeyler birleştirilmiş ve kürlenmeye bırakılmıştır. Çekme testi çenelerinin numunelerin uç kısımlarına zarar vermemesi ve test sırasında çeneler içinden erken hasara sebebiyet vermemesi için, numunelerin çeneler içinde kalan 50 mm'lik kısımları ekstra epoksi ile kaplanmıştır. Üretilen numuneler Şekil 1.d'de gösterilmektedir.

## 2.2 Mekanik Çekme Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Çekme testi işlemleri Shimadzu AG-IS 10 kN universal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test edilen bir numunenin cihaza yerleştirilmiş hali Şekil 2'de gösterilmiştir.



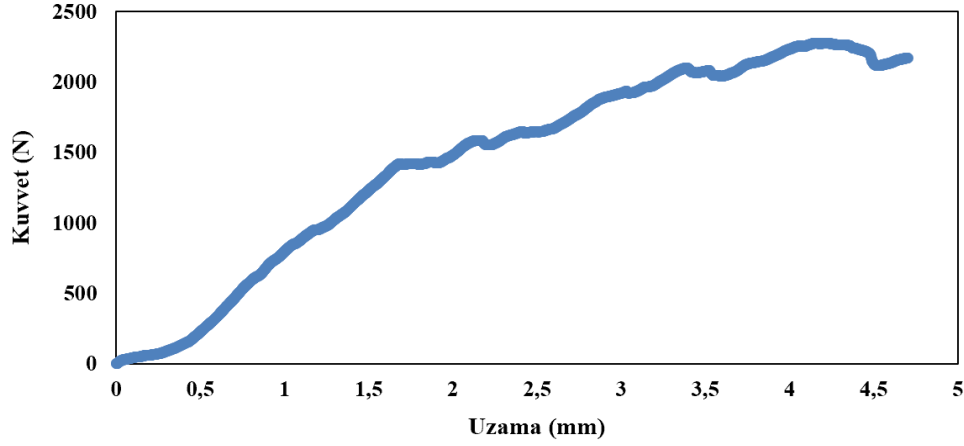
Şekil 2. Çekme testlerinin gerçekleştirildiği Shimadzu AG-IS 10 kN üniversal test cihazı

Her ne kadar gerçekleştirilen mekanik test yüklemeye doğrultusundan dolayı çekme testi olarak adlandırılrsa da elde edilen çıktı, birleştirilen iki kompozit malzemenin ara yüzeyindeki yapışma kuvvetidir. Mekanik test çekme hızı 2 mm/dk olup numune, 50 mm'lik uç kısımları çeneler içinde kalacak şekilde cihaz içine yerleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te vida ile birleştirilen numunelerin kuvvet uzama eğrisi verilmiş olup, bu numuneler ortalama 2278,67 N'luk kuvvet değerinde vidalama bölgelerinden hasara uğramıştır. Çekme esnasında vidalar vidalandıkları bölgeleri hasara uğratmış, civatalar hasarlı bölgelerden kayarak sıyrılmıştır. Oluşan bu hasar türü ve nispeten düşük kuvvet değerinde oluşan hasar Dai ve ark. (1998)'nin açılan vida delikleri etrafında oluşan gerilme yığılmalarının erken hasara yol açabileceğini savını desteklemektedir. Yani Vidalama yöntemi ile birleştirilen numunelerde, açılan vidalama delikleri etrafında oluşan mikro-çatlakların çekme testi sırasında ilerlediği ve en sonunda erken hasara yol açtığı düşünülmektedir. Çekme testi yapılan numuneler birleşme bölgelerinden kopmuş olup, bu kopma bölgeleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere vidalama yöntemi ile birleştirilen numunenin vida delikleri etrafında hasarlar meydana gelmiştir. Çekme testi sırasında meydana gelen hasarın temsili gösterimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5.a'da henüz kuvvet uygulanmamış numunede birleşme bölgesi gösterilmiş olup, kırmızı ile işaretlenen yerler vida deliği açılmasından kaynaklı oluşan mikro-çatlakları göstermektedir. Çekme kuvveti uygulandıkça mikro-çatlaklar Şekil 5.b'de gösterildiği gibi ilerlemekte ve en son Şekil 5.c'de ki gibi hasara yol açmaktadır.

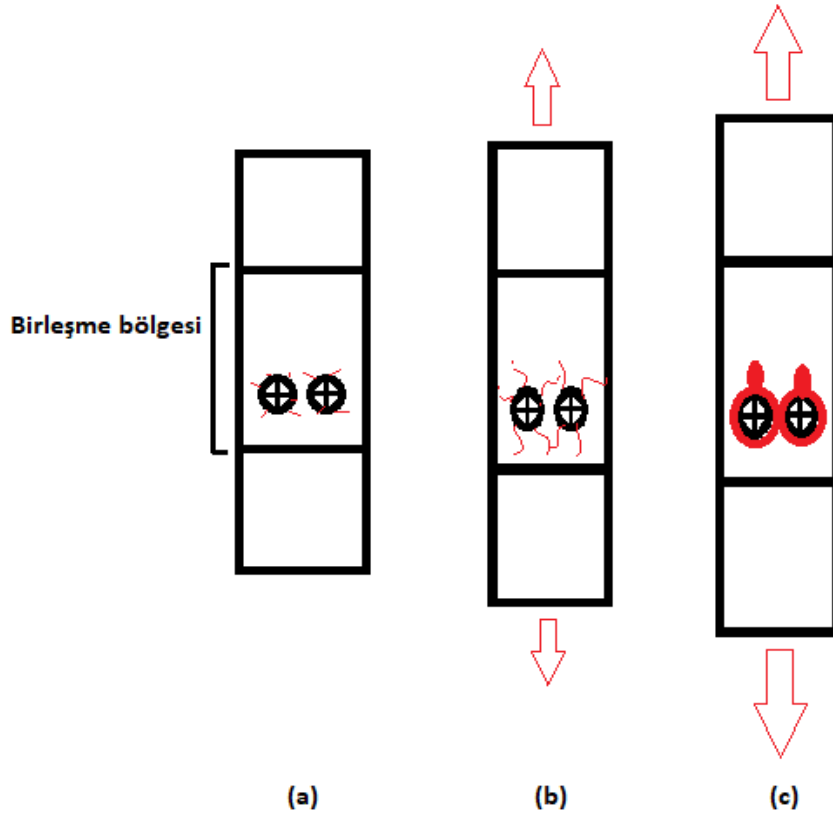
Kompozit malzemenin üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan epoksi, bir takım numunenin birleştirilmesinde kullanılmış ve birleştirme bölgesine uygulanan epoksinin tamamen kürlenmesi sonrasında numunelere çekme testi uygulanmıştır. Test sonucunda bu numunelerin hasara uğradığı kuvvet ortalama 8917,5 N olarak tespit edilmiştir. Söz konusu numunelerin kuvvet-uzama grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



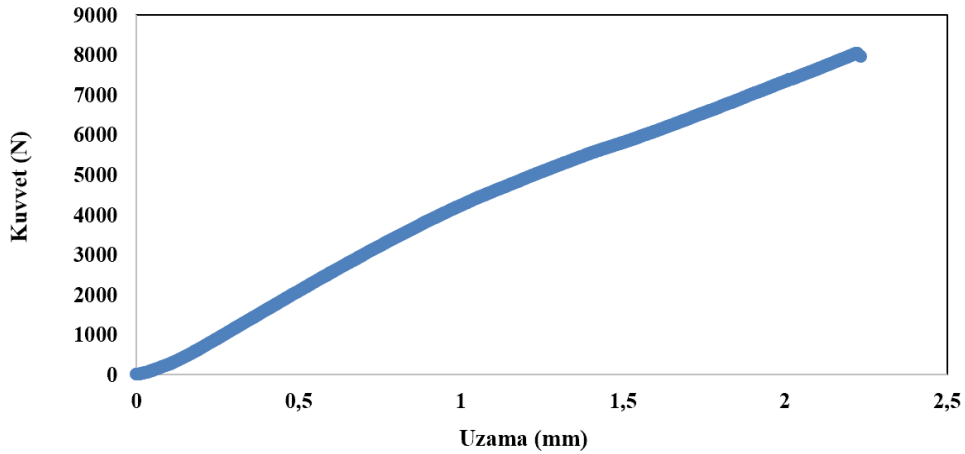
Şekil 3. Vida ile birleştirilen numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi



Şekil 4: Kopma bölgelerine ait makro resimler: a) vida ile birleştirilen, b) epoksi ile birleştirilen, c) karbon fiber tozu katkıli epoksi ile birleştirilen ve d) çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin kopma bölgelerinin resimleri



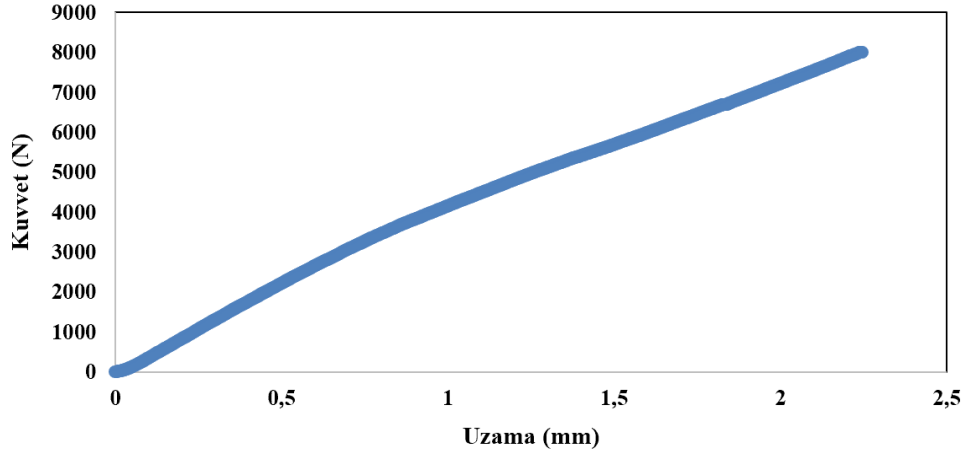
**Şekil 5.** a) Henüz kuvvet uygulanmamış, vidalama yöntemi ile birleştirilmiş numunedeki mikro-çatlaklar kırmızı renkle temsil edilmektedir, b) çekme kuvveti uygulanmaya başlanan numunedeki mikro-çatlakların ilerlediği görülmektedir, c) çekme kuvvetinin miktarı arttıkça mikro-çatlakların büyük hasarlara sebep olmaktadır



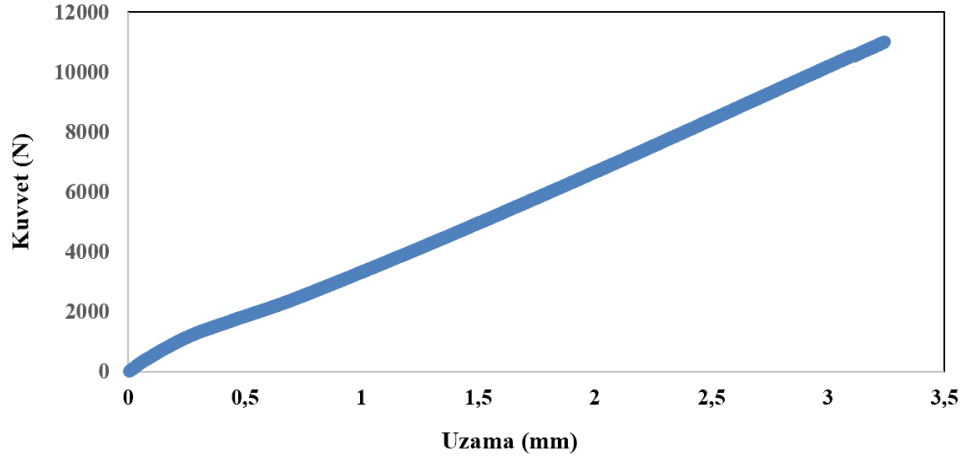
**Şekil 6.** Epoksi ile birleştirilen numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi

Birleştirme yerinde kullanılan bir başka malzeme ise ortalama  $100\mu\text{m}$  boyutunda ki karbon fiber tozları ile kuvvetlendirilmiş epoksidir. Bu yöntemle birleştirilen malzemelerin çekme kuvveti ortalama  $8564\text{ N}$ 'a kadar ulaşmıştır. Her ne kadar karbon fiber tozlarının birleşme bölgesinin mukavemetini yükseltmesi beklense de kullanılan tozların boyutları mukavemeti arttırmak için yetersiz kalmış olabilir. Ayrıca tozların epoksiye homojen olarak karışmamış olması da bu sonucu doğuran başka bir etken olabilir. Karbon fiber tozu katkılı epoksi ile birleştirilen numunelerin kuvvet-uzama eğrisi Şekil 7'de verilmiştir.

Jalasanj marka çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numuneler çekme testi sonucunda 12062,8 N'luk çekme kuvvetine ulaşarak bu çalışmadaki birleştirme yöntemleri arasında en yüksek sonucu vermiştir. Söz konusu bu numunelerin kuvvet-uzama eğrileri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Karbon fiber tozu katkılı epoksi ile birleştirilen numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi



Şekil 8. Çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi

Çizelge 1'de farklı yöntemlerle birleştirilen numunelerin çekme testi sonucu hasara uğradığı kuvvet değerleri gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği ve Çizelge 1'de gösterildiği üzere vida ile birleştirme yöntemi polimer bazlı yapıştırıcılara göre daha düşük kuvvet değerinde hasara uğramıştır. Maksimum uzama değerlerine bakıldığında ise vidalanan numunelerin vidalandığı bölgelerden hasara uğramasından dolayı daha fazla uzadığı görülmektedir.

Çizelge 1. Üretilen numunelerin çekme testi sonuçları

Numune adı	Numune kalınlığı (mm)	Yapıştırma kalınlığı (mm)	Genişlik (mm)	Boy (mm)	Yapışma bölgesi uzunluğu (mm)	Max kuvvet (N)	Max uzama (%)
V-ort.	0,66	1,32	24,48	116,03	20,53	2278,67	5,1
E-ort.	0,66	1,88	24,41	115,25	21,8	8917,5	2,5
KFT-ort.	0,67	1,7	24,32	115,25	21,33	8564	2,4
Çift B. ort.	0,69	1,89	24,48	114,42	24,75	12062,8	3,05

#### 4. SONUÇ

Vida ile birleştirilen numuneler çekme testi sonucunda en düşük kopma değerini vermişlerdir. Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan epoksi ile birleştirilen numunelerin kopma kuvveti vida ile birleştirilenlere göre %292 daha fazladır. Epoksi içine karbon fiber tozu katkısı yapılarak birleştirme malzemesi olarak kullanılmış fakat bu malzeme ile birleştirilen numuneler sadece epoksi kullanılarak birleştirilen numunelere göre yaklaşık %3,9 daha düşük bir kuvvette kopmuştur. Kullanılan yöntemler arasında numuneleri birbirine en kuvvetli şekilde bağlayan çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirme yöntemidir ve bu yöntemin kullanıldığı numuneler epoksinin yapıştırıcı olarak kullanıldığı yöntemle oranla %35, vidanın kullanıldığı yöntemle oranla %429 daha fazla kopma direnci göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında vida ile birleştirme en zayıf, çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirme en kuvvetli yöntem olarak belirlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda epoksi dışında yapıştırıcı malzemeler, katkılı polimer malzemeler ve hem vidalama hem de yapıştırıcı ile yapıştırma yöntemlerinin aynı malzemede kullanıldığı çalışmalar yapılabilir ayrıca bu çalışmalara kompozit malzemelerinin birleşme bölgelerine farklı yüzey modifikasyonları uygulanarak birleşme bölgesinin mukavemetine olan etkileri incelenebilir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm imkanlarından faydalanılarak yürütülmüştür. Bilimsel faaliyetlerin arkasında duran ve itici güç olan bölüm yönetimi ve öğretim elemanlarına sonsuz teşekkürlerimizi borç biliriz.

#### 6. KAYNAKLAR

- Ashcroft, I.A., Hughes, D.J., Shaw, S.J., Adhesive bonding of fibre reinforced polymer composite materials. *Assembly Automation*, 2000.
- Banea, M.D., Da Silva, L.F., Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223(1), 1-18, 2009.
- Bowen, R.L., Eichmiller, F.C., Marjenhoff, W.A., Rupp, N.W., Adhesive bonding of composites. *J Am Coll Dent*, 56, pp.10-13, 1989.
- Clarke, J.L., *Structural design of polymer composites: Eurocomp design code and background document*. CRC Press, 2003.
- Collings, T.A., On the bearing strengths of CFRP laminates. *Composites*, 13(3), 241-252, 1982.
- Collings, T.A., Mead, D.L., Stone, D.E.W., The effects of high temperature excursions on environmentally exposed CFC. In *Composite Structures 4*, 345-374, Springer, Dordrecht, 1987.
- Dai Gil Lee, Kwon, J.W., Cho, D.H., Hygrothermal effects on the strength of adhesively bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 12(11), 1253-1275, 1998.
- Encinas, N., Oakley, B.R., Belcher, M.A., Blohowiak, K.Y., Dillingham, R.G., Abenojar, J., Martínez, M.A., Surface modification of aircraft used composites for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50, 157-163, 2014.
- Hart-Smith, L.J., Adhesive bonding of composite structures-progress to date and some remaining challenges. *Journal of Composites, Technology and Research*, 24(3), 133-151, 2002.



- Joseph, A.P., Davidson, P., Waas, A.M., Progressive damage and failure analysis of single lap shear and double lap shear bolted joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 264-274, 2018.
- Kelly, G., Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite structures*, 72(1), 119-129, 2006.
- Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi, Y.M., Kim, C.G., Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Composite structures*, 72(4), 477-485, 2006.
- Kweon, J.H., Jung, J.W., Kim, T.H., Choi, J.H., Kim, D.H., Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. *Composite structures*, 75(1-4), 192-198, 2006.
- Pantelakis, S., Tserpes, K.I., Adhesive bonding of composite aircraft structures: Challenges and recent developments. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 57(1), 2-11, 2014.
- Paranjpe, N., Alamir, M., Alonayni, A., Asmatulu, E., Rahman, M. M., Asmatulu, R., Strength and failure analysis of composite-to-composite adhesive bonds with different surface treatments. In *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*. International Society for Optics and Photonics, Vol. 10596, p. 105961K, 2018.
- Prabhakaran, R., Photoelastic investigation of bolted joints in composites. *Composites*, 13(3), 253-256, 1982.
- Schwartz, L.M., Effective medium theory of electrical conduction in two-component anisotropic composites. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 207(1-3), 131-136, 1994.
- Thoppul, S.D., Finegan, J., Gibson, R.F., Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—a review. *Composites Science and Technology*, 69(3-4), 301-329, 2009.
- Todd, S.M., Joining thermoplastic composites. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 383-392, 1990.
- Vinson, J.R., Mechanical fastening of polymer composites. *Polymer Engineering & Science*, 29(19), 1332-1339, 1989.

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Heat Treatment and Microstructural Analysis of 54SiCr6 and 60SiMn5 Spring Steels**

Şükrü TALAŞ<sup>1\*</sup>, M. Seyit SARI<sup>2</sup>, Ahmadou SOW<sup>3</sup>, Halil AKTAŞ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4721-0844>, stalas@aku.edu.tr

<sup>2</sup> Turkish Standards Institute, Ankara, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4126-3611>, seyitmuhammetsari@gmail.com

<sup>3</sup> Aktaşlar Makine Sanayi, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7289-0677>, sowahma92@gmail.com

<sup>4</sup> Aktaşlar Makine Sanayi, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3488-3190>, info@aktaslarmakina.com

Geliş/ Recieved: 19.08.2020;

Kabul / Accepted: 31.08.2020

**ABSTRACT:** Steels, the most widely used alloy in the world, are the most concrete example in the study of the structure-property-performance relationship in materials, which is the clearest function of the science of materials. Steels exhibit very different properties when other types of atom are present in the solid solution. Due to these changes in properties, the performance of the material in the area of use is determined. When silicon is added to steels in certain proportions, it is important to provide the necessary mechanical properties in steel industry as spring steel, and these steels are generally classified as silicon spring steels. Heat treatments are applied to determine, regulate and improve the properties and performances of steels other than their chemical properties. These heat treatments are carried out with different methods for different purposes. In this study, the hardness of silicon containing spring steels when it is produced, then how hard it reacts in sudden cooling, when water or oil is used as cooling medium, the final hardness and microstructures are examined by tempering followed by hardening. Results showed that 54SiCr6 produced martensite+bainite structure as opposed to fully martensitic 60SiMn5 specimen after quenching process.

**Keywords:** 54SiCr6 Steels, 60SiMn5 Steels, Heat treatment, Microstructure

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [stalas@aku.edu.tr](mailto:stalas@aku.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Talaş, Ş., Sarı, M.S., Sow, A., Aktaş, H. (2020). Heat Treatment and Microstructural Analysis of 54SiCr6 and 60SiMn5 Spring Steels. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 76-84.

## 54SiCr6 ve 60SiMn5 Yay Çeliklerinin Isıl İşlemi ve Mikroyapısal Analizi

**ÖZET:** Dünya üzerinde en fazla kullanılan alaşım olan çelik, malzeme biliminin en net işlevi olan malzemelerdeki yapı-özellik-performans ilişkisinin incelenmesinde en somut örnektir. Çelikler katı çöeltide başka bir element atomlarıyla buluşmasıyla çok farklı özellikler sergilemektedir bu özellik değişimlerine bağlı olarak ise kullanıldığı alanda malzemenin performansını belirlemektedir. Silisyum elementi çeliklere belirli oranlarda eklendiğinde endüstride çeliğin yay çeliği olarak kullanılmasında gerekli mekanik özellikleri sağlamakta önem taşır ve genelde bu çelikler silisyum yay çelikleri olarak sınıflandırılır. Çeliklerin kimyasal karakterin dışında özellik ve performanslarını belirlemek, düzenlemek ve geliştirmek için ısıl işlemler uygulanır. Bu ısıl işlemler farklı amaçlarla farklı yöntemlerle yapılmaktadır. Bu çalışmada, silisyum içeren yay çeliklerinin üretildiğinde sahip olduğu sertliğin daha sonra ani soğutmada, soğutma ortamı olarak su kullanıldığında veya yağ kullanıldığında nasıl tepki verdiği sertleştirme işlemi akabinde temperleme ile nihai sertlik ve iç yapıları incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, su verme işleminden sonra, 54SiCr6 çeliği, tam martenzitik 60MnSi5 çeliğine göre, martenzit+beynit yapısında mikroyapı üretilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** 54SiCr6 Çeliği, 60SiMn5 Çeliği, Isıl işlem, Mikroyapı

### 1. INTRODUCTION

The advantage of improving the properties and performance of steel samples by various methods is also valid for spring steels. Silicon containing spring steels that exhibit certain mechanical properties in certain chemical compositions can be used for their microstructural advantage, hardness etc. by various heat treatments. Spring steels are often subjected to hardening process i.e. heat treatment in order to provide maximum performance in the area where they are used (Çalik, 2009; Canale and Penha, 2007).

Springs are the basic mechanical components found in many mechanical systems. Steel is an important engineering material for the production of high-strength components of any mechanical system. Technically, the spring is an elastic component that can store an applied force effect. Spring steels have the unique feature of being able to withstand significant bending or twisting forces without any distortion (Canale and Penha, 2007). This property is defined as high yield strength and is the result of hardening of certain compositions and steels. Spring steels are used as special requirements are expected for hardness or wear resistance. Most spring steel is hardened and tempered to about 45 RC. In general, springs are made with high carbon spring steels, alloy spring steels and stainless spring steels (Dindar, 2019; Rehrla, 2012).

Heat treatment, especially, annealing is applied to ensure that the microstructure of the steel that changes after various processes is returned to the normal microstructure. Normalization annealing is performed in sub-eutectoid steels to transform the microstructure into a round, fine-grained and homogeneous dispersed structure (Senthilkumar, 2012; Machado, 2006). It is applied in the hyper-eutectoid steels to facilitate the subsequent homogeneous process and to shorten the hardening process. The main reason for the high hardness of martensite is that the lattice structure is extremely distorted. Due to the fact that the atomic filling factor of martensite is lower than the atomic filling factor of austenite, some volumetric growth occurs in steel during martensitic transformation. This volumetric growth creates local stresses that can cause plastic deformation of the matrix atomic structure (Çalik, 2009; Villa et al., 2014; Weidner et al., 2015; Loewy et al., 2014). In other words, the volumetric growth that occurs during the formation of martensite creates very high local stresses

and causes the matrix structure of the steels to distort excessively or undergo plastic deformation. The deformation of the lattice structure also increases the hardness and strength of the quenched steels by preventing the dislocation movement (Weidner et al., 2015; Morito et al., 2006; Morito et al., 2009).

In this study, the microstructural changes and variation in the hardness values of 60SiMn5 and 54SiCr6 silicon spring steels were investigated with respect to cooling medium in oil and water following the hardening and tempering heat treatment.

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURES

In this section, detailed information is given about 60SiMn5 and 54SiCr6 steel materials used in experimental studies, test devices and applied methods. Chemical analysis of 60SiMn5 and 54SiCr6 alloy steels used in experimental studies is given in Table 1 below.

**Table 1.** Chemical Composition of 60SiMn5 and 54SiCr6 Sample

	Chemical Composition (wt.%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
<b>60SiMn5</b>	0.55-0.65	1.0-1.3	0.9-1.1	<0.05	<0.05	-
<b>54SiCr6</b>	0.52-0.59	1.2-1.6	0.5-0.8	0.03	0.03	0.5-0.8

For experimental studies, the commercially available 60SiMn5 and 54SiCr6 steel specimens were sliced from the 20mm diameter bar section and the as received samples were passed through 120-1200 grit sandpaper grinding process for metallographic investigation. The polishing process was carried out on polishing cloth with 1µm alumina solution. Polished specimens were etched for 4-5 seconds using 3% Nital solution. For heat treatment, the samples were cut in sizes suitable for facilitating the application of metallographic processes and examinations, i.e. Ø20mmx20mm long. After slicing the specimens, pieces of 60SiMn5 and 54SiCr6 steels were placed in a cold furnace at room temperature for the heat treatment.

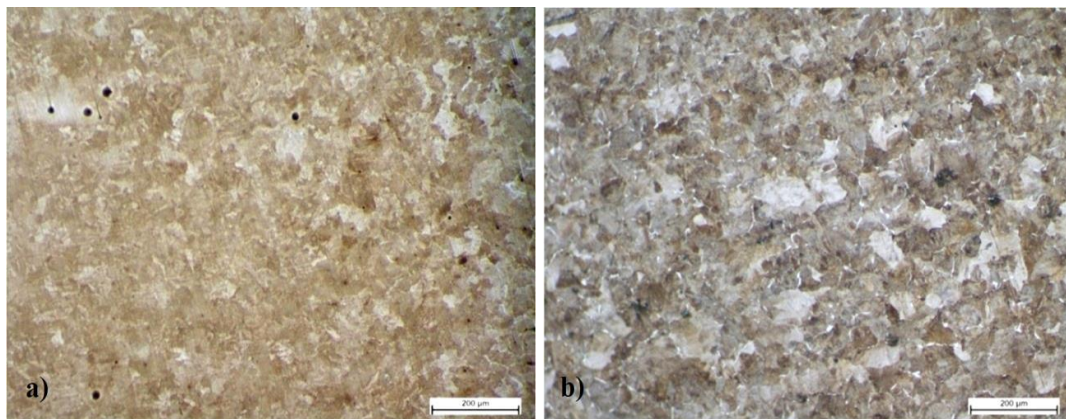
The heat treatment for hardening took place in furnace for 90 min at 850 °C and tempering at 200 °C for 2h. To ensure a successful the hardening process, it is necessary to cool the samples quickly after reaching the temperatures determined by the heat treatment furnace and hence, quenching was applied to the samples following the heat treatment in the furnace. Still water (room temperature) and oil mediums were chosen for quenching operations. With the universal microhardness tester (Shimadzu HVM2), the hardness values of all samples were measured three times, and their average values were taken and recorded. Microstructure images were taken with Nikon optical microscope at various magnifications and linear intercept method was used for grain size measurement. Heat treated, tempered after heat treatment and all non-treated samples were examined by the metallographic processes described above.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 As Received Steel Microstructures

Microstructure images and hardness values of 60SiMn5 and 54SiCr6 alloy steels used in experimental studies are given in as received form in Figure 1, obtained from Aktaşlar Agriculture Machinery Company. Figures 1a and b show that the dominant microstructures are fine pearlitic or

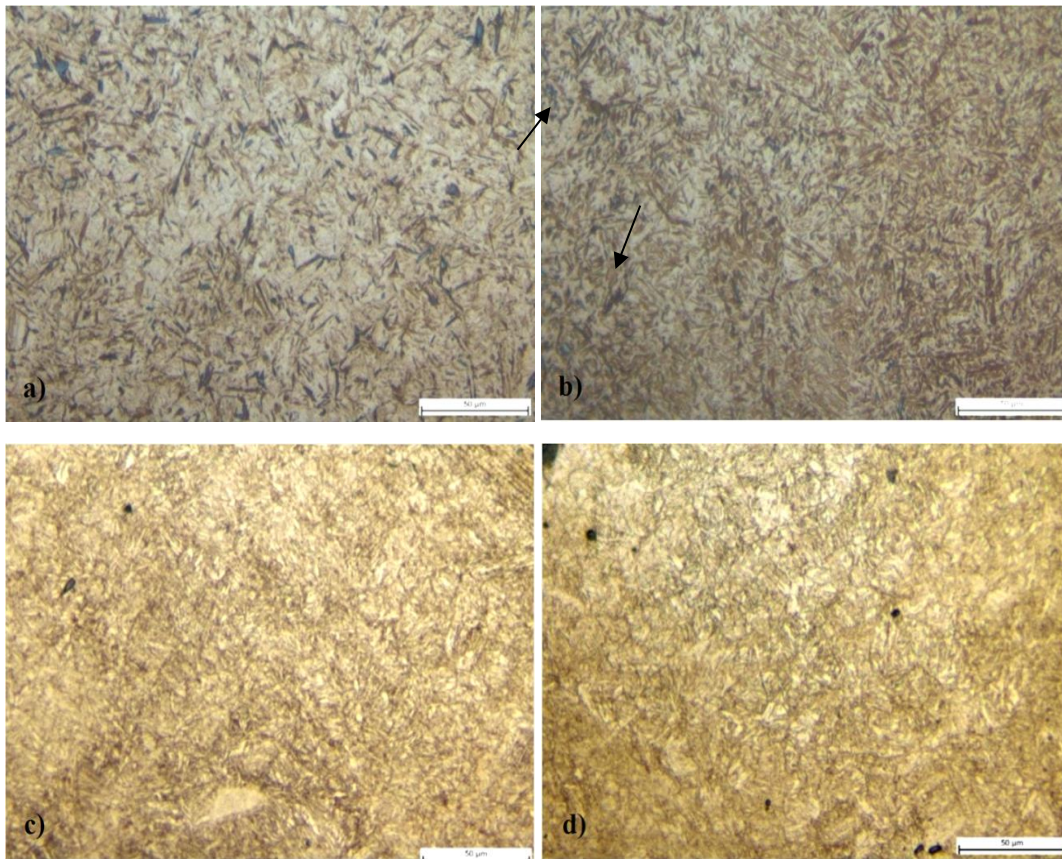
fine pearlite+ferrite. As can be seen from the figure 1 that the composition of both steels with similar microstructures decomposes with only difference being the presence of Cr. Cr in steels is one of the important elements for general matrix hardness, and at the same time, when C is present, secondary phases for example by forming carbides of Fe and Cr, provide wear resistance (Razzak, 2011). Cr, which increases the matrix hardness, causes carbide form in special circumstances, and if it is homogeneously distributed, the dispersion of carbides adds more efficiency for high wear resistance and matrix hardness. In the microstructure of the 54SiCr6 alloy (Figure 1b), a greater amount of ferrite structure is observed on the grain boundaries than 60SiMn5. The average grain sizes in both microstructures of 60SiMn5 and 54SiCr6 are approximately  $37 \pm 9 \mu\text{m}$  and  $43 \pm 12 \mu\text{m}$  in average, respectively.



**Figure 1.** a) Microstructures of 60SiMn5 steel and b) 54SiCr6 steel in as received condition. Scale bar is 200  $\mu\text{m}$

### 3.2 Heat Treatment Results of 60SiMn5 and 54SiCr6 Samples

Quenching of 60SiMn5 steel provided various microstructures which mostly contain martensite in general (Figure 2). The effect of tempering is very pronounced as seen in other steel, 54SiCr6, (Figure 3). Fine pearlitic or fine pearlite+ferrite in as received state of 60SiMn5 steel have transformed into martensitic structure after holding at 850°C for 90 minutes followed by quenching, figure 2a, and its tempered form is given in figure 2b. The microstructures are fully martensitic in 2a and martensite+bainite in figure 2b. However, figures 2c and 2d show that the dominant microstructure in 60SiMn5 quenched in oil is mostly bainite+martensite and heavily tempered martensite (very small amount) with bainitic and ferrite presence in globular form, respectively. As indicated in 1a that the emergence of the lenticular martensitic structure with a dark colour gives relative information about the thickness or coarseness of the structure. The tempering causes these individual martensite plates to align themselves in parallel and form tempered martensite plates. Extra Mn in 60SiMn5 steel facilitates the formation of martensitic structure even at lower transformation temperatures (Ghosh and Olson, 1994, Loewy et al., 2014). Lowering the temperature of transformation causes a difference in the number of microstructures and morphology. Wang et al (Wang et al 2000) proposed a formula to calculate the Ms temperature in steels. According to this formula, Ms temperature of steels studied are 232°C for 54SiCr6 steel and 220°C for 60SiMn5 steels, which are very close to each other. This explains difference in microstructures as well the addition of extra Si. The quenching medium is not expected to affect the outcome since the composition is very close in range, especially C and Mn. Cr, C and Mn will move the TTT curve towards right, which eases the formation of martensite and Cr also lowers the transformation temperature while Si reduces the amount of pearlite (Mesplont 2002).



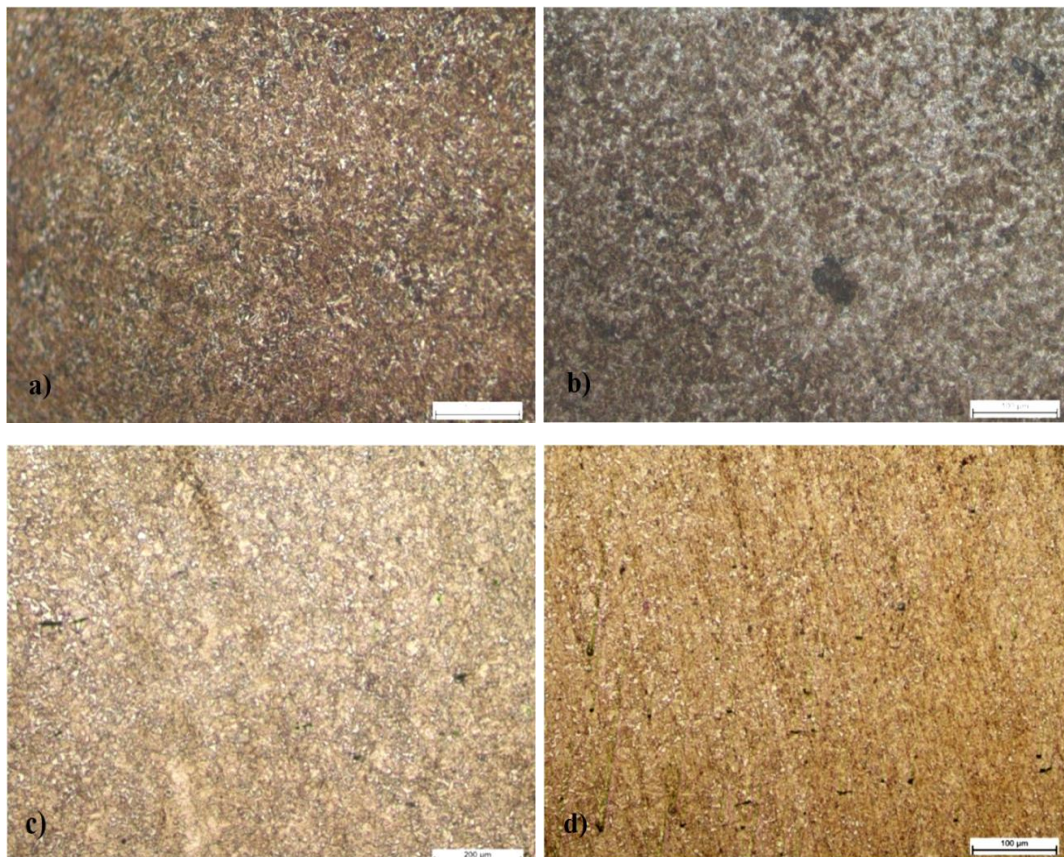
**Figure 2.** a) Water quenched, b) Oil-quenched, c) Water quenched and tempered d) Oil-quenched and tempered 60SiMn5 sample microstructure. The scale bar is 50  $\mu\text{m}$

Water and oil cooling generally result in different morphological effects in the microstructure. These effects can be of two types. The first is the refinement of the microstructure or the fact that a much finer structure is usually more profound and the other is the amount of the dominant structure compared to remaining microstructural features. It is expected that the structure prevailing in oil cooling/quenching is less complex and the appearance of martensite is likely to emerge differently. While the appearance of the martensitic structure that appears with the tempering process changes slightly, it is expected that the hardness values will also change according to the quenching environment and temperature. The shape change of acicular structures towards round form is usually very common and is the result of migration of interface active elements such as C, N and Cr etc... These elements have usually low solid solution forming capacity or low solubility comparable to other elements for a given temperature (Villa et al., 2015; Tsuzaki and Maki, 1981; Liu et al., 2003).

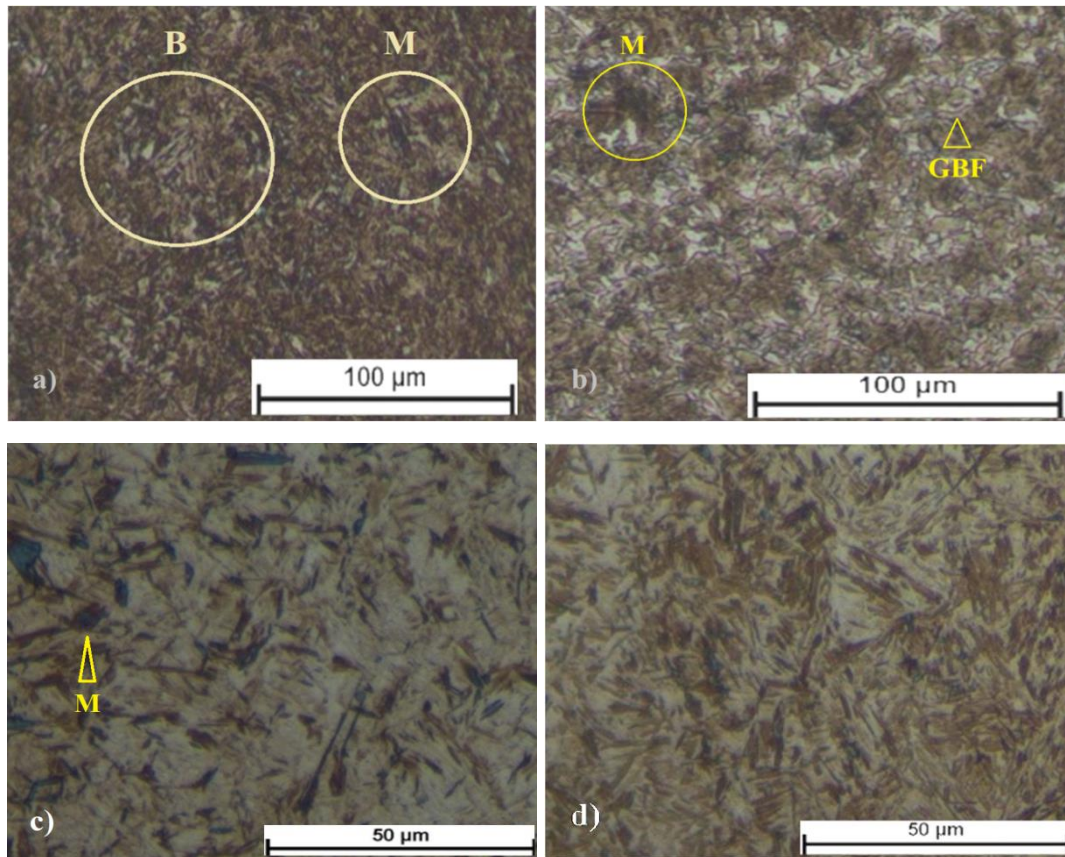
Figure 3 shows the effect of cooling rate of 54SiCr6 steel in water and oil. Figure 3 shows that martensite is dominant structure in heat treated specimens. However, figure 4 show high magnification images. Although, martensite and bainite morphology appears in figure 4a and b. Upper bainite is defined as separated ferrite and carbide in parallel form, figure 4a. The rest of microstructure is dominantly martensite. Oil quenching, figure 4b, however, produced more interesting structure than water quenched specimens. The grain boundaries are clearly obvious and grain boundary ferrite (marked as GBF) exists along the boundaries in the form of either in continuous form or interrupted/discontinuous form; the GBF forms and grow into the grains until the  $M_s$  temperature is reached. It is noted that the shape of martensite is somewhat mixed. Figures 4c and 4d show water (Figure 4c) and oil (Figure 4d) quenched microstructures from 60SiMn5 steel.

In figure 4c, water quenching resulted in highly deformed plate like martensite as indicated but oil quenching generated fine mixed structure both lath martensite and plate like martensite with general appearance and light dark features. Below 0.6 wt.% C, lath type of martensite and above approximately 1 wt.% C, plate like martensite is observed to form, for 0.6 and 1 wt.% C range, it is a mixed martensite combination is suggested (Stormvinter, 2011).

Depending on cooling rates, for alloyed steels, lath martensite formation is expected in case of severe cooling, while slower cooling is expected to form plate type martensite. For low alloyed steels, the presence of martensite is in the form of large packets of martensite. However, the alloying elements addition creates finer martensite planes compared to low alloy or low C steel microstructures (Kitahara et al., 2006, Morito et al., 2009). In lath type martensite, lattice distortion appears to be the most effective mechanism (Morito et al., 2006; Morito et al., 2003), but in less severe structures, this change emerges as a wider range of martensite plate appearance with the shift of atomic planes which is forced to form twin martensite structure after quenching. Lath martensite is composed of multiple parallel martensite stripes and a group of such lenticular formations or rather packets are located in parallel, giving a high hardness and high mechanical strength to the steel. This is a classic appearance in C containing iron or steel structures whereas non-C containing martensite, usually plate form, is found in Fe alloyed with Cr, for example. Plate martensite has a midrib which is the starting point for the twinning mechanism (Villa et al., 2014; Weidner et al., 2015; Loewy et al., 2014).



**Figure 3.** a) Water quenched, b) Oil-quenched, c) Water quenched and tempered d) Oil-quenched and tempered 54SiCr6 sample microstructure. The length of the measuring bars is 50 microns for a) and b)



**Figure 4.** Microstructures from 54SiCr6 steel a) Water quenched images of b) Oil quenched specimen; Microstructures from 60SiMn5 steel c) Water quenched and d) Oil quenched specimens (M: Martensite, GBF: Grain Boundary Ferrite, B: Bainite)

### 3.3 Hardness Results

Table 2 shows that the hardness values are higher in the samples quenched in water in both steel specimens. When microstructures of both steels are examined (Figure 2 and Figure 3), it can be predicted that the martensitic structure is more evident in these samples. Detailed discussion of the effects of alloying elements on the formability of martensite is given in previous section.

**Table 2.** Hardness values obtained from the samples in HR<sub>A</sub> unit

Specimen Code	As received	Medium of cooling			
		Water		Oil	
		Before Tempering	After Tempering	Before Tempering	After Tempering
60SiMn5	63.50	82.30	76.60	80.10	73.50
54SiCr6	60.30	75.80	74.20	72.20	71.40

The hardness values change according to the quenching environment and temperature in addition the content of alloying elements and most importantly C content (Tsuzaki and Maki, 1981). The main reason why these hardness values are different is that quenching provides more rapid cooling than oil cooling. Since the cooling rate is higher than the critical cooling rate, pearlitic and bainitic transformation is prevented and martensite structure is formed. Since the amount of martensite decreases when the cooling rate is low, the hardness of the oil-quenched samples is also less in steel with two different components of microstructures. The purpose of tempering is to



comparably reduce the amount of hardness in the matrix of the solid solution alloy, emanating from the formation of martensite. In this study, the tempering is as expected prominent parameter in reducing the level of hardness of matrix due to quenching (Razzak, 2011). The amount of hardness drop in 60SiMn5 is higher than that of 54SiCr6 spring steels. This is due to the effect from Mn since Mn does not form directly carbides but generates solid solution hardening which in case of heat treatment becomes less effective. Mn also promotes carbide formation in steels resulting in the matrix softening faster than carbide containing matrix which preserves its hardness due to finely distributed carbides (Ghosh and Olson, 1994; Çalik, 2009; Mudasiru et al., 2014; Tsuzaki and Maki, 1981).

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the microstructural and hardness values of water cooling i.e. quenching of 60SiMn5 and 54SiCr6 silicon spring steels in oil and water were studied with hardening treatment and followed by tempering at low temperatures. Following conclusions can be withdrawn from this study:

1. In both steels, the main microstructure in water quenching is less varied and the appearance of martensite emerges differently due to slow cooling in oil quenching. While the appearance of the martensitic structure that is treated with the tempering process changes little but, the hardness values change according to the quenching environment and tempering temperature as it is expected in other types of steels.

2. Quenching of 54SiCr6 steel provided various microstructures which mostly contain martensite in general compared to fully martensitic 60SiMn5. However, the effect of tempering is very pronounced in 54SiCr6.

3. The microstructural analysis showed that 54SiCr6 alloy contained a greater amount of ferrite structure on the grain boundaries than 60SiMn5 in as received condition. Pearlite+small amount of secondary phase structure appears dominant in both in as received microstructures.

4. The variety of microstructure in 54SiMn5 is less than that of 60SiMn5.

#### 5. REFERENCES

- Canale, L.C.F. and Penha, R.N., Overview of factors contributing to steel spring performance and failure. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2(3/4), 2007.
- Çalik, A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. *International Journal of Physical Sciences*, 4, 514-518, 2009.
- Dindar, Ç, Beytut, H. and Karagöz, S., Effect of Heat Treatment and Cross Section on The Crashworthiness of 51CrV4 Spring Steel. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 24(2), 477-488, 2019.
- Ghosh, G. and Olson, G.B. Kinetics of fcc-bcc heterogeneous martensitic nucleation - II. Thermal activation. *Acta Metallurgica Materialia*, 42(10), 3371, 1994.
- Kitahara, H., Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y. Crystallographic features of lath Martensite in low-carbon steel. *Acta Materialia*, 54, 1279-1288, 2006.

- Liu, Y.C., Sommer, F. and Mittemeijer, E.J. Abnormal austenite-ferrite transformation behaviour in substitutional Fe-based alloys. *Acta Materialia*, 51, 507-519, 2003.
- Loewy, S., Rheingans, B., Meka, S.R. and Mittemeijer, E.J. Unusual martensite-formation kinetics in steels: Observation of discontinuous transformation rates. *Acta Materialia*, 64, 93, 2014.
- Machado, I.F., Technological advances in steels heat treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 169-173, 2006.
- Mesplont, C., Phase transformations and microstructure-mechanical properties relations in complex phase high strength steels, University of Lille, 2002.
- Morito, S., Huang, X., Furuhashi, T., Maki, T. and Hansen, N., The morphology and crystallography of lath martensite in alloy steels. *Acta Materialia*, 54, 5323-5331, 2006.
- Morito, S., Adachi, Y. and Ohba, T., Morphology and crystallography of sub-blocks in ultra-low carbon lath martensite steel, *Materials Transactions*, 50(8), 1919–1923, 2009.
- Morito, S., Tanaka, H., Konishi, R., Furuhashi, T and Maki, T., The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys, *Acta Materialia*, 51(6), 1789–1799, 2003.
- Mudasiru, L.O., Babatunde, I.A., Raheem, W.A., Lasisi, A.K., Effect of immersion speed on the mechanical properties and microstructure of oil quenched AISI 1020 steel. *Journal of Engineering and Technological Research*, 6, 68-74, 2014.
- Razzak, M.A., Heat treatment and effects of Cr and Ni in low alloy steel. *Bulletin of Materials Science*, 34(7), 1439-1445, 2011.
- Rehrla, C., Kleber, S., Renka, O. and Pippan, R., Effect of grain size in compression deformation on the microstructural evolution of an austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 540, 55-62, 2012.
- Senthilkumar, T., Ajiboye, T.K., Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of medium carbon steel. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 11, 143-152, 2012.
- Stormvinter, A., Borgenstam, A. and Hedstrom, P., Investigation of lath and plate martensite in a carbon steel, *Solid State Phenomena*, 172, 61-66, 2011.
- Tsuzaki, K. and Maki, T., The effect of cooling rate on the morphology of lath martensite in Fe-Ni alloys. *Journal of Japan Institute of Metals*, 45, 126, 1981.
- Villa, M., Pantleon, K., Reich, M., Kessler, O. and Somers, M.A.J., Kinetics of anomalous multi-step formation of lath martensite in steel. *Acta Materialia*, 80, 468-477, 2014.
- Villa, M., Hansen, M.F., Pantleon, K. and Somers, M.A.J., Thermally activated growth of lath martensite in Fe-Cr-Ni-Al precipitation hardenable stainless steel. *Materials Science and Technology*, 31, 115-122, 2015.
- Wang, J., Van der Wolk, P.J., Van der Zwaag, S., Determination of Martensite Start Temperature in Engineering Steels Part I. Empirical Relations Describing the Effect of Steel Chemistry, *Materials Transactions JIM*, 41, 761-768, 2000.
- Weidner, A., Segel, C., Biermann, H., Magnitude of shear of deformation-induced  $\alpha'$  martensite in high-alloy metastable steel, *Materials Letters*, 143, 155-158, 2015.

Araştırma Makalesi / Research Article

**Rulmanlı Yatak Uygulamaları için Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen ve Döküm Poliamit Termoplastik Esaslı Polimerlerinin Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması**

Hüseyin ÜNAL<sup>1</sup>, Kemal ERMIŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-6647>, unal@subu.edu.tr

<sup>2</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3110-2731>, ermis@subu.edu.tr

Geliş/ Recieved: 19.11.2020;

Kabul / Accepted: 27.11.2020

**ÖZET:** Bu deneysel çalışmada, rulmanlı yatak uygulamalarında kullanılacak aşınmaya dayanıklı en iyi özellik gösteren polimer malzemeyi tespit etmek için katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMA-PE) ve döküm poliamit (Döküm PA) polimerleri kullanılmıştır. Tribolojik testler için, disk üzerinde pimli bir aşınma test düzeneği ve karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri, 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s gibi üç farklı kayma hızında ve 49N, 98N ve 147N üç farklı yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler sonucunda, en yüksek spesifik aşınma oranı kayma hızı 2.0 m/s ve 49N yük altında  $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değerine sahip çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde elde edilmiştir. En düşük spesifik aşınma oranı ise kayma hızı 1.0 m/s ve 147N yük altında  $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değeri ile katkısız döküm poliamit polimerinde elde edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri, döküm poliamit polimere göre ortalama 3.5 kat daha yüksek aşınmaya karşı dirençlidir. Tribolojik performans açısından bakıldığında, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri, rulmanlı yatak uygulamaları için en uygun malzeme olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma, Termoplastik, Poliamit, ÇYMA-PE, Polimer.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [ermis@subu.edu.tr](mailto:ermis@subu.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Ünal, H., Ermiş, K (2020). Rulmanlı Yatak Uygulamaları için Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen ve Döküm Poliamit Termoplastik Esaslı Polimerlerinin Tribolojik Performanslarının Karşılaştırılması. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 85-96.

## Comparison of Tribological Performance of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene and Casting Polyamide Thermoplastic Based Polymers for Roller Bearing Applications

**ABSTRACT:** In this experimental study, pure ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and casting polyamide (Casting PA) polymers were used to find the best wear resistant polymer material that can be used in rolling bearing applications. For tribological tests, a wear test device with a pin on the disc and AISI 316L stainless steel material as the counter disc material were used. The wear and friction tests were carried out under three different sliding speeds of 0.5, 1.0, and 2.0 m/s and under three different loads of 49N, 98N, and 147N. As a result of the data obtained from the study, the highest specific wear rate was obtained in ultra-high molecular weight polyethylene polymer with a sliding speed of 2 m/s and a value of  $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  under 49N load. The lowest specific wear rate was obtained in the pure casting polyamide polymer with a sliding speed of 1.0 m/s and a value of  $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  under 147N load. According to the test results obtained, the ultra-high molecular weight polyethylene polymer is 3.5 times higher in wear resistance than the casting polyamide polymer. In terms of tribological performance, ultra-high molecular weight polyethylene polymer has been determined as the most suitable material for rolling bearing applications.

**Keywords:** Wear, Thermoplastics, Polyamide, UHMWPE, Polymer.

### 1. GİRİŞ

Rulmanlı yataklar, bir makine sisteminin emniyetinde ve güvenilirliğinde en önemli rol oynayan makine elemanlarından birisidir. Rulmanlı yatak hataları, büyük ölçüde bir rulmanın titreşimlerini etkilediğinden, büyük rulman yatak titreşimleri aşınmaları ve sürtünmelerini artırarak sistem elemanlarında bozulmaya sebep olmaktadır. Rulman, çalışma bölgesinde makara arızasından dolayı dönerken hem dış bileziği hem de iç bileziği etkilemektedir. Bununla birlikte, silindir arızası, merkezkaç kuvvetleri nedeniyle yalnızca yüksüz bölgedeki dış halkayı etkilemektedir. Silindir kusurları olan bir silindirik makaralı rulmanın titreşim özelliklerinin deneysel gözlemler ve dinamik modelleme sonucunda, silindir hatası ile iç yatak arasındaki etkileşim süresinin silindir hatası ile dış yatak arasındaki süreden daha uzun olduğu gözlenmiştir (Niu et al., 2020). Son yıllarda birçok ticari firma tarafından farklı uygulama alanlarında kullanılmak üzere polimer esaslı rulmanlı yataklar imal edilmektedir. Bunlardan birisi örnek olarak Şekil 1’de verilmiştir (Anonymous, 2016).



Şekil 1. Polimer esaslı rulmanlı yatak görüntüleri

Poliamitler (PA), fiyat-performans özellikleri nedeniyle mühendislik termoplastiklerinin en önemli gruplarından birisidir. Bu polimerlere, cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf ilave edilmesi ile üretilen kompozit malzemeden yüksek mekanik özellikler elde edilir (Kim et al., 2019; Rajak et al., 2019; Kausar, 2019; Chen et al., 2016; Fredi et al., 2018). Kestamid olarak da adlandırılan döküm

poliamitler, bir çeşit poliamit türü olmakla beraber belli ölçüde çapraz bağlı moleküler yapısı nedeni ile daha üstün özellikler gösteren poliamit çeşitlerinden birisidir (Taşdelen, 2007). Yüksek mekanik dayanım, sertlik ve darbe emme özelliği, elektriksel yalıtkanlık, yüksek aşınma direnci ve kimyasallara direnç özelliklerinden dolayı poliamit rulmanlı yatak uygulamaları birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Örneğin; yük altında uzun süre çalışabilme özelliği ve yüksek aşınma direnci nedeniyle konveyör rulolarının rulman yataklarında, kullanıldığı yerlerde yağlamaya ihtiyaç duyulmadığından rijit ve kaygan bir yüzeye sahip olduğundan yataklama burçlarında ve rulman yataklarında tercih edilmektedir.

Katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenler (ÇYMA-PE) polimerinin yoğunluğu ortalama  $0.96 \text{ g/cm}^3$  civarında olup molekül ağırlığı ise milyonlar seviyesindedir. Yüksek molekül ağırlık kavramının anlamı, polimeri oluşturan polimer zincirlerinin kristal yapı içinde çok sıkı bir biçimde yerleştiğidir. ÇYMA-PE polimer sert, tok ve aşınmaya karşı oldukça dirençlidir. Termoplastik malzemeler arasında en yüksek darbe direncine sahip olan polimerlerden birisidir. Kimyasal maddelere karşı dirençli, nem emme oranı az ve sürtünme katsayısı da oldukça düşüktür (Anonymous, 2020). ÇYMA-PE biyo-polimer malzeme uygulamaları ve polimer yatak malzemesi olarak kullanılabilir en elverişli termoplastik polimerlerden birisidir. Buna ilaveten ÇYMA-PE polimeri, kimyasal stabilite ve yüksek darbe dayanımı yanında yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı gibi mükemmel tribolojik özelliklere de sahiptir (Onate et al., 2001; Briscoe and Sinha, 2002). Rulmanlı yatakların performansını ve dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de metal ve plastik malzeme arasında temas gerçekleştiğinde ÇYMA-PE polimerinin aşınma hızıdır (Unal ve ark., 2014, Kahyaoglu and Unal, 2012). Literatür incelendiğinde ÇYMA-PE ve döküm poliamit polimerlerinin tribolojik özellikleri üzerine çok çalışma olmasına rağmen rulman yatak uygulamalarında kullanımı ile uygulanan kayma hızının ve yükün tribolojik özelliklere etkisi üzerine çalışmalara literatürde az rastlanmıştır. Sarı ve Nteziyaremy (2016) sadece sürtünme katsayısını belirleme çalışmasında, Kestamid, Kestamid/HS (ısı stabiliteli), Kestoil, Kestlub ve Ulpolen 1000 polimer yatak malzemelerinin 50, 75 ve 100 d/d dönme hızlarındaki ve 15, 25 ve 35 N yüklerdeki sürtünme katsayısı incelemiştir. Deney sonucunda Kestoil yatak malzemesinin sürtünme katsayısının diğer yatak malzemelerinki ile kıyaslandığında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Demirci ve Düzcükoğlu (2014) kayma hızı, yatak basıncı ve sıcaklığın saf PA 66 (Poliamit 66), poliamit 66+%18 Politetrafloretillen (PA66+%18PTFE) ve poliamit 66+%20 cam elyaf ve %25 Politetrafloretillen (PA66+%20GFR+%25PTFE) polimerlerinin sürtünme ve aşınmasına etkisini, muylu rulmanların ortam koşullarında incelemiştir. Çalışma sonucunda cam elyaf takviyesi ve PTFE katkının poliamit 66 polimerinin tribolojik özellikleri, çekme mukavemeti, tokluk ve sertlik gibi mekanik özelliklerine etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Buna ilaveten sürtünme katsayılarının, temas sıcaklıklarının ve aşınma hızının film oluşturma, artan sıcaklık, basınç ve hızlardan etkilendiğini tespit etmişlerdir. En iyi aşınma direnç özelliklerini, deneyde kullanılan PA66 + %20GFR + %25PTFE polimer malzemesinde tespit etmişlerdir. Poliamit polimerlerde, düşük kayma hızlarında düşük aşınma hızı değerleri gözlenmiştir (Srinath and Gnanamoorthy, 2007; Ravi Kumar et al., 2009; Shibata et al., 2014; Abdel-Jaber et al., 2014).

Geleneksel olarak kullanılan metal ve polimer kaymalı yatakların maliyeti düşüktür ve kuru kayma sürtünmesi koşulları altında çalışabilir ve bununla birlikte, bu tür yatakların spesifik aşınma hızları kabul edilemeyecek seviyede yüksek olabilir (Kurtz, 2009). ÇYMA-PE polimeri ile metal teması olan kaymalı yataklar, özellikle düşük yüklerde karşılaştırıldığında, sürtünme yüzeyi pürüzlülüğünde ve sürtünme katsayısında hafif azalma, malzemenin yorulma direnci ve tokluk gibi mekanik özelliklerinde ise hafif artış gözlenmiştir. (Dangshen, 2004; Karuppiah et al., 2008; Chang

et al., 2013; Fu et al., 2011; Maksimkin et al., 2017; Wang et al., 2017). Biyomedikal uygulamalardan birisi olan diz operasyonlarında ÇYMA-PE polimerine alternatif rulman malzemeleri olarak saf PEEK polimeri ve karbon elyaf takviyeli polietereterketon (PEEK+GFR) polimer kompoziti kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ÇYMA-PE polimerine göre iki kat daha kötü aşınma performansı elde edilmiştir (Brockett et al., 2017).

Bu deneysel çalışmada, katkısız çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen ve döküm poliamit polimerleri kullanılmıştır. Tribolojik testlerde pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Tribolojik testler 49N, 98N ve 147N yükler altında ve 0.5 m/s, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızlarında oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, rulmanlı yatak uygulamalarında kullanılabilecek aşınmaya dayanıklı en iyi özellik gösteren polimer malzeme tespit edilmiştir.

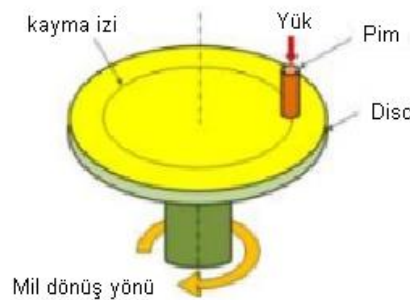
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Tribolojik deneylerde iki farklı endüstriyel termoplastik polimer malzeme kullanılmıştır. Hem çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen hem de döküm poliamit polimeri çubuk formunda temin edilmiştir.

### 2.1 Sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma hızı ölçümü

Tribolojik deneyler, ASTM G99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma ve sürtünme testleri bir kola sabitlenmiş bir polimer pimin bir elektrik motorundan aldığı hareketle dönen bir AISI 316L paslanmaz çelik diskin birbirine temas ettiği bir aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Disk üzerindeki pim olacak şekilde özel olarak dizayn edilmiş bir aşınma test cihazının şematik diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan polimer pim numunelerin boyutları 6x50 mm uzunluğundadır. Burada 6 mm pim çapı ve 50 mm ise pimin uzunluğudur. Polimer pim malzemeler revolver tornada hassas bir şekilde işlenerek aşınma test numune ölçülerine getirilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde karşı disk malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik disk malzemesi kullanılmıştır. Disk malzemeler, 5 mm kalınlığında ve 90 mm çapında olacak şekilde önce geleneksel bir tornada işlenmiş ardından ise düzlem yüzey taşlama işlemlerine maruz bırakılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneylerinden önce, ÇYMA-PE ve döküm poliamit polimer pim malzemeler ve karşı çelik disk yüzeyleri 1200 nolu zımpara ile zımparalanmıştır. Her test öncesi hem disk yüzeyleri hem de pim yüzeyleri asetonla temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan pim-disk aşınma test cihazının şematik görünüşü

Tribolojik deneylerde Şekil 2'de şematik resmi verilen pim-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi disk malzeme tek yönlü hızı ayarlanabilir bir elektrik motoru ile döndürülmektedir. Şekilde görülen diskin üzerine deneyde kullanılan 5 mm et kalınlıklı ve 90 mm

çaplı AISI 316L paslanmaz çelik disk monte edilmektedir. Test edilecek pim malzemeler olan ÇYMA-PE ve döküm PA polimerleri pim tutucu bir mekanizmaya bağlanarak hareketli yükleme koluna monte edilmektedir. Bu yükleme kolu, numuneye yanal yüklerin uygulanmasına izin verebilecek şekilde yataklanmıştır.

Deneyler sırasında, sürtünme kuvveti yükleme koluna monte edilmiş bir yük hücresi ile ölçülmektedir. 66 dakikalık deney süresi boyunca her 60 saniyede yaklaşık 1500 veri okunmuş ve bilgisayarda bir Excel programında kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti olarak ifade edilen yanal yükler uygulanan normal yüke bölünerek malzeme çiftinin sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) Eşitlik 1. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (1)$$

Burada;  $\mu$  polimer malzemelerin sürtünme katsayısı,  $F_f$  deneylerde ölçülen yanal yük ve  $F_N$  ise normal yüküdür.

Yine deneylerde kullanılan pim malzemelerin aşınma miktarı deney öncesi ve deney sonrası ağırlık farkı alınarak tespit edilmiştir. Pim malzeme ağırlık ölçümleri 0,1 mg hassasiyete Precia marka 220 g kapasiteli bir terazi ile gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin spesifik aşınma hızı ( $W_s$ ) [ $m^2/N$ ] Eşitlik 2. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{(\Delta V)}{A \times L \times P} \quad \text{veya} \quad W_s = \frac{(\Delta m)}{L \times \rho \times F_N} \quad (2)$$

Yukarıdaki Eşitlik 2'de;  $\Delta V$  pim numunelerinin aşınma hacmi,  $\Delta m$  deney sonrası ve öncesi kütle kaybı,  $A$  temas alanı,  $\rho$  yoğunluk,  $P$  uygulanan basınç,  $F_N$  normal yük ve  $L$  ise kayma yoludur. Bu çalışma için seçilen aşınma test parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Tribolojik test şartları

Deney parametreleri	Deney şartları
Uygulanan yük (N)	49, 98 ve 147
Kayma hızı (m/s)	0.5, 1.0 ve 2.0
Çalışma sıcaklığı (°C)	23±2
Ortam nem oranı (%)	55±2
Kayma yolu (m)	2000
Disk yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ , $\mu m$ )	0.36

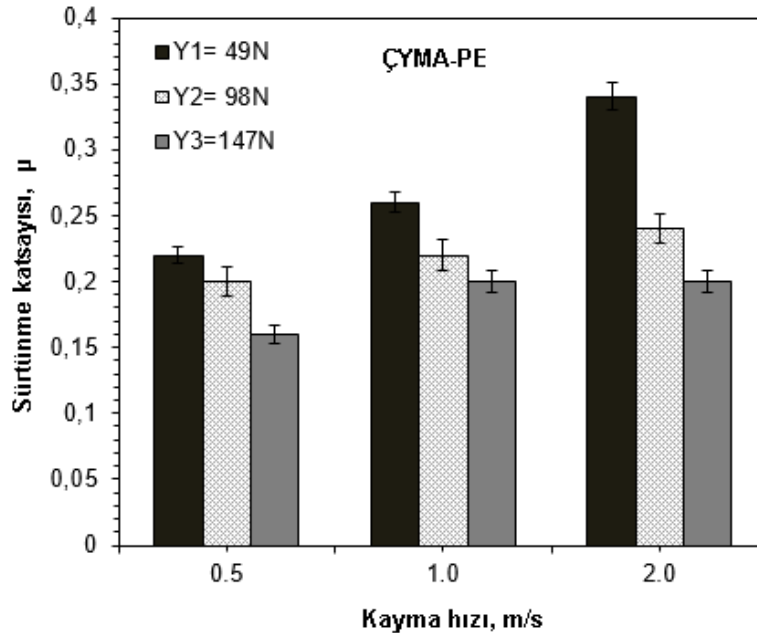
Bu çalışmada kullanılan ÇYMA-PE termoplastik polimeri ile döküm poliamit polimerlerinin tribolojik test sonuçları Çizelge 2'de gösterilmektedir. Tribolojik deneyler, 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızlarında ve 49N, 97N ve 147N yükler altında kuru kayma şartlarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik deneylerde kullanılan malzemelerin farklı hız ve yüklerdeki spesifik aşınma hızı değerleri ( $mm^3/Nm$ ) hesaplanmış ve sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) değerleri de ölçülmüştür (Bakınız Çizelge 2).

**Çizelge 2.** Deneyde kullanılan malzemeler ve deneyler sonucunda elde edilen tribolojik özellikleri

Polimer malzemeler	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)					
		0.50		1.0		2.0	
		Spesifik aşınma hızı (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme katsayısı, (μ)	Spesifik aşınma hızı (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme katsayısı, (μ)	Spesifik aşınma hızı (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme katsayısı, μ
ÇYMA-PE	49	7.45E-6	0.22	9.6E-6	0.26	13.0E6	0.34
	98	5.9E-6	0.20	6.4E-6	0.22	8.0E-6	0.24
	147	5.0E-6	0.16	4.6E-6	0.20	6.8E-6	0.20
Döküm PA	49	28E-6	0.22	36E-6	0.26	53E-6	0.27
	98	20E-6	0.19	24E-6	0.20	29E-6	0.21
	147	14E-6	0.17	17E-6	0.18	22E-6	0.18

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te deneylerde kullanılan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen termoplastik esaslı polimerin farklı yükler altında sürtünme katsayısının uygulanan hıza göre değişimi verilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneylerinde kullanılan çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin sürtünme katsayısı değerleri tüm kayma hızı şartlarında uygulanan yükün artması ile azalma göstermiştir. Uygulanan yükün %200 oranında artırılması ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin sürtünme katsayısındaki azalma sırasıyla 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızları için ortalama %27, %23 ve %41 oranında olmuştur.



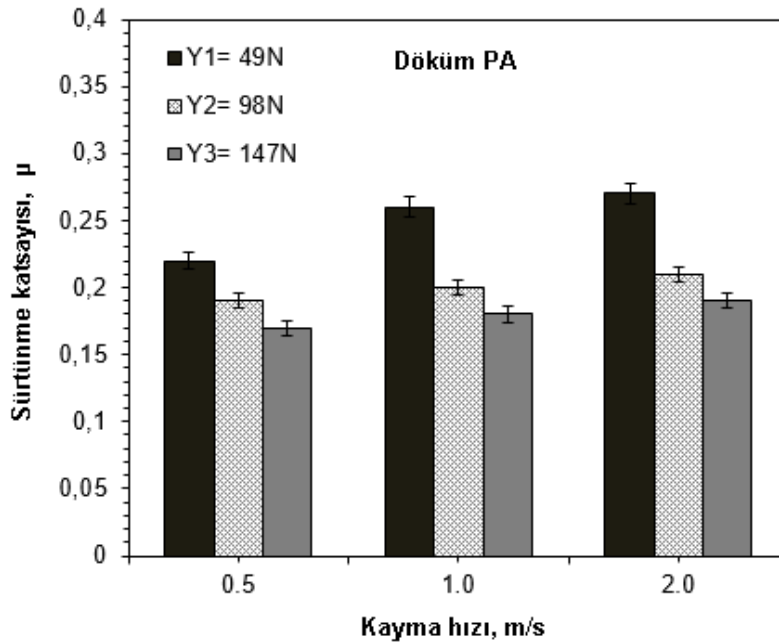
**Şekil 3.** Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi

Benzer şekilde, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerine aşınma ve sürtünme deneylerinde uygulanan hızın artırılması ile sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Uygulanan hızın %200 oranında artırılması ile ÇYMA-PE polimerinin sürtünme katsayısında sırasıyla 49N, 98N ve 147N yükler için ortalama %54, %20 ve %30 oranında artış olmuştur. En düşük sürtünme katsayısı 0.16 değeri ile 0.5m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilirken en yüksek



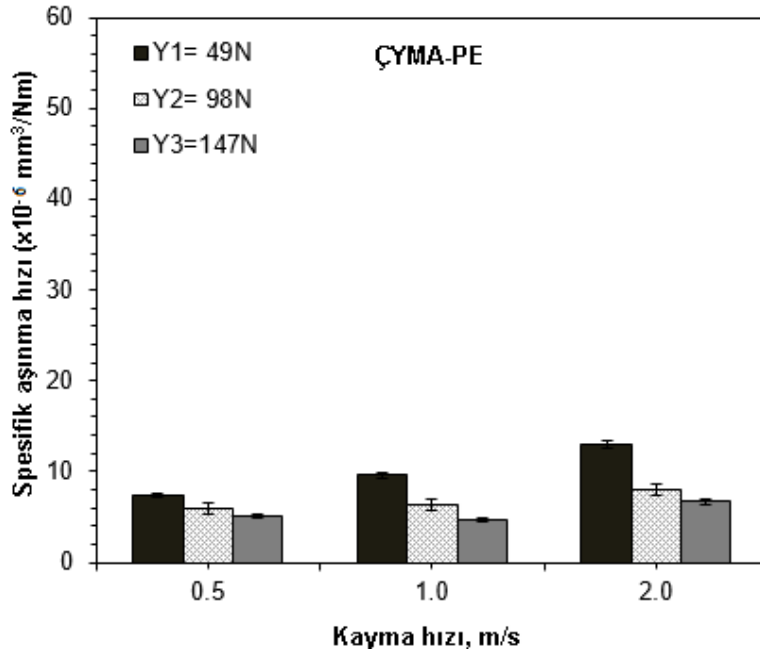
sürtünme katsayısı ise katsayısı 0.34 değeri ile 2.0m/s kayma hızında ve 49N yük altında elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan hıza göre değişimi Şekil 4’te verilmiştir.

Deneylerde kullanılan döküm poliamit malzemenin sürtünme katsayısı değerleri de çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde olduğu gibi tüm kullanılan kayma hızı şartlarında uygulanan yükün artması ile beraber azalma göstermiştir. Uygulanan yükün 49N’dan 147N değerine %200 oranında artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısındaki azalma sırasıyla 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızları için ortalama %8.9, %30.7 ve %29.6 oranında olmuştur. Benzer şekilde, tribolojik deneylerde uygulanan hızın artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Uygulanan hızın 0.5 m/s den 2.0 m/s’ye artırılması ile yani hızın %200 oranında artırılması ile döküm poliamit polimerinin sürtünme katsayısında sırasıyla 49N, 98N ve 147N yükler için ortalama %22.7, %10.5 ve %11.7 oranında artış gözlenmiştir. En düşük sürtünme katsayısı 0.17 değeri ile 0.5 m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilirken, en yüksek sürtünme katsayısı 2.0 m/s kayma hızında ve 49N yük altında 0.27 değeri ile elde edilmiştir. Deneylerde hem çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen hem de döküm poliamit polimer malzemelerin sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu artış daha önce yapılan çalışmalarla (Unal ve ark., 2004; Unal and Mimaroglu, 2012; Kahyaoglu and Unal, 2012; Mimaroglu et al., 2015) benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. Döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi

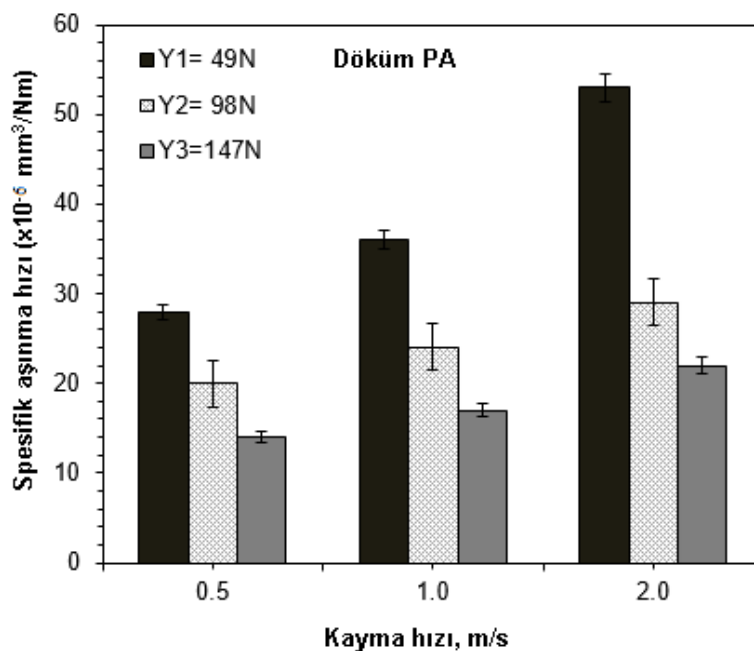
Bunun sebebi ise kayma hızının artması ile pim polimer ve paslanmaz çelik disk arasındaki temastan dolayı malzeme yüzeylerinde sıcaklık arttığı gözlenmiştir. Bu sıcaklık artışı değeri, muhtemelen deneylerde kullanılan polimerlerin camı geçiş sıcaklıklarına yaklaşmaktadır. Bu ise polimerin yumuşamasına sebep olmuş ve bunun sonucunda ise sürtünme katsayısının artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Deneylerde kullanılan farklı yükler altında spesifik aşınma hızının uygulanan hıza göre değişimi verilmiştir. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değişimleri Şekil 5’te gösterilmektedir.



**Şekil 5.** Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin farklı yükler altındaki spesifik aşınma hızı-kayma hızı ilişkisi

Şekilde görüldüğü gibi deneyde kullanılan ÇYMA-PE polimerinin spesifik aşınma oranı değerleri yaklaşık olarak  $10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm civarında bulunmuştur. En yüksek spesifik aşınma hızı  $13 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerinde 49N yük ve 2.0m/s kayma hızında elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı  $4.6 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile 1.0m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilmiştir. Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değerleri ortalama olarak sırasıyla  $6.13 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm,  $6.86 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm ve  $9.23 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak belirlenmiştir.

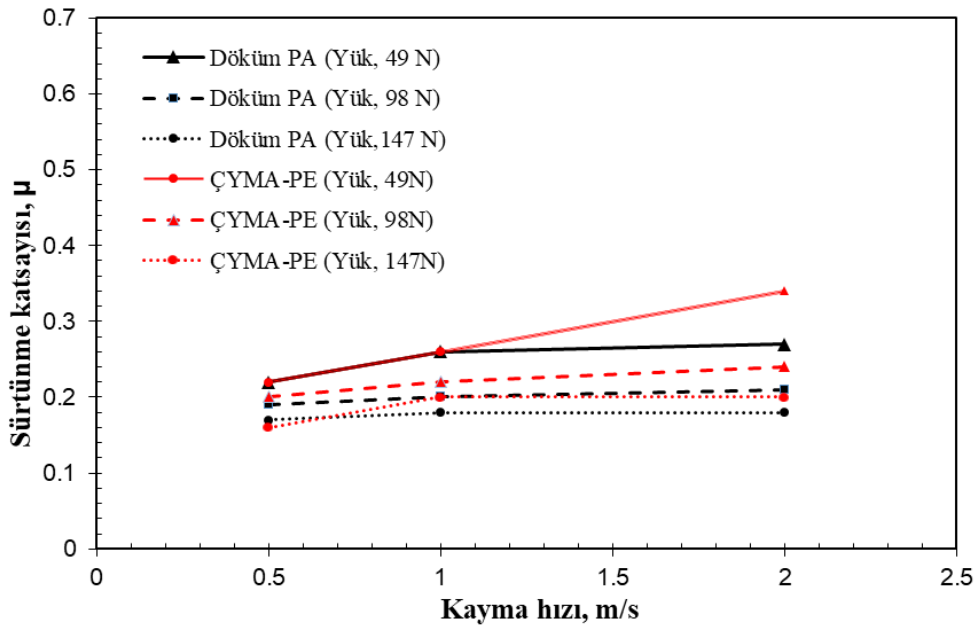
Şekil 6'da döküm poliamit polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızının kayma hızı ile değişimi verilmiştir.



**Şekil 6.** Döküm poliamit polimerinin farklı yükler altındaki spesifik aşınma hızı-kayma hızı ilişkisi

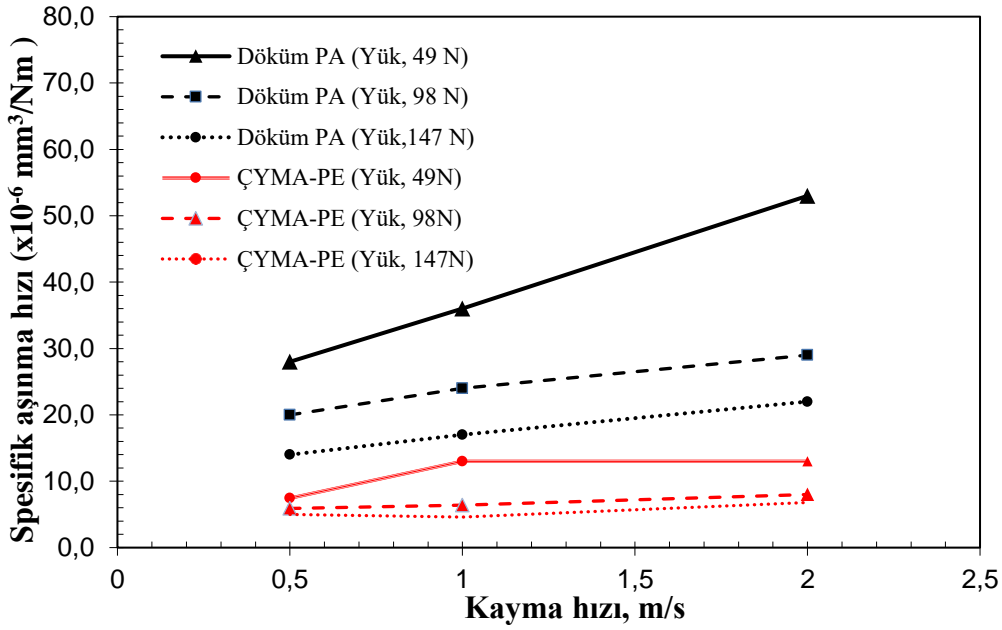
Şekilde 6’da görüldüğü gibi deneyde kullanılan döküm poliamit polimerinin spesifik aşınma hızı değerleri yaklaşık olarak  $10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm civarında olup en yüksek spesifik aşınma hızı  $53 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değerinde 49N yük ve 2.0 m/s kayma hızında elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı ise  $14 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm değeri ile 0.5 m/s kayma hızında ve 147N yük altında elde edilmiştir. Döküm poliamit polimerinin 0.5, 1.0 ve 2.0 m/s kayma hızındaki ve 49N, 98N ve 147N yükler altındaki spesifik aşınma hızı değerleri ortalama olarak sırasıyla  $20.6 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm,  $25.6 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm ve  $34.6 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm olarak belirlenmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi spesifik aşınma hızı uygulanan kayma hızının artması ile artış göstermektedir. Bu daha önce yapılan çalışmalarla (Unal ve ark., 2004; Unal and Mimaroglu, 2012; Kahyaoglu and Unal, 2012; Mimaroglu et al., 2015) uyum göstermektedir. Uygulanan kayma hızının artması ile spesifik aşınma hızının artması hem ÇYMA-PE polimeri hem de döküm poliamit polimerlerinin sürtünme yüzey sıcaklıklarının artarak camsı geçiş sıcaklıklarına yaklaşması ile yumuşaması ile açıklanabilir.

Şekil 7’de Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerindeki sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişkisi görülmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi deneylerde kullanılan her iki polimerin sürtünme katsayıları uygulanan yük arttıkça beklenildiği gibi azalırken uygulanan kayma hızının artması ile artış gözlenmiştir. Özellikle 49 N yük altında ÇYMA-PE polimerinin sürtünme katsayısı eğrisinin eğimi, kayma hızının artması ile belirgin bir artış göstermiştir. Düşük kayma hızlarında, deneyde kullanılan her iki polimer için de sürtünme katsayısı değerleri birbirlerine yakın çıkmaktadır. Kayma hızı arttıkça, bu iki polimer malzemenin sürtünme katsayısı değerleri arasındaki fark açılmakta ve Döküm PA polimeri yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayısında hafif azalma yönünde bir eğim göstermektedir.



Şekil 7. Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerinde sürtünme katsayıları-kayma hızı ilişkisi

Şekil 8’de deneylerde kullanılan her iki polimer için uygulanan yük azalınca spesifik aşınma hızı artmaktadır. Özellikle 49 N yük altında Döküm PA polimerinin spesifik aşınma hızının eğrisinin eğimi belirgin bir şekilde kayma hızının artması ile arttığı gözlenmiştir.



Şekil 8. Döküm PA ve ÇYMA-PE polimerinin farklı kayma hızlarında ve yüklerinde spesifik aşınma hızı -kayma hızı ilişkisi

Deneylerde kullanılan her iki polimerde, düşük kayma hızlarında birbirlerine daha yakın spesifik aşınma hızı değerleri göstermektedir. Kayma hızı arttıkça olarak ÇYMA-PE polimerleri ile Döküm PA polimerleri arasında fark artmakta ve Döküm PA polimeri ÇYMA-PE polimerine göre daha yüksek spesifik aşınma hızı değerleri göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde, ÇYMA-PE polimerinin, Döküm PA polimerine göre aşınmaya daha fazla dirençli olduğu tespit edilmiştir. 0,5 m/s kayma hızında, oransal olarak ÇYMA-PE polimerleri Döküm PA polimerine göre ortalama 3.31 kat, 1,0 m/s kayma hızında ortalama 3.4 kat ve 2 m/s kayma hızında ise ortalama 3.66 kat aşınmaya karşı çok daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Deneyde kullanılan kayma hızları arttıkça bu oran daha fazla artmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen ve döküm poliamit endüstriyel polimerlerinin çelik disk karşı disk malzemesine karşı çalışmaları durumunda aşağıdaki, sonuçlar çıkarılmıştır:

- Tribolojik testlerde kullanılan ÇYMA-PE ve Döküm PA polimerlerinin sürtünme katsayıları uygulanan hızın artması ile artmıştır.
- Deneylerde kullanılan her bir hızda hem ÇYMA-PE hem de Döküm PA polimerlerinin sürtünme katsayısı değerleri uygulanan yükün artması ile azalmıştır.
- Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenin spesifik aşınma hızı ortalama  $9.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  civarında iken döküm poliamit polimerinin spesifik aşınma hızı ortalama  $36 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak belirlenmiştir.
- En yüksek spesifik aşınma hızı 49N yük ve 2.0m/s kayma hızında  $53 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değeri ile döküm poliamit polimerinde elde edilirken en düşük spesifik aşınma hızı ise 98N yük ve 1,0m/s kayma hızında  $4.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değeri ile çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinde elde edilmiştir.

- Elde edilen deney sonuçlarına göre döküm poliamit polimeri, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerine göre ortalama 3.5 kez daha fazla aşınmaktadır.
- Testlerde elde edilen deney sonuçlarına ilaveten, ÇYMA-PE polimeri oldukça uzun zincir yapısına sahiptir. Bu sebeple yüksek tokluk, darbe dayanıklılığı ve aşınma direnci özellikleri gösterir. Bunlara ilaveten hafiflik, dış hava şartlarına direnç ve düşük nem alma gibi özellikleri ile döküm poliamit polimerine göre ön plana çıkarmaktadır.
- Bu sebeple, triboloji çalışmasında kullanılan yük ve hız aralıklarında çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri makine sektöründe rulmanlı yatak uygulamalarında kullanım için en uygun polimer olduğu tespit edilmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abdel-Jaber G.T., Mohamed M.K., Ali W.Y., Effect of Magnetic Field on the Friction and Wear of Polyamide Sliding against Steel. *Materials Sciences and Applications* 5, 46-53, 2014.
- Anonymous, 2016. SKF Polymer Products and Components, <https://evolution.skf.com/en/skf-polymer-products-and-components/> (Erişim Tarihi: 24.11.2020).
- Anonymous, 2020. UHMWPE Pipe, [https://www.diytrade.com/china/pd/2014088/UHMWPE\\_PIPE.html](https://www.diytrade.com/china/pd/2014088/UHMWPE_PIPE.html) (Erişim Tarihi: 16.11.2020).
- Briscoe B.J., Sinha S.K., Wear of Polymers. *Journal Engineering Tribology, Proceedings Institution Mechanical Engineers Part J* 216(6), 401-413, 2002.
- Brockett C.L., Carbone S., Fisher J., Jennings L.M., PEEK and CFR-PEEK as Alternative Bearing Materials to UHMWPE in a Fixed Bearing Total Knee Replacement: An Experimental Wear Study. *Wear* 374, 86–91, 2017.
- Chang B-P., Akil H.M., Nasir R.B.M., Comparative Study of Micro- and Nano-ZnO Reinforced UHMWPE Composites Under Dry Sliding Wear. *Wear*, 297(1–2), 1120-1127, 2013.
- Chen, H., Lim, C.L.J. and Fong, L.C.: PolyOne Corp, Polyamide Compounds Containing Pitch Carbon Fiber. U.S. Patent 9,243,178 2016.
- Dangshen X., Friction and Wear Properties of UHMWPE Composites Reinforced with Carbon Fiber. *Materials Letters* 59, 175–179, 2005.
- Demirci M.T., Düzcükoğlu H., Wear Behaviors of Polytetrafluoroethylene and Glass Fiber Reinforced Polyamide 66 Journal Bearings. *Materials and Design* 57, 560-567, 2014.
- Fredi G., Dorigato A., Pegoretti A., Multifunctional Glass Fiber/Polyamide Composites with Thermal Energy Storage/Release Capability. *Express Polymer Letters* 12(4), 349–364, 2018.
- Fu J., Ghali B.W., Lozynsky A.J., Oral E., Muratoglu O.K., Wear Resistant UHMWPE with High Toughness by High Temperature Melting and Subsequent Radiation Cross-Linking. *Polymer* 52(4), 1155-1162, 2011.
- Kahyaoglu O.K., Unal H., Friction and Wear Behaviours of Medical Grade UHMWPE at Dry and Lubricated Conditions. *International Journal of Physical Sciences* 7(16), 2478-2485, 2012.
- Karuppiyah K.S.K., Bruck A.L., Sundararajan S., Wang J., Lin Z., Xu Z-H., Li X., Friction and Wear Behavior of Ultra-High Molecular Weight polyethylene as a Function of Polymer Crystallinity. *Acta Biomaterialia* 4, 1401–1410, 2008.
- Kauser A., Advances in Carbon Fiber Reinforced Polyamide-Based Composite Materials. *Advances in Materials Science* 19(4) 67-82, 2019.

- Kim Y.S., Kim J.K., Jeon E.S., Effect of the Compounding Conditions of Polyamide 6, Carbon Fiber and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the mechanical and Thermal Properties of the Composite Polymer. *Materials* 12 3047,1-14, 2019.
- Kurtz S.M., UHMWPE Biomaterials Handbook, Academic Press, Second Edition, USA, 2009.
- Maksimkina A.V., Danilovb V.D., Senatova F.S., Olifirova L.K., Kaloshkin S.D., Wear Performance of Bulk Oriented Nanocomposites UHMWPE/FMWCNT and Metal-Polymer Composite Sliding Bearings. *Wear* 392–393, 167-173, 2017.
- Mimaroglu A., Unal H., Sumer M., Ozel A., Friction and Wear of GUR 1020 Medical Grade Uhmwpe Polymer at Dry Environmental Condition. *Manufacturing Science and Technology* 3(4), 111-113, 2015.
- Niu L., Cao H., Hou H., Wu B., Lan Y., Xiong X., Experimental observations and dynamic modelling of vibration characteristics of a cylindrical roller bearing with roller defects. *Mechanical Systems and Signal Processing* 138, 106553, 2020.
- Onate J.I., Comin M., Braceras I., Garcia, A., Viviente, J.L., Brizuela, M., Garagorri N., Peris J.L. Alava J.I., Wear reduction effect on ultra-high-molecular-weight polyethylene by application of hard coatings and ion implantation on cobalt chromium alloy, as measured in a knee wear simulation machine. *Surface and Coating. Technology* 1056, 142-144, 2001.
- Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes M.L., Linul E., Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers* 11(10), 1667, 2019.
- Ravi Kumar B.N., Suresha B., Venkataramareddy M., Effect of particulate fillers on mechanical and abrasive wear behavior of polyamide 66/polypropylene nanocomposites. *Materials and Design* 30, 3852–3858, 2009.
- Sarı A., Nteziyaremy Ö.S., Polimer Yatak Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 16, 446-453, 2016.
- Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K., Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites. *Wear* 317, 1-7, 2014.
- Srinath G., Gnanamoorthy R., Sliding wear performance of polyamide 6–clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology* 67, 399-405, 2007.
- Taşdelen Y., Polimer malzemelerin sfero döküm karşısında aşınma davranışlarının incelenmesi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, (Basılmış), 2007.
- Unal H., Mimaroglu A., Friction and Wear Performance of Polyamide 6 and Graphite and Wax Polyamide 6 Composites Under Dry Sliding Conditions. *Wear* 289, 132-137, 2012.
- Unal H., Sen U., Mimaroglu A., Dry Sliding Wear Characteristics of Some İndustrial Polymers Against Steel Counterface. *Tribology International* 37, 727-732, 2004.
- Unal H., Yetgin S.H., Findik F., The Effect of Applied Load and Sliding Speed on The Tribological Properties of Nylon 6 and Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene. *Industrial Lubrication and Tribology* 66(3), 498-504, 2014.
- Wang Y., Yin Z., Li H., Gao G., Zhang X., Friction and Wear Characteristics of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composites Containing Glass Fibers and Carbon Fibers Under Dry and Water-Lubricated Conditions. *Wear* 380–381, 42-51, 2017.

Araştırma Makalesi / Research Article

3 Serbestlik Dereceli Kaynak Konumlandırıcının İleri Kinematik Modelinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi

Şirin ADA<sup>1</sup>, Serkan ÇAŞKA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1121-3963>, sirin.adda@yandex.com

<sup>2</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-8931>, serkan.caska@cbu.edu.tr

Geliş/ Recieved: 03.11.2020;

Kabul / Accepted: 30.11.2020

**ÖZET:** Günümüzde endüstriyel robotlar üretimin her aşamasında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Robotlar özellikle ark kaynağı uygulamalarında genellikle bir kaynak konumlandırıcı ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sayede kaynak hızı artmakta ve robot kontrolü kolaylaşmaktadır. Son yıllarda, robotların kinematik modellerinin oluşturulmasında yapay zeka tabanlı yöntemler yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada 3 serbestlik dereceli kaynak konumlandırıcının ileri kinematik modeli yapay sinir ağları (YSA) ile elde edilmiştir. Yapay sinir ağındaki öğrenme algoritması türü ve gizli katmanda yer alan sinir hücresi sayısı değiştirilerek en iyi modellemenin bu parametrelerin hangi değerlerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Elde edilen YSA modellerinde en yüksek modelleme başarısının gizli katmanında 20 sinir hücresi bulunan ve Levenberg-Marquardt eğitim yöntemiyle elde edilen modelde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Robotik, İleri kinematik model, Yapay sinir ağları.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [serkan.caska@cbu.edu.tr](mailto:serkan.caska@cbu.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Ada, Ş., Çaşka, S. (2020). 3 Serbestlik Dereceli Kaynak Konumlandırıcının İleri Kinematik Modelinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(2), 97-102.

## Obtaining Forward Kinematic Model of 3 Degrees of Freedom Welding Positioner by Artificial Neural Networks

**ABSTRACT:** Today, industrial robots are widely used in all stages of production. Robots are generally used in combination with a welding positioner, especially in arc welding applications. In this way, the welding speed increases and robot control becomes easier. In recent years, artificial intelligence-based methods have become widespread in deriving kinematic models of robots. In this study, forward kinematic model of 3 degree of freedom welding positioner was obtained by artificial neural networks. Parameter values that provide best modeling was determined by changing the type of learning algorithm and the number of neural cells in the hidden layer of the artificial neural network. In obtained ANN models, it was determined that the highest modelling success was achieved in the model that has 20 nerve cells in the hidden layer and was obtained by Levenberg-Marquardt training method.

**Keywords:** Robotic, Forward kinematic model, Artificial neural networks.

### 1. GİRİŞ

Endüstriyel robotlar üretimin her aşamasında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Robotların genellikle kullanıldığı endüstriyel uygulamalar; boya, ark kaynağı, delme, çapak alma, montaj, enjeksiyon kalıplama, lazer kesim, su jeti ile kesim, makine besleme, taşıma, dövme, eğitim ve araştırma olarak sıralanmaktadır. 6 Eksenli robotlar genellikle bir kaynak konumlandırıcı ile birlikte kullanılmaktadır ve bu şekilde robotun hareket esnekliği artırılmaktadır. Kaynak konumlandırıcıları robotik kaynak işlemine başlıca iki yönden katkı sağlamaktadır; birincil olarak kazanılan ek serbestlik derecesidir, diğer katkı ise robot ile operatör arasında daha esnek eşzamanlı hareket sağlanmasıdır. Robotik alanının farklı konularında yayınlanmış çok sayıda araştırma sonuçları bulunmaktadır (Koca ve ark., 2020).

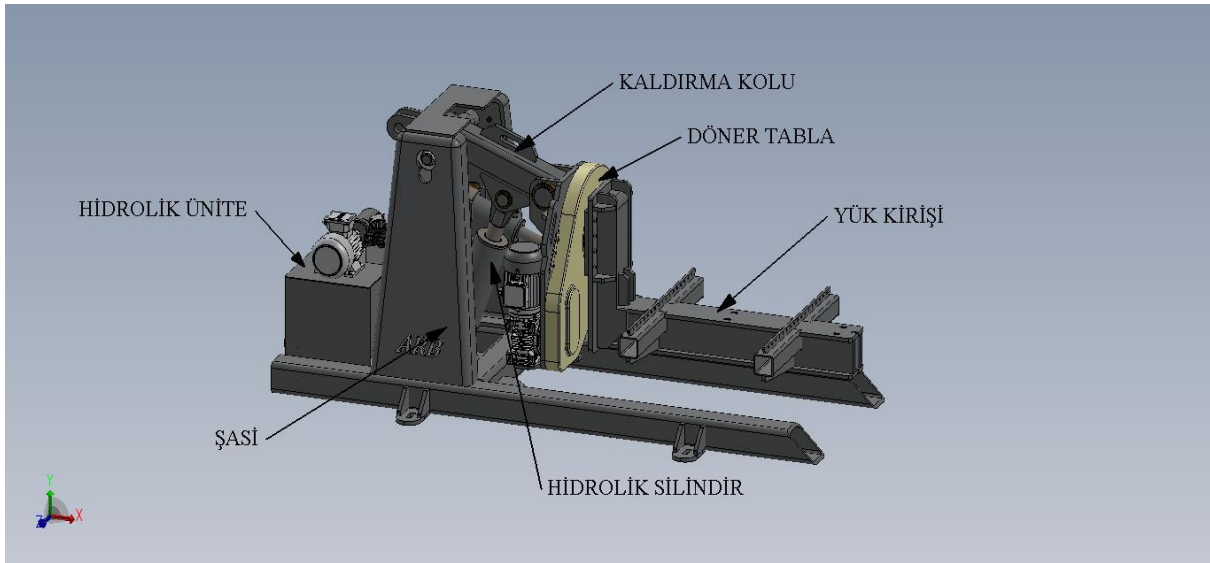
Karagülle ve ark.'nın, 2012 çalışmasında entegre tasarım yöntemi; tasarım ve uygulama süreci olarak iki kısma ayrılmıştır. Yapılan çalışmada entegre analizin farklı program paketlerinin API kabiliyetlerini içeren uygulamaları konusundaki gelişmeler ele alınmıştır. Şahbaz ve ark.'nın, 2007 çalışmasında eşzamanlı kontrol algoritması geliştirilerek kinematik tasarım süreci ve servo motor kontrol çalışmaları yapılmıştır. Ark kaynağı uygulamalarında robot-konumlandırıcı sisteminin off-line programlanması zaman alan bir süreçtir. Kim ve ark.'nın, 1998 çalışmasında gaz metal ark kaynağı için iki serbestlik dereceli konumlandırıcı ile robot sisteminin off-line programlama parametreleri ve kinematik yapısı tanımlanmıştır. Pashkevich ve ark., 2003 bir kaynak konumlandırıcının kinematik yapısını kapalı devre olarak tanımlamış ve özgün bir formülasyon geliştirmiştir. Pashkevich ve ark.'nın 2006, çalışmasında yatay kaynaklama metoduna önem verilerek kinematik kontrol hiyerarşisi, kaynak işleminin planlanması ve kaynak parametrelerinin seçimi incelenmiştir. Wu ve ark., 2015, kaynak uygulamaları için robotik platform tasarlamış ve bu platform için kontrol algoritması geliştirmiştir. Wittler ve ark., 1998, kaynak uygulamalarında kullanılmak üzere interaktif eniyileme yöntemi ve model tabanlı tasarım algoritması geliştirmiştir. Gujarathi ve ark.'nın, 2011 çalışmasında kaynak robotlarına yönelik bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) araçlarının etkin kullanımı ve entegrasyonu incelenmiştir. Pan ve ark.'nın, 2016 çalışmasında kaynak uygulamaları için özgün bir tasarım süreci amaçlanarak CAD-CAE yazılım platformu geliştirilmiştir.



Kinematik özellikler ve modeller robotların hareket analizlerinin yapılması için mutlaka tanımlanması gerekir (Koca ve ark., 2020). Bu çalışmada literatürde yapılan kaynak robotu çalışmalarından farklı olarak 3 serbestlik dereceli bir kaynak konumlandırıcının ileri kinematik modeli yapay sinir ağları ile elde edilmiştir. Literatürde Robotik alanında YSA ile kinematik model elde etme oldukça yaygındır (Çabuk ve Bakırcıoğlu, 2018). Yıldırım ve ark., 2004 yapay sinir ağları kullanarak dokuma makinalarında tığ mekanizmalarının kinematik analizi. YSA insan beynindeki hücrelerin modelleme kabiliyetine benzer bir şekilde modelleme yapan yazılımsal yapılardır. YSA oluşturulmasında öncelikle tek katmanlı yapılar kullanılmış ve bu yapılar doğrusal olmayan problemlerin çözümünde denenmiştir. Tek katmanlı YSA'lar ile istenen başarının elde edilememesi ile çok katmanlı YSA yapıları ile modelleme denenmiş ve tek katmanlı yapılara göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

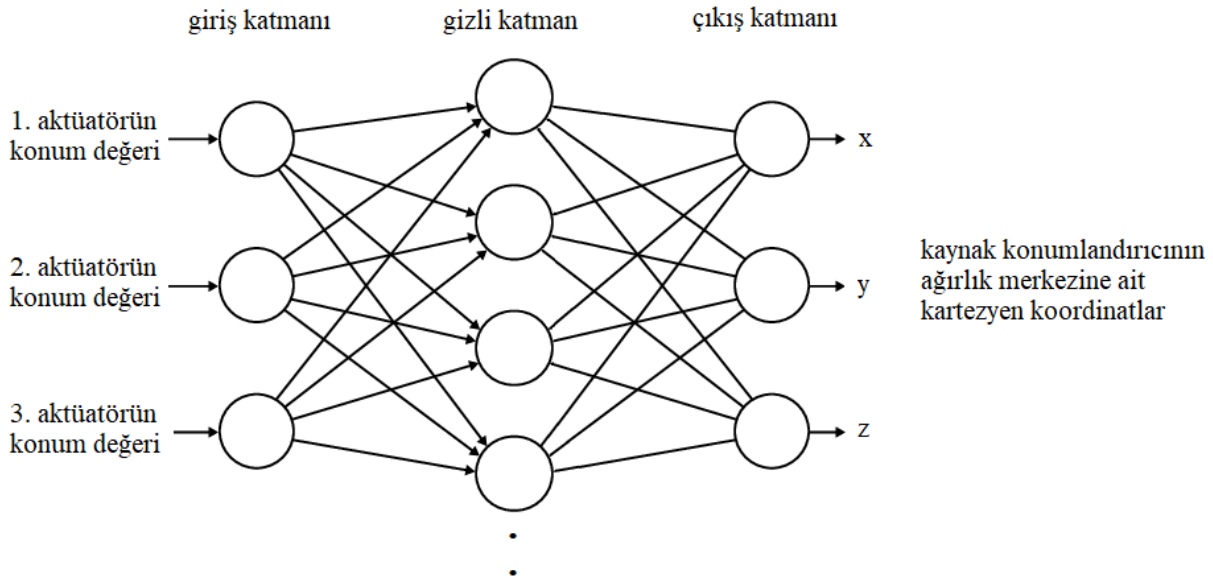
Bu çalışmada ele alınan 3 serbestlik dereceli kaynak konumlandırıcı sistem eklem uzayında 4 koordinat sisteminden oluşmaktadır. Sistem 3 serbestlik derecesine sahiptir. Sistemde ilk iki eklem hidrolik aktüatörler yardımıyla hareket etmektedir; üçüncü eklem ise elektrik motoru yardımıyla hareket etmektedir. Şekil 1'de sistemin genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. Sistemin genel yapısı

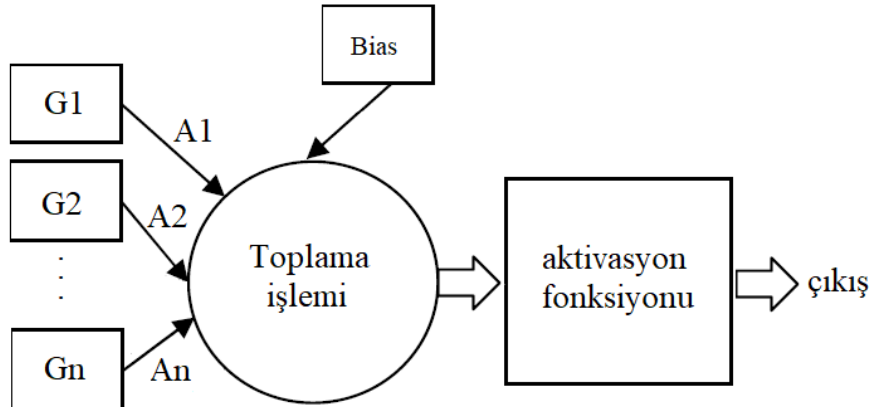
Bu çalışmada ileri kinematik modeli oluşturulan kaynak konumlandırıcının 3 adet aktüatörü bulunmaktadır. Bu aktüatörlerden ikisi lineer hareket sağlayan hidrolik silindirler tarafından diğeri de dönme hareketi sağlayan alternatif akım motoru tarafından tahrik edilmektedir. Sistemde kullanılan aktüatörlerden kaldırma hidrolik silindiri olarak da adlandırılan Hidrolik Silindir A için 234.1 mm olan stroku YSA modellemede giriş kümesinde kullanılmak üzere 46.982, 93.964, 140.946, 187.928 ve 234.910 olarak 5 eş parçaya bölünmüştür. Tilt hidrolik silindiri olarak adlandırılan Hidrolik Silindir B için 236.6 mm olan strok 47.320, 94.640, 141.960, 189.280 ve 236.600 olarak 5 eş parçaya bölünmüştür. Yük kirişini tahrik eden elektrik motorunun 360 derecelik dönüş hareketi de 72, 144, 216, 288 ve 360 olarak 5 eş parçaya bölünmüştür. Bu aktüatörlerden alınan konum bilgisi oluşturulan YSA için giriş verisi olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen YSA modelleri Matlab programındaki nftool araç kutusu yardımıyla oluşturulmuştur. Bu araç kutusu farklı

öğrenme algoritmaları ve sinir hücresi sayıları ile nöral ağ oluşturulmasını sağlayan bir grafik kullanıcı arabirimidir. YSA yapısı oluşturmak için kullanılan çok katmanlı YSA yaklaşımı Şekil 2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Çok katmanlı YSA yapısı

Bir YSA hücresinin temel yapısı Şekil 3’te verilmiştir. YSA hücresinde  $G_1, G_2 \dots G_n$  ile temsil edilen terimler sinir hücresinin girişleridir.  $A_1, A_2 \dots A_n$  terimleri ise girişlere ait ağırlıklardır. Çıkışı oluşturmak için öncelikle girişler ve ağırlıklar çarpılır ve bu çarpımlar bir Bias değeri ile toplanır. Toplam ifadesi bir aktivasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra YSA hücresi çıkışı oluşturulur (Yıldray ve Süheyla, 2018).



Şekil 3. YSA sinir hücresinin yapısı

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 3 serbestlik dereceli kaynak konumlandırıcının ileri kinematik modeli yapay sinir ağları ile elde edilmiştir. Yapay sinir ağındaki öğrenme algoritması türü ve gizli katmanda yer alan sinir hücresi sayısı değiştirilerek en iyi modellemenin bu parametrelerin hangi değerlerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan robotun 3 boyutlu tasarımındaki 3 aktüatörün her birinin 5 farklı konum değeri ve robotun ağırlık merkezinin kartezyen koordinatlardaki konumunu içeren bir giriş-çıkış tablosu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu giriş-çıkış tablosu ve Matlab

programındaki nftool araç kutusunda yer alan YSA modelleme komutları kullanılarak YSA modelleri oluşturulmuştur. YSA modellerinde tek gizli katman oluşturulmuştur. YSA gizli katmanlarında 10, 20 ve 30'ar adet yapay sinir hücresi bulunuyorken Levenberg-Marquardt, Bayesçi düzenleme, ölçeklenmiş eşlenik gradyan eğitim metodları ile YSA modelleri elde edilmiştir. Çizelge 1'de YSA modellerinin kaynak konumlandırıcının ileri kinematik modelinin çıkarılmasındaki başarısı verilmiştir.

**Çizelge 1.** YSA modellerinin başarısı

Öğrenme algoritması	Gizli katmandaki nöron sayısı	Başarı kriteri
Levenberg-Marquardt	10	R_kare=0.985 Mse=0.01345
	20	R_kare=0.996 Mse=0.00225
	30	R_kare=0.995 Mse=0.00132
Bayesçi düzenleme	10	R_kare=0.984 Mse=0.04123
	20	R_kare=0.993 Mse=0.00311
	30	R_kare=0.995 Mse=0.00031
Ölçeklenmiş eşlenik gradyan	10	R_kare=0.957 Mse=1.98013
	20	R_kare=0.965 Mse=0.33092
	30	R_kare=0.977 Mse=0.10989

#### 4. SONUÇ

Deneysel verilerle model elde edilmesinde en başarılı yöntemlerden biri YSA metodudur. Özellikle lineer olmayan sistemlerin deneysel yollarla modellenmesinde YSA'nın başarısı oldukça yüksektir. Robotik sistemlerin kinematik modellerinin lineer olmayan bir yapıda olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, robotik sistemlerin kinematik analizinde başarılı bir şekilde kullanılan YSA metodu tercih edilmiştir. Modelleme başarısının tespit edilmesinde en çok kullanılan kriterler olan R-kare ve Mse kullanılmıştır.

Çizelge 1'de yer alan R-kare ve Mse değerleri dikkate alındığında, bu çalışmada kullanılan 3 eğitim yöntemi ile elde edilen modelleme başarılarının birbirine yakın ve yüksek olduğu anlaşılmıştır. R-kare'nin 1'e ve Mse değerinin 0'a oldukça yakın çıkması modellemelerin başarılı olduğunu göstermektedir. En yüksek modelleme başarısının ise gizli katmanında 20 sinir hücresi bulunan ve Levenberg-Marquardt eğitim yöntemiyle elde edilen modelde gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek modelleme başarısında elde edilen R\_kare=0.996 ve Mse=0.00225 değerleri dikkate alındığında 3 serbestlik dereceli kaynak konumlandırıcının ileri kinematik modelinin YSA metodu kullanılarak yüksek bir başarıyla elde edilebileceği görülmektedir.

#### 5. KAYNAKLAR

- Çabuk N., Bakırcıoğlu V., Altı Serbestlik Dereceli Bir Aydınlatma Manipülatörünün Yapay Sinir Ağları Temelli Ters Kinematik Çözümü ve Benzetimi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 6 (1), 117-125, 2018.
- Gujarathi, G.P., Ma, Y.-S., Parametric CAD/CAE Integration Using a Common Data Model, Journal of Manufacturing Systems. 30, 118-132, 2011.

- Karagülle H., Amindari A., Akdağ M., Malgaca L., Yavuz S, Kinematic - Kinetic - Rigidity Evaluation of a Six Axis Robot Performing a Task. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9 (176), 1-9, 2012.
- Koca Y.B., Gökçe B., Aslan Y., ROS/Gazebo Ortamında Tank Sürüş Özellikli Mobil Bir Robotun Simülasyonu, *JournalMM*, 1 (1), 29-41, 2020.
- Kim D.-W., Choi J.-S., Nnaji B.O, Robot Arc Welding Operations Planning with a Rotating/Tilting Positioner. *International Journal of Production Research* 36 (4), 957-979, 1998.
- Pashkevich, A.P., Dolgui, A.B., Semkin, K.I., Kinematic Aspects of a Robot-Positioner System in an Arc Welding Application. *Control Engineering Practice* 11, 633-647, 2003.
- Pashkevich A.P., Dolgui A.B, Kinematic Control of a Robot-Positioner System for Arc Welding Application. *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications* 3-86611-286-6. 702, 2006.
- Pan Z., Wang X., Teng R., Cao X., Computer-Aided Design-While-Engineering Technology in Top-Down Modeling of Mechanical Product. *Computers in Industry* 75, 151-161. 2016
- Sahbaz H., Karagülle H., Malgaca, L. PC Based Motion Control on an Hexapod Application. *UMTS200*. 241-251. 2007.
- Wittler G., Moritz W., *Mechatronic Design Methods and Software in Mechanical Engineering*. 1998
- Wu J., Gao J., Li, Song, R., Li R., Li Y., Jiang L., The Design and Control of a 3DOF Lower Limb Rehabilitation Robot. *Mechatronics* 33, 13-22, 2015.
- Yıldıray A., Süheyla Y.K., Yağış Miktarının Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 5 (2), 97-104, 2018.
- Yıldırım Ş., Su Ş., Uzman İ, Yapay Sinir Ağları Kullanarak Dokuma Makinalarında Tığ Mekanizmalarının Kinematik Analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (1-2), 13-19, 2004.
- Vinson J.R., Mechanical Fastening of Polymer Composites. *Polymer Engineering and Science*, 29 (19), 1332-1339, 1989.