

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 14 Sayı: 1

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 14 No: 1

ISSN 1302-9487

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli gerçek kişiler için 10 TL, firma ve kuruluşlar için 40 TL, öğrenciler için 5 TL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

TANITIM KOŞULLARI

Kuruluş ve ürünlerini tanıtmak isteyenler hazırlayacakları tanıtım yazı ve resim taslaklarını Derneğimiz'e göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergi'de yayımlanmasını sağlayabilirler.

BANKA HESAP NUMARASI

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
T. İş Bankası, ODTÜ Şubesi
Hesap No: 4229 0235339
IBAN:
TR430006400000142290235339

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Kanal Fanının İtme Kuvvetinin Deneysel Olarak Hesaplanması 1

Mehmet Hanifi Doğru
İbrahim Halil Güzelbey

Plastik Ürünlerin Mekanik Özelliklerini Etkileyen En Uygun Enjeksiyon İşlem Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi 8

Hasan Öktem
Durmuş Kıl
Ece Simoğlu Sarı
Mustafa Çöl

Yaşlandırma Parametrelerinin Farklı Geometrilere Sahip Alüminyum Ekstrüzyon Ezilme Kutularında Darbe Performansına Etkileri 17

Emre Doruk
Gürkan Yılmazoğlu
Zeki Ayaz
Tanya Başer
İsmail Durgun

Bor Nitrür Kaplamanın, Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışlarına Etkisi 23

Merih Şengönül
İsmail Durgun
Nihan Dökmetaş
Hakan Kalkan
Bilgin Kaftanoğlu

Tornalama İşleminde Karbon Emisyonunu En Aza İndiren Bir Modelin Geliştirilmesi 31

Yusuf Tansel İç
F. Selin Akkoç
Nergis Gümüşboğa
Zeynep Ballı

KONU TANITIMI

Gömülü Sistemlerin Uçuş Öncesi Testlerdeki Kanımları 41

Barış Soyal
Barış Çetin

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

2016 yılında YÖK tarafından yeni olarak istenen Doçentlik için yerli yayın zorunluluğu için de dergimiz uygun bir platform olacaktır. Dergimizin Mayıs ve Kasım aylarında çıkarılabilmesi için de makale katkılarınızı beklemekteyiz. Bu sayede, dergimiz TÜBİTAK ULAKBİM tarafından taranan dergiler arasına girecektir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Mehmet Hanifi Doğru

Araş. Gör.
Makine Mühendisliği Bölümü
Gaziantep Üniversitesi
Gaziantep

İbrahim Halil Güzelbey

Prof. Dr.
Makine Mühendisliği Bölümü
Gaziantep Üniversitesi
Gaziantep

Kanal Fanının İtme Kuvvetinin Deneysel Olarak Hesaplanması

Bu çalışmada kanal fanının farklı hızlarda ürettiği itme kuvveti iki farklı deneysel çalışma ile belirlenmiştir. İlk metotta kanal fanı durağan basınç noktaları için delik açılmış bir boru içine yerleştirilmiştir. Durağan basınç bu sistemle ölçülmüştür ve kanal fanının itme kuvveti bu ölçümden yararlanarak elde edilmiştir. İkinci metotta kanal fanının itme kuvvetini elde edebilmek için bir yay sistemi kurulmuştur. Bu iki ölçüm sisteminin sonuçları birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar tablolarda gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kanal Fanı, İtme Kuvveti, Durağan Basınç Sistemi, Yay Sistemi ve Hava Akışı.

GİRİŞ

İtme sistemleri ve bunların analizleri hakkında birçok çalışma olmasına rağmen, kanal fanının itme kuvveti ile ilgili çalışmalar oldukça azdır. Açık literatürde, kanal fanının performansları, itme sistemleri ve kullanılan teorileri hakkında sadece birkaç çalışma bulunmaktadır. Performans için kanal fanı ile alakalı analiz ve programlama çalışılmıştır [1]. Sabit eksenel akışta kanal fanının performansını tahmin edebilmek için var olan bir yazılıma çeşitli yetenekler kazandırılmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan kanatların kaldırma özellikleri kullanılarak ağırlık merkezleri modelleme ve çok düşük oranlarda dahi performans hesaplama yeteneği eklenmiştir. Hatta boru yüzeyindeki basınç dağılımı ve düşük hücum açılarında performans hesabı yapılabilmektedir.

Bir diğer çalışmada, sabit açısız hızda, ses ötesi pervane çapı azaltılarak önemli bir gürültü azalmasına ulaşılmıştır. Gerekli itme kuvvetini elde edebilmek için kanat sayısı artırılmıştır. Tasarım için kanat eleman, panel ve Euler metodu gibi metotlar kullanılmıştır. Kanat eleman metodu aerodinamik, panel metodu aeroakustik hesaplamalar için kullanılmıştır. Uç biçimleri sürtünmesiz panel metoduna göre incelenmiştir.[2]

Kanal fanı itme sistemiyle güçlendirilmiş küçük bir hava taşıtı geliştirildi [3]. Önerilen hava taşıtı ultra hafif hava taşıtı kategorisinde onaylanmıştır. Bu

bağlamda çapraz akış fanları hava taşıtlarında geniş entegrasyon potansiyellerinden ötürü, itme ve akış kontrol sistemleri için eşsiz fırsatlar vermektedir. Çapraz akış fan itme ve akış kontrol konseptleri incelenmiştir.[4]

Diğer taraftan hava taşıtlarının pervanelerinin aerodinamik performansları kanat eleman ve momentum teorileri girdap konsepti ile birlikte incelenmiştir [5 and 6]. Bir rüzgar türbini kanadın uç noktasındaki değişikliğin etkisi mevcut bir program ile kanat eksen eğrisinin dönme düzlemi içinde veya dışında olduğu düşünülerek incelenmiştir. Çalışma iki kanatlı rotor ve NREL kanat ile yapılmıştır [7] ve ayrıntılı kanat yüklemeleri ve havada kalma performansı düzenlenmiştir.[8]

Bu çalışmada ise kanal fanının itme kuvveti yay sistemi ve durağan basınç noktaları sistemi kullanılarak tanımlanmış ve iki metot kıyaslanmıştır. Bu metotların sonuçlarının birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür.

TEST METOTLARI

Deney için iki düzenek hazırlandı. Bu düzeneklerde tablo 1'de özellikleri verilen 70 mm kanal fanı durağan basınç noktaları sistemi (Bkz Şekil.2) ve yay sistemi (Bkz Şekil 6) için kullanıldı.

Tablo 1: Kanal Fanı Parametreleri

Kanal fanı Özelliği	Değeri
Motor	4800 (rpm/V) fırçasız motor
Motor Gücü	290 Watt
Pil	11.1 V lipo -3 hücreli -2300 mAh
Boyut	70 mm çap
Göbek Çapı	29.5 mm
Ağırlık	130 gr
Uzunluk	60 mm
Kanat sayısı	6
Sabit kanat sayısı	4
Elekt. hız kontrol ünitesi	30 amp esc (BEC) programlanabilir



Şekil 1: Kanal Fanı Sistemi



Şekil 2. Durağan Basınç Sistemi

DURAĞAN BASINÇ SİSTEMİ İLE İTME KUVVETİ HESAPLANMASI

Kanal fanı (Bkz Şekil. 1) boru içine yerleştirildi ve durağan basınç sistemi için gerekli delikler boru üzerine delindi. Kütleli debi boru boyunca sabittir. Bundan dolayı durağan basınç, alkol metrede durağan basınç sistemi kullanılarak ölçüldü.(Bkz Şekil 3). Daha elde edilen basınç kanal fanının kesit alanı ile çarpılır ve bu sistemden itme kuvveti elde edilir. Ayrıca hava hızı anemometre ile tespit edildi. Fırçasız elektrik motoru devir sayısı takometre ile ölçülmüştür.



Şekil 3. Durağan Basınç Sistemi (arka görünümü)

Durağan Basınç Sistemi Denklemleri

Aşağıdaki bazı değerler ölçülmüştür. Daha sonra bu değerler durağan itme kuvvetinin hesaplanması da kullanılmıştır.

Havanın Yoğunluğu

$$P_{atm} = 690 \text{ mmHg} \quad T=22 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R = 287 \text{ (J/kgK)}$$

$$T = 273 + 22 = 295 \text{ K}$$

Laboratuar şartlarında atmosferik basınç ölçülmüştür. Havanın yoğunluğu denklem 2 kullanılarak bulunmuştur.

$$P_{atm} = \rho gh \quad (1)$$

$$= 92 \text{ kpa}$$

$$P_{atm} = \rho RT \quad (2)$$

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

$$\rho = 1,12 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Ortalama Hız

Kanal fanının içindeki akışın hacimsel debisi ile denklem 3 kullanılarak ortalama hız hesaplanmıştır. Hacimsel debi anemometre ile ölçülmüştür.

$$U_{ortalama} = \frac{Q}{A} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (3)$$

$$A=0.00385 \text{ (m}^2\text{)}$$

Akışın Doğasını Belirleme

Mach sayısı denklem 4 de ortalama hızın ses hızına bölünmesiyle bulunmuştur.

$$a=348 \text{ (m/s)}$$

$$M = \frac{U_{ortalama}}{a} \quad (4)$$

Mach sayısı 0.2 den küçük olduğu için akış sıkıştırılmaz kabul edilmiştir [9]. Bazı araştırmacılar ise sıkıştırılabilirlik limitini 0.3 olarak kabul etmektedirler.[10]

Reynold Sayısı

Reynold sayısı denklem 5 ile hesaplanmaktadır.

$$Re = \frac{\rho \times U_{ortalama} \times D}{\mu} \quad (5)$$

$$\text{Viskozite değeri } \mu = 1.705 \times 10^{-6} \text{ (kg/ms)}$$

Sürtünme Faktörü

Sürtünme faktörü f akışı türbülanslı olduğu düşünülerek hesaplanmıştır.

$$f = \frac{0.079}{Re^{1/4}} \quad (6)$$

Kayıpların Hesaplanması

Kanal fanı bir boru içerisine yerleştirilmiştir (Bkz Şekil. 4). Bazı kayıplar sürtünmeden dolayı oluşmaktadır ve denklem 7 ile hesaplanmıştır.

$$H_{kayıp} = 4 \times f \times \left(\frac{L}{D} \times \frac{U_{ortalama}^2}{2 \times g} \right) \quad (7)$$

Genel Denklemler

Boru içindeki basınç farkını bulabilmek için Bernoulli denklemi kullanılmıştır. Akışın sıkıştırılmaz olmasından dolayı genel olarak kullanılan Bernoulli denklemi denklem 8'de basınç farkını hesaplayabilmek için kullanılmıştır.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 + H_{fan} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + H_{kayıp} \quad (8)$$

Havanın yoğunluğu (ρ) sıkıştırılmazlıktan ötürü boru içinde sabit kalmaktadır;

$$\rho \cdot U_1 \cdot A_1 = \rho \cdot U_2 \cdot A_2$$

$$A_1 = A_2$$

$$\rho \cdot U_1 \cdot A_1 = \rho \cdot U_2 \cdot A_1$$

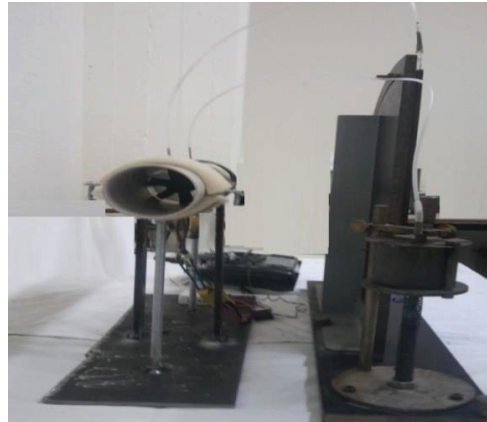
$$U_1 = U_2$$

Z_1 ve Z_2 aynı dikey yüksekliğe sahiptir. Bundan dolayı denklem 8 aşağıdaki forma indirgenmiştir.

$$\frac{P_1}{\rho g} + H_{fan} = \frac{P_2}{\rho g} + H_{kayıp} \quad (9. a)$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot (H_{fan} - H_{kayıp}) \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (9. b)$$

Deney parametrelerinden V_{out} , H_{fan} , RPM ve Q gibi değerler anemometre, takometre ve alkol metre ile ölçülmüştür. Tablo 2'deki diğer parametreler ise yukarıdaki denklemler ile hesaplanmıştır.



Şekil 4. Durağan Basınç Sistemi (Sol Yan Görünümü)



Şekil 5. Boru İçindeki Kanal Fanı Sistemi

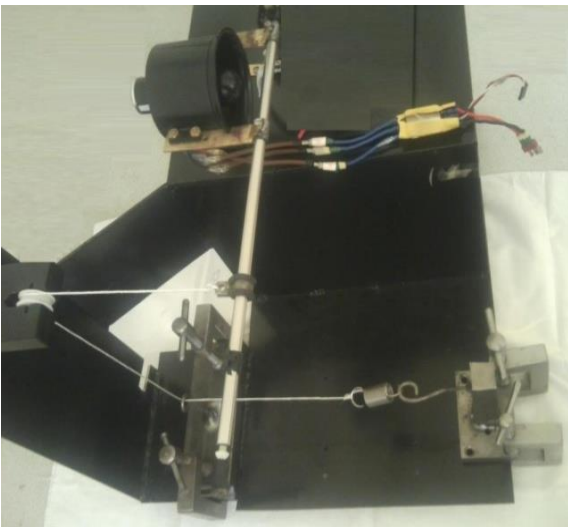
İtme Kuvveti Hesaplama

İtme kuvveti durağan basınç ile kanal fanın kesit alanının (Bkz Şekil 5) çarpılması ile hesaplanmıştır.

$$T_{\text{durağan basınç}} = \Delta P \times A \quad (\text{N}) \quad (10)$$

İTME KUVVETİNİN YAY SİSTEMİ İLE HESAPLANMASI

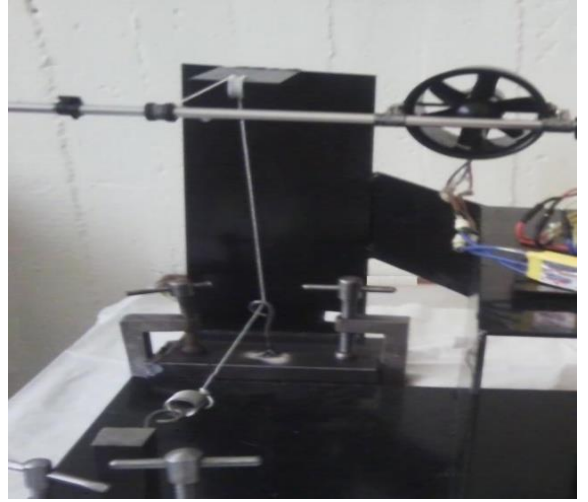
Farklı bir sistemle itme kuvveti hesaplamak için yay sistemi tasarlanmıştır (Bkz Şekil. 6). Bu sistemde boru tarafından oluşturulan itme kuvveti yay ve makara sistemi ile ölçülmüştür. Yayın ilk ve son boyları ölçülmüş ve yay katsayısı tayini yapılmıştır. Daha sonra yayın geriniminden ötürü oluşan itme kuvveti hesaplanmıştır.



Şekil 6. Yay Sistemi

$$L_f = 0,02545 \text{ (m)}$$

$$x = L_e - L_f \text{ (m)}$$



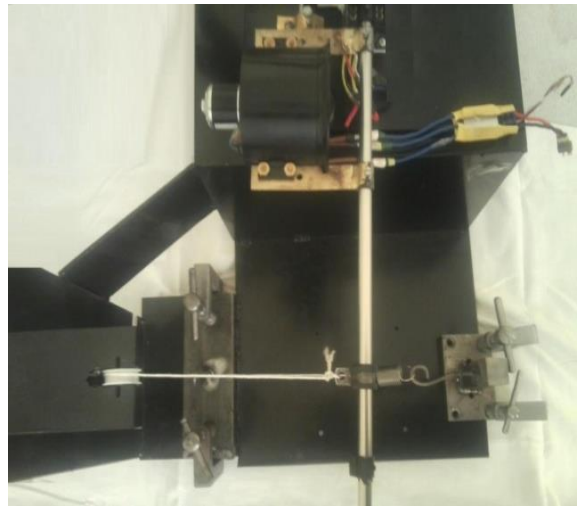
Şekil 7. Yay Sistemi (Ön Görünümü)

İtme Kuvveti Hesaplama

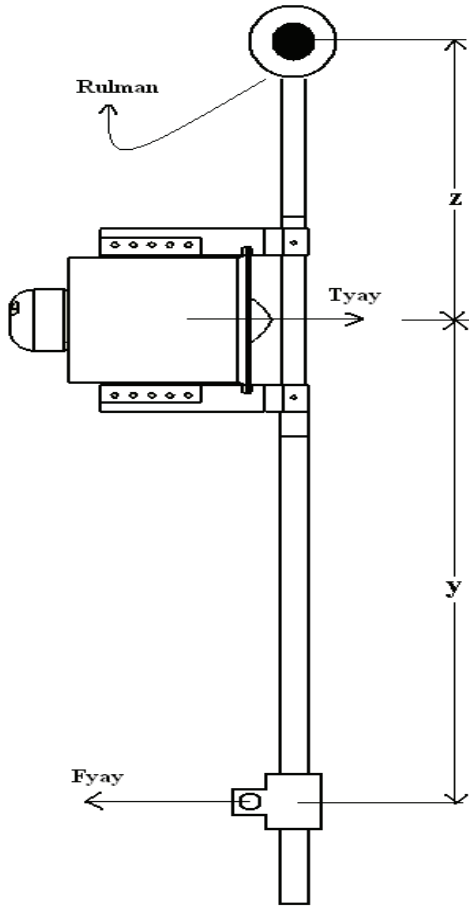
Kuvvet denklem 11'de yayın son boyu ile ilk boyu arasındaki fark ile yay katsayısının çarpılması ile hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{yay}} = k_{\text{yay}} \cdot x \quad (\text{N}) \quad (11)$$

Tablo 3' de farklı RPM' de ölçülmüş birçok değer vardır.



Şekil 8. Yay Sistemi Üst Görünümü



Şekil 9. Yay Sistemi Moment Şeması

T_{yay} denklem 12’de hesaplanmıştır. Tablo 2’de hesaplanan T_{yay} değerine rulmanın sürtünme katsayısı 0.031 olarak eklenmiştir.

$$T_{yay} \cdot z - F_{yay} \cdot (y + z) = 0 \quad (12)$$

$$y = 0.175 \text{ (m)}$$

$$z = 0.125 \text{ (m)}$$

SONUÇ

Bu çalışmada kanal fanının farklı hızlarda ve RPM’lerde ürettiği itme kuvvetini belirlemek için iki deneysel yaklaşım uygulanmıştır. Uygulanan metotlar benzer sonuçlar vermiştir.

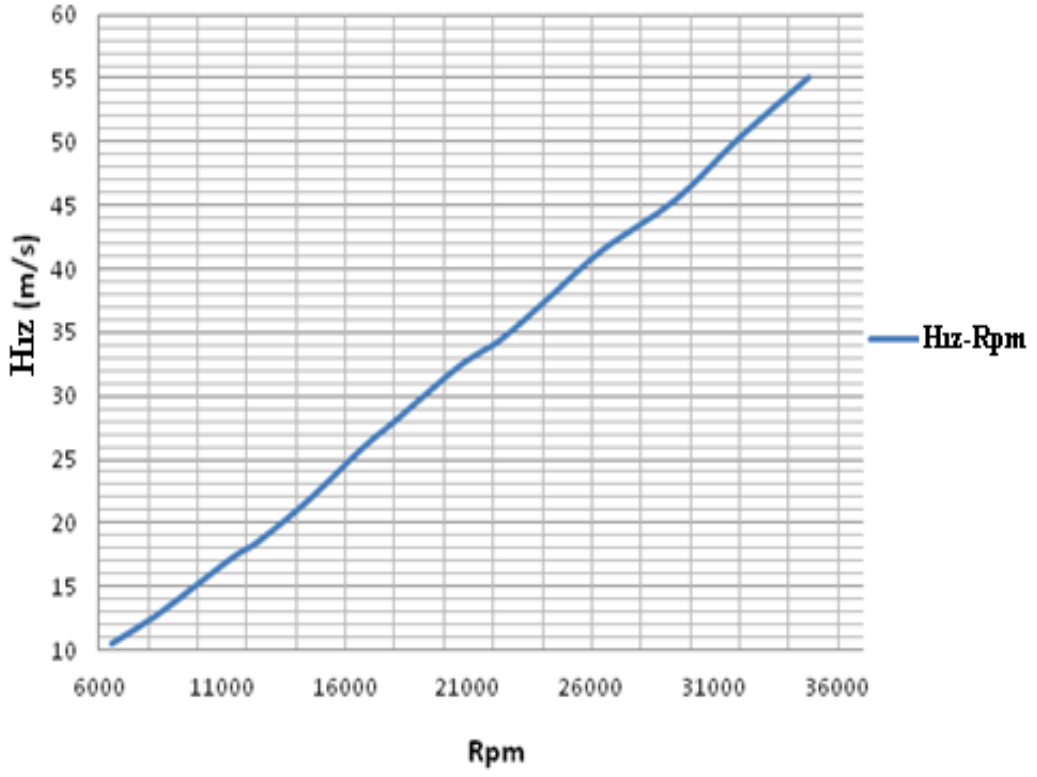
Metotlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca iki metotta yapılan hesaplamalara göre hata oranı hesaplanmıştır. RPM ve hata oranında açık ilişki tablo 3’de verilmiştir. Kanal fanı için hıza karşılık RPM grafiği şekil 10’da elde edilmiş ve itme kuvveti ile RPM için düşük hızlarda birbirlerine yakın fakat yüksek hızlarda doğruluk oranı azalmaktadır (Bkz Şekil. 11).

Tablo 2: Durağan Basınç Noktası Test Sonuçları

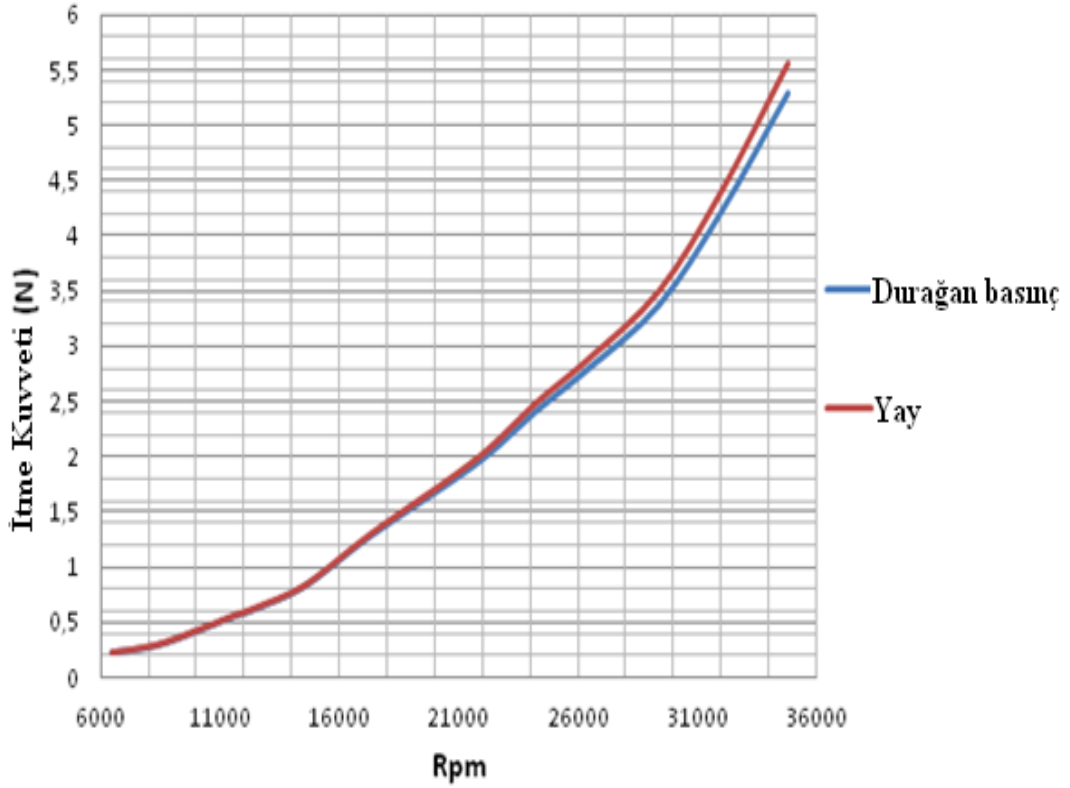
Deney. No	RPM	Durağan Basınç İtme Kuvveti(N)
1	6500	0,21978
2	8300	0,27974
3	10000	0,40975
4	11500	0,54039
5	12500	0,61626
6	14500	0,81311
7	16700	1,17787
8	18000	1,38097
9	20600	1,75821
10	22300	2,02800
11	24200	2,40176
12	26400	2,78904
13	29400	3,37434
14	32000	4,21638
15	34800	5,29783

Tablo 3: Yay Sistemi Test Sonuçları

Deney. No	RPM	Yay İtme Kuvveti (N)	Hata Oranı (%)
1	6500	0,2197	-0,0297
2	8300	0,2846	1,7165
3	10000	0,4144	1,1367
4	11500	0,5442	0,7153
5	12500	0,6241	1,2699
6	14500	0,8189	0,7113
7	16700	1,1884	0,8908
8	18000	1,3981	1,2312
9	20600	1,7876	1,6479
10	22300	2,0723	2,1380
11	24200	2,4717	2,8330
12	26400	2,8712	2,8640
13	29400	3,4954	3,4650
14	32000	4,3942	4,0486
15	34800	5,5577	4,6773



Şekil 10. Kanal Fanın RPM-Hız Grafiği



Şekil 11. Durağan Basınç Noktası Sistemi ile Yay Sistemi İtme Kuvveti Hesabı Kıyas Grafiği

EXPERIMENTAL THRUST CALCULATION OF DUCT FAN

In this paper, two experimental studies carried out the determination of the produced trusts of a duct fan in various speeds. In the first method, the duct fan is placed in the pipe regarding to drill some static tapping holes on the pipe. Static pressure is measured in this system and the trust of the duct fan has been obtained from this measurement. In the second method, a spring system has been established for getting duct fan thrust force. The results of two measurement systems are compared and reported based upon those measurements.

Keywords: Duct Fan, Thrust, Static Tapping System, Spring System and Air Flow.

KAYNAKÇA

1. Michael R. Mendelhall & Selden B. Spangler, 'Theoretical study of ducted fan performance', *National aeronautics and space administration contractor report*, NASA CR-1494, January 1970.
2. J. A. Lieser, D. Lohmann, C. H. Rohardt, Aeroacoustic, "Design of a 6-Bladed Propeller", *Aerospace Science and Technology*, 1997, n° 6, 381-389.
3. E. Ritschl, R. Theiner, D. Hanus, "Inlet Channel for a Ducted Fan Propulsion System of a Light Aircraft", *Acta Polytechnica* Vol. 43 No. 6/2003.
4. Thong Q. Dang & Peter R. Bushnell, "Aerodynamics of cross-flow fans and their application to aircraft propulsion and flow control", *Progress in Aerospace Sciences* 45 (2009) 1-29.
5. Quentin R. Wald, "the aerodynamics of propellers", *Progress in Aerospace Sciences* 42 (2006) 85-128.
6. M. K. Rwigema, 'propeller blade element momentum theory with vortex wake deflection', *In ICAS, 27th international congress of the aeronautical sciences*, France, 2010, ICAS 2010-2.3.4
7. Jean-Jacques Chattot, "Effects of blade tip modifications on wind turbine performance using vortex model", *Computers & Fluids* 38 (2009) 1405-1410.
8. Sven Schmitz, J. J. Chattot, Mahendra Bhagwat, Marvin Moulton, Francis Caradonna, "the Prediction and Validation of Hover Performance and Detailed Blade Loads", *AHS Aeromechanics Specialist's Conference*, San Francisco, CA, Jan. 2008.
9. H. Jing, L. Ru, H. Yaling, Q. Zhiguo, "Solutions for variable density low Mach number flows with compressible pressure-based algorithm", *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2104-2112.
10. Almgren, A.S., Bell, J.B., Rendleman, C.A., Zingale, M., "Low mach number modeling of type Ia supernovae. 1.Hydrodynamics", *The Astrophysical Journal*, 2006, 637:922-936.

EKLER

Sembol Listesi

P_{atm}	Atmosfer basıncı (N/m^2)
R	Evrensel gaz sabiti (J/kgK)
T	Sıcaklık (K)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
Q	Hacimsel debi (m^3/s)
U_{mean}	Ortalama hız (m/s)
A	Boru alanı (m^2)
D	Boru çapı (m)
r	Boru yarıçapı ($D/2$) (m)
M	Mach sayısı
a	Ses hızı (m/s)
g	Yer çekimi sabiti (m/s^2)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
f	Darcy-weisbach sürtünme faktörü
H_{loss}	Sürtünmeden dolayı oluşan yük kaybı (m)
H_{fan}	Fanın oluşturduğu yük (m)
L	Durağan basıncın alındığı noktalar arası mesafe (m)
Z_1, Z_2	Durağan basıncın alındığı noktalar arasında dikey fark (m)
k	Havanın özgül ısısı
L_f	Yayın ilk boyu (m)
L_e	Yayın uzama durumundaki boyu (m)
x	Yayın gerinmesi (m)
k_{spring}	Yay katsayısı (N/m)
T_{spring}	Yayın itmesi (N)
$T_{static\ pressure}$	Durağan basınç ölçüm sistemindeki kuvvet (N)
F_{spring}	Yay kuvveti (N)
y, z	Yayın denge eksenine ile arasındaki mesafe (m)

Plastik Ürünlerin Mekanik Özelliklerini Etkileyen En Uygun Enjeksiyon İşlem Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi

Hasan Öktem
Yrd. Doç. Dr.

KOCAELİ Üniversitesi
Hereke Meslek Yüksekokulu
Makine ve Metal Teknol. Bölümü
KOCAELİ

Durmuş Kır
Öğr. Gör. Dr.

Ece Simooğlu Sarı
Öğr. Gör.

Mustafa Çöl
Doç. Dr.

KOCAELİ Üniversitesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
KOCAELİ

Plastik enjeksiyon kalıpcılığı, plastik ürünlerin hassas ve seri bir biçimde basılmasını sağlayan en önemli üretim yöntemlerinden biridir. Mekanik özellikler, plastik ürünlerin kalitesine önemli ölçüde etki eder. Plastik ürünlerin mekanik özelliklerinin enjeksiyon işlem parametreleriyle kontrol edilmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sırasında ürün kalitesine etki eden mekanik özelliklerin en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle Taguchi yöntemine dayalı olarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç için, beş enjeksiyon işlem parametresi (eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi) L_{27} ortogonal deneysel tasarıma göre dizilerek 27 plastik enjeksiyon deneyi hem Polietilen (PE) hem de Polipropilen (PP) polimer malzeme için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, DVD-ROM ön kapağından çıkarılan plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi yapılarak eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Her bir enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki etkisi, Varyans analiziyle (ANOVA) istatikselsel olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonunda, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülü değerlerini veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri Taguchi yöntemiyle bulunmuştur. Taguchi yönteminin güvenilirliği ve verimliliğini kontrol etmek için son bir doğrulama deneyi, en uygun işlem parametreleriyle plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, plastik ürünlerin kalitesini etkileyen mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde Taguchi yönteminin çok kolay, güçlü ve efektif bir araç olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığı, Mekanik Özellikler, S/N Oranı, ANOVA, Taguchi Yöntemi

GİRİŞ

Plastik enjeksiyon kalıpcılığı günümüz endüstrisinde ince cidarlı plastik ürünlerin üretilmesinde kritik bir rol oynar. Plastik enjeksiyon kalıpcılığı; özellikle ince, hafif, esnek ve küçük olan medikal cihazlar, bilgisayar parçaları, günlük araç-gereçler gibi plastik ürünlerin üretilmesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur [1]. Bir plastik enjeksiyon işlemi, dört ana safhadan oluşur: doldurma, ütüleme (sıkıştırma), soğutma ve çıkarma. Yüksek basınç altında, eritilen polimer malzeme akışkan hale gelir ve soğuk bir metal kalıp içersine dolmaya zorlanır. Dolma işlemi tamamlandığında, soğutmadan dolayı çekmeyi azaltmak için kalıp boşluğu sabit bir ütüleme basıncında tutulur. Erimiş plastik kalıp duvarlarına dokunduğu anda soğutma işlemi başlar.

Plastik haline gelen ürünün kalıp boşluğundan çıkarılarak işlem tamamlanır [2-3].

Parça tasarımı, malzeme ve enjeksiyon işlem parametreleri bir plastik ürünün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu faktörler, bir plastik üründe meydana gelebilecek problemlerin incelenmesinde oldukça etkilidir. Özellikle, mekanik özellikler bir plastik ürünün kalitesinin değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Plastik ürünlerin mekanik özelliklerinin (eğilme mukavemeti, eğilme modülü, akma ve çekme mukavemeti gibi) plastik enjeksiyon işlem parametreleriyle kontrol edilebileceği ifade edilmiştir [4-5]. Bazı araştırmacılar, PP ve PE gibi polimer malzemelerin plastik enjeksiyonla basılması

sırasında, kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanı, enjeksiyon hızı ve soğutma zamanı gibi farklı işlem parametreleri kullanarak plastik ürünlerin mekanik özelliklerini kalite açısından incelemişlerdir [6-8]. Diğer taraftan, bazı araştırmacılar enjeksiyonla basılan plastik ürünlerin kalitelerine etki eden ölçüsel ve mekanik özelliklerin en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle belirlenmesi için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında; farklı polimer malzemelerle plastik ürünlerin basılması sırasında eğilme mukavemeti, eğilme modülü, çekme mukavemeti, boyutsal çekme ve çarpılma değerlerini Taguchi yöntemine dayalı S/N oranıyla hesaplayarak en uygun işlem parametrelerini bulmuşlardır. Daha sonra, her enjeksiyon işlem parametresinin sonuçlar üzerindeki sayısal etkisini hesaplamışlardır. Taguchi yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla da son bir doğrulama deneyi yapmışlardır [9-14].

Bu çalışmanın amacı, bir DVD-ROM ön kapığının plastik enjeksiyonda basılması sonucunda elde edilen ürünün kalitesine etki eden en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin Taguchi yöntemiyle belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda, ortogonal (L_{27}) deneysel tasarıma göre planlanmış toplam 27 adet deney yapılmış ve deneylerden elde edilen plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, S/N oranı ve ANOVA ile değerlendirilerek en büyük eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin aralıkları saptanmıştır. Son olarak, Taguchi yönteminin efektifliğini ve güvenilirliğini kontrol etmek için gerçek ortamda bir son doğrulama deneyi yapılmıştır.

TAGUCHI YÖNTEMİ: GÜÇLÜ TASARIM VE ANALİZ

Taguchi yöntemi, üretim alanı ve mühendislik analizinde yaygın olarak kullanılan işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını belirlemek için Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş deneysel bir tekniktir. Taguchi yöntemi, zaman ve ekonominin çok önemli olduğu günümüz endüstrisinde geniş bir yer tutmaktadır. Bu yöntem, yüksek kaliteye sahip sistemlerin tasarlanması ve geliştirilmesi için kullanılan çok güçlü bir araçtır. Bu sebeplerden dolayı, Taguchi yöntemi kullanılarak endüstriler maliyetten hiç ödün vermeksizin ürün geliştirme zamanını önemli ölçüde azaltabilirler [15].

Taguchi yöntemi; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamaya ayrılmıştır: Sistem tasarımı, bir ürünü üretmek için gerekli olan mühendislik ve bilimsel bilginin kullanılmasından oluşur. Parametre tasarımı, en uygun işlem parametreleri altında bir ürünün

parametre değerlerini belirlemek ve performans karakteristiklerini geliştirmek için işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını bulur. Tolerans tasarımı ise parametre tasarımı tarafından önerilen en uygun aralıklar civarındaki toleransların analiz edilmesini ve saptanmasını sağlar. Bahsedilen bu tasarımlar arasında parametre tasarımı, maliyeti artırmaksızın yüksek kaliteye ulaşılmasında anahtar bir rol oynadığı için oldukça önemli ve en yaygın kullanılan aşamadır [16-17].

Diğer taraftan; klasik deneysel tasarım teknikleri çok karmaşık, zaman alıcı ve kullanmak için zordur. Buna ilave olarak, klasik deneysel tasarım tekniklerinde işlem parametrelerinin sayısı arttıkça zaman yapılacak deney sayısı da artmak zorundadır. Taguchi yöntemi ise bu problemleri çözebilmek için, ortogonal deneysel tasarım, sinyal/gürültü oranı (S/N) ve Varyans analizi (ANOVA) gibi üç önemli aracını birleştirerek sonuca ulaşır. Ortogonal deneysel tasarım, çok az sayıda deneyle tüm parametre uzayını tarayan özel bir tasarım oluşturmak için kullanılır. Ortogonal deneysel tasarıma göre planlanmış deneylerden elde edilen sonuçlar, S/N oranı içine taşınarak analiz edilir. S/N oranı, istenen değerlerden çıkarılan performans karakteristiklerinin ölçülmesi için kullanılır. S/N oranı, “(S/N)_{SB}, daha küçük-daha iyisi”, “(S/N)_{LB}, daha büyük-daha iyisi” ve “(S/N)_{NB}, nominal-en iyisi” gibi üç temel performans karakteristiğine göre saptanır. ANOVA analizi ise performans karakteristikleri üzerinde etkili olan işlem parametrelerinin önemlilik derecesini istatistiksel olarak saptamak için uygulanır. Bu üç önemli aracın dışında, Taguchi yöntemi, elde edilen en iyi sonuçların güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla son bir doğrulama testi gerçekleştirir [17-18]. Bahsedilen bu üç temel performans karakteristiği aşağıdaki denklemlerle (1, 2, 3) ifade edilebilir. Burada; y_i ; deneylerden ölçülen sonucu, \bar{y} ; deneylerden ölçülen sonuçların ortalamasını, n ; deney sayısını ve $s^2_{y_i}$; y_i 'nin varyansını göstermektedir.

$$S/N_{LB}=\eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

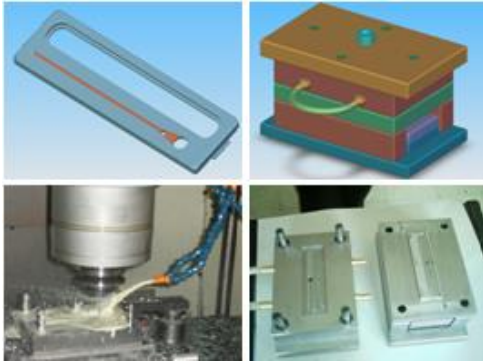
$$S/N_{SB}=\eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

$$S/N_{NB}=\eta = 10 \log \left[\frac{\bar{y}}{s^2 y} \right] \quad (3)$$

DENEYSEL ÇALIŞMA

Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağı modeli ve bu modelin plastik ürününü enjeksiyon tezgahında basmak için gerekli olan ürün ve plastik kalıbın tasarımı Pro/Engineer WildFire 5.0 CAD/CAM programında yapılmıştır. Plastik kalıbın parçaları, çeşitli talaşlı işlem operasyonları sonucunda imal edilmiştir. Kalıbın düzlemsel ve prizmatik parçaları CNC frezeleme işlemleriyle, dairesel ve silindirik parçaları tornalama işlemleriyle, bu parçaların parlatılması taşlama işlemleriyle ve erkek-dişi kalıp plakalarının boşluklarındaki ince işlemler dalma erozyon işlemleriyle gerçekleştirilmiştir. İmal edilen kalıp; üst bağlama plakası, alt bağlama plakası, erkek ve dişi plakalar, itici ve geri dönücü pimler, taşıyıcılar, yolluk burcu, yolluk çekici ve civatalardan oluşmuştur. Şekil 1, DVD-ROM ön kapağının tasarımını, plastik kalıp tasarımını ve kalıbın imalat işlemlerini göstermektedir.



Şekil 1. Plastik ürünün tasarım ve imalatı

Malzeme

Plastik kalıplarda yaygın olarak kullanılması, çekirdeğine kadar sertleştirilebilmesi, iyi desenlenebilmesi ve yüksek parlaklık verebilmesi gibi özelliklerinden dolayı, bu çalışmada 1.2738 (IMPAKS) malzeme tercih edilmiştir. Bu malzemenin sertlik değeri, Wolpert Instron marka bir cihazla 31 RC olarak ölçülmüştür. Belec Vario marka bir cihazla malzemenin kimyasal analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar, Tablo 1’de verilmiştir.

Plastik Enjeksiyon İşlemi

Bu çalışmada kullanılan DVD-ROM ön kapağı, bir bilgisayarın kasası üzerinde bulunan DVD’nin açma-kapama görevini yerine getiren bir plastik üründür. DVD-ROM ön kapağının, plastik ürünün basılmasında PE ve PP polimer malzemeler kullanılmıştır. Bu polimer malzemelere ait genel özellikler, Tablo 2’de verilmiştir. Polimer

malzemeler, TMC 60 WO (60 tonluk, 16.7 kW güç, 81 gr. hammadde alma ve 100 bar kapama basıncı) marka yatay bir plastik enjeksiyon tezgahında basılmıştır. Plastik ürünlerin (numunelerin) enjeksiyon işlemleri ve deneyler, Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzemenin kimyasal bileşimi

Element	(%, wt)
Karbon (C)	0.396
Silisyum(Si)	0.292
Mangan (Mn)	1.418
Nikel (Ni)	1.109
Krom (Cr)	1.855
Titanyum (Ti)	0.043
Molibden (Mo)	0.214
Demir (Fe)	Kalan

Tablo 2. PE ve PP genel özellikleri

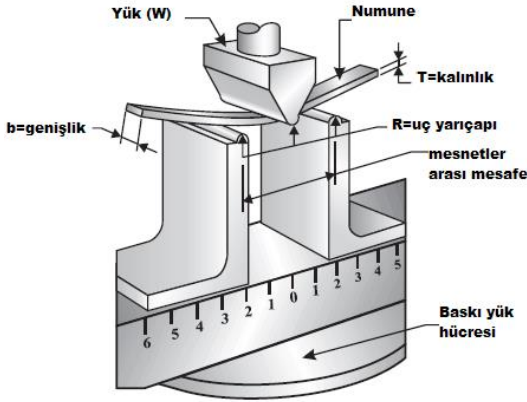
Özellikler	Polietilen	Polipropilen
Eriyik yoğunluğu (g/cm ³)	0.960	0.90-0.91
Eriyik akış hızı (°C/kg)	7	1.3
Isıl iletkenlik (W/m-°C)	11-12.4	2.8
Spesifik Isı (J/Kg-°C)	0.55	0.46
Erime noktası (°C)	137	160-170
Malzeme yapısı	Yarı kristal	Yarı kristal



Şekil 2. Plastik numunelerin enjeksiyon işlemleri

Üç Noktalı Eğme Testi

Üç noktalı eğme testi, eğilmeye maruz kalan bir malzemenin mekanik özelliklerinin (gerilme-uzama davranışının) tespit edilmesinde kullanılır. Üç noktalı eğme testi, ASTM D-790 uluslararası standardına göre uygulanmaktadır (Şekil 3). Üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve eğilme miktarı (çökme-sehim) aşağıdaki denklemlerdeki (4-6) gibi hesaplanabilir [20]:



Şekil 3. Üç noktalı eğme testi prosedürü

$$\sigma = \frac{3xWxL}{2xbxT^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{6x\delta xT}{L^2} \quad (5)$$

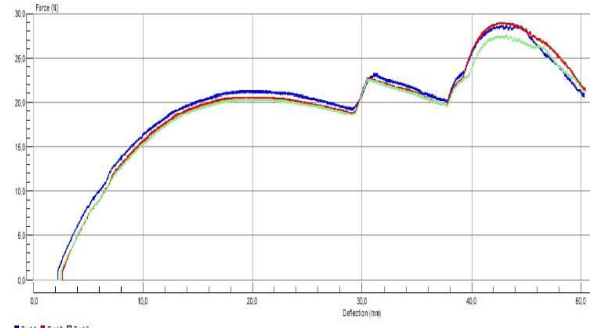
$$\delta = \frac{0.25xWxL^3}{ExTx b^3} \quad (6)$$

Burada; σ ; eğilme mukavemetini, ε ; birim uzamayı, δ ; eğilme miktarını (çökmeyi), W ; uygulanan yükü, L ; mesnetler arası uzaklığı, b ; numune genişliğini, T ; numunenin et kalınlığını ve E ; eğilme modülünü (elastiklik modülünü) göstermektedir [20]. Bu çalışmada, PE ve PP polimer malzemelerin akma gerilmesi, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü gibi mekanik özellikleri Testometric marka bir cihazda WinTest Anaysis programıyla tespit edilmiştir. Üç noktalı eğme testinde, deney hızı; $v=6.29$ mm/dak, mesnetler arası mesafe; $L=100$ mm, yük uygulama uç yarıçapı; $R=2$ mm ve numune kalınlığı; $T=3$ mm'dir. Uygulanan üç noktalı eğme testi, Şekil 4'te gösterilmiştir.

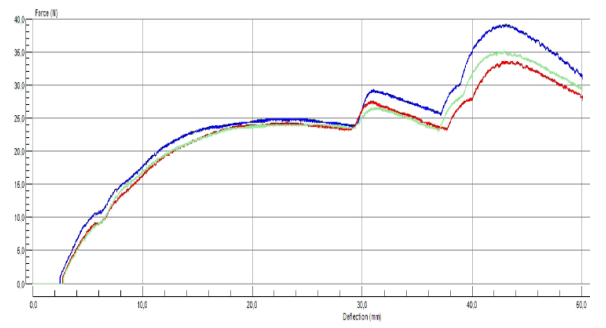


Şekil 4. Üç noktalı eğme testi

Üç noktalı eğme testinin uygulandığı PE ve PP numunelere ait yük-eğilme eğrileri, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu grafiklere dayalı olarak, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerleri saptanmıştır.

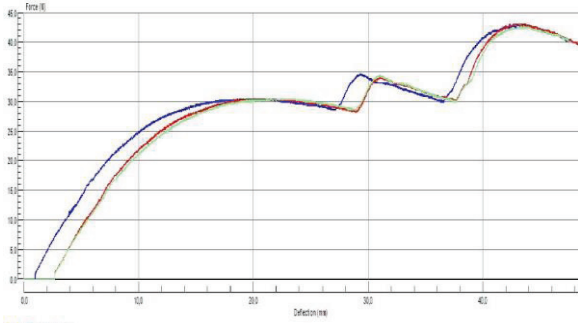


(a)

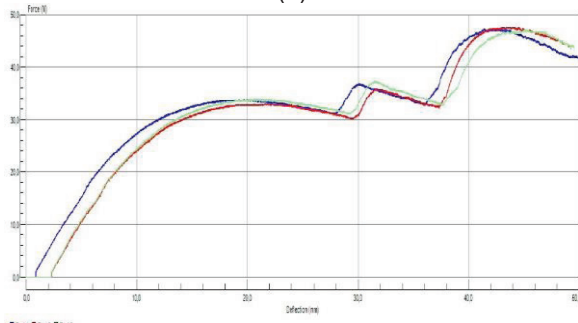


(b)

Şekil 5. PE numuneleri için yük-eğilme eğrileri



(a)



(b)

Şekil 6. PP numuneleri için yük-eğilme eğrileri

TAGUCHI YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Bu çalışmada, en büyük eğilme mukavemetini ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri Taguchi yöntemiyle belirlenmiş ve buna bağlı olarak plastik ürün kalitesinin geliştirilmesi için sekiz adım uygulanmıştır. Güncel bu çalışmada, Taguchi yöntemini uygulamak için **Minitab 15** istatistiksel analiz programı kullanılmıştır [19]. Taguchi optimizasyon yöntemini uygulamak için gerekli olan adımlar, Şekil 7'de sırasıyla gösterilmiştir.

DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ ve TARTIŞMA

Taguchi yöntemi, sayısal sonuçları analiz etmek ve değerlendirmek için ortogonal deneysel tasarım, S/N oranı ve ANOVA gibi önemli üç aracı birleştirerek çözüme ulaşır [17-18]. Bu çalışmada, Taguchi yönteminin bahsedilen üç aracı sırasıyla kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. PE ve PP malzemeler için L₂₇ (3¹³) ortogonal deneysel tasarıma dayalı toplam 54 deney yapılmıştır. L₂₇ ortogonal tasarım, üç seviyede 13 sütun ve plastik enjeksiyon deneylerine karşılık gelen 27 satırdan (26 serbestlik derecesi) oluşmuştur. Deneylerde, beş enjeksiyon işlem parametresine karşılık (erişik sıcaklığı-T_{erişik}, enjeksiyon basıncı-P_{enj}, ütüleme basıncı-P_ü, ütüleme zamanı-Ü_t, ve soğutma zamanı-St) eğilme mukavemeti ve eğilme modülü gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Tablo 3 ve

Tablo 4, ortogonal deneysel tasarım tekniğine göre planlanmış enjeksiyon işlem parametreleri ve aralıklarını göstermektedir.



Şekil 7. Taguchi yönteminin akış diyagramı

Tablo 3. PE için Enjeksiyon İşlem Parametreleri

L ₂₇ (3 ¹³) ortogonal deneysel tasarım				
T _{erişik} (°C)	P _{enj} (MPa)	P _ü (MPa)	Ü _t (s)	S _t (s)
185	80	40	3	6
195	90	50	5	9
205	100	60	7	12

Tablo 4. PP için Enjeksiyon İşlem Parametreleri

L ₂₇ (3 ¹³) ortogonal deneysel tasarım				
T _{erişik} (°C)	P _{enj} (MPa)	P _ü (MPa)	Ü _t (s)	S _t (s)
170	80	50	3	6
185	90	60	5	9
200	100	70	7	12

S/N oranı, Taguchi yönteminin performans karakteristiklerini istatistiksel ölçen bir araç olup, amaç fonksiyonu olarak tanımlanan istenen cevabın logaritmik bir fonksiyonudur [16-17]. Bu çalışmada performans karakteristiği olarak, enjeksiyon sonrasında plastik ürüne uygulanan üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme

modülü seçilmiştir. Eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün büyük olması, plastik ürünün daha sağlam olmasını sağlayacağından kalite karakteristiği olarak “(S/N)_{LB}, daha büyük-daha iyisi” seçilmiştir. Beş enjeksiyon işlem parametresiyle PE ve PP numuneler için üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerlerinin her birinin S/N oranları, denklem (2)’de hesaplanarak Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. PE ve PP malzemeler için S/N oranları

Deney no	Polietilen (S/N Oranları-dB)		Polipropilen (S/N Oranları-dB)	
	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü
1	24.4784	59.2010	29.5959	62.5817
2	24.4093	58.5239	29.8731	62.0795
3	24.3677	58.6249	29.9757	62.2689
4	25.6690	58.8041	29.9903	62.2605
5	25.1640	58.4130	29.6792	62.0499
6	25.0748	58.4374	29.6640	62.1433
7	24.8410	58.2841	29.7244	62.3076
8	25.0235	58.5337	29.7244	62.4405
9	24.9717	58.4003	31.5386	63.6289
10	25.0362	58.7080	30.8814	63.2495
11	25.5848	58.5331	30.9792	63.1371
12	25.1132	58.6802	31.0953	63.2861
13	27.7825	60.0095	31.0762	63.1691
14	26.9459	59.3322	30.9988	63.1486
15	26.6542	59.0942	30.6011	62.8561
16	26.2362	59.9648	30.7757	62.9005
17	25.6331	59.6168	30.6282	62.8177
18	26.5337	60.1042	30.8550	62.9026
19	26.1800	59.7833	31.2917	62.8932
20	26.2586	59.7940	31.1338	62.7685
21	26.2475	59.5828	30.8286	62.9144
22	26.1120	59.7382	30.6821	62.9677
23	26.2698	59.7076	30.7690	63.1499
24	26.5337	59.5105	30.9010	62.8673
25	28.4674	58.4607	30.8945	62.8833
26	27.5060	58.6638	30.5672	62.9370
27	27.3595	58.1076	30.8814	63.0143

En büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülü değerlerini veren en uygun enjeksiyon işlem parametrelerini belirlemek için farklı seviyelerdeki her enjeksiyon işlem parametresinin ortalama cevaplarını hesaplamak gereklidir. Bundan dolayı, eğilme mukavemeti ile eğilme modülü ve bunların S/N oranları için ortalama cevap tablosu oluşturulmuştur. Bu tablodaki değerler, S/N oranlarının ortalaması alınarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. PE için S/N oranları ortalama cevap tablosu

Enjeksiyon işlem parametreleri	Eğilme mukavemeti			Eğilme modülü		
	I	II	III	I	II	III
T _{eriyik} (°C)	24.89	26.17	26.77	58.58	59.34	59.26
P _{enj} (°C)	25.30	26.25	26.29	59.05	59.23	58.90
P _ü (MPa)	25.62	26.11	26.10	59.44	58.53	59.20
Ü _t (s)	26.44	25.89	25.50	58.89	59.39	58.90
S _t (s)	26.09	25.87	25.87	59.22	59.01	58.95

Tablo 7. PP için S/N oranları ortalama cevap tablosu

Enjeksiyon işlem parametreleri	Eğilme mukavemeti			Eğilme modülü		
	I	II	III	I	II	III
T _{eriyik} (°C)	29.97	30.88	30.88	62.42	63.05	62.93
P _{enj} (°C)	30.63	30.48	30.62	62.80	62.73	62.87
P _ü (MPa)	30.45	30.51	30.77	62.73	62.77	62.90
Ü _t (s)	30.50	30.54	30.70	62.77	62.63	63.00
S _t (s)	30.55	30.48	30.70	62.80	62.73	62.88

Bu çalışmada Varyans Analizi (ANOVA), beş enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki sayısal etkisini, tespit etmek için kullanılmıştır. PE ve PP malzemeler için beş enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki sayısal etkisi, F-test ile değerlendirilmiştir. % 95’lik ($\alpha=0.05$) güvenilirlik aralığında beş enjeksiyon işlem parametresini (PE ve PP malzemelerin) kontrol etmek amacıyla, F-değeri (hesaplanmış) kullanılmış ve $F_{0.05,2,16}=3.63$ olarak bulunmuştur. Tablo 8, PE ve PP malzemeler için enjeksiyon işlem parametrelerinin eğilme mukavemeti ile eğilme modülü üzerindeki sayısal etkilerini göstermektedir. PE malzeme için eğilme mukavemeti üzerindeki en etkili işlem parametresi eriyik sıcaklığı iken, eğilme modülü üzerindeki en etkili işlem parametresi ütüleme basıncıdır. Diğer taraftan, PP malzeme için eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki en etkili parametre sadece eriyik sıcaklığıdır.

Bu çalışmada, PE ve PP malzemeler için en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri, Tablo 6 ve Tablo 7’deki her parametreye ait en büyük S/N oranının seçilmesiyle belirlenmiştir. Buna göre, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri aşağıdaki denklemlerle (7-10) hesaplanmıştır:

Tablo 8. Enjeksiyon parametrelerinin sayısal etkileri

Parametreler	Parametrelerin sayısal etkileri, %			
	Polietilen		Polipropilen	
	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü
T_{eriyik} (°C)	51.65	30.56	55.78	48.88
P_{inj} (MPa)	18.15	4.20	1.491	1.870
$P_{ü}$ (MPa)	4.865	38.75	6.580	3.612
\dot{U}_t (s)	16.16	14.57	2.602	15.66
S_t (s)	1.30	3.467	2.834	2.450

PE malzeme için en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle hesaplanan eğilme mukavemeti ($\sigma_{\eta opt}$) ve eğilme modülünün ($E_{\eta opt}$) en büyük değerleri:

$$\sigma_{\eta opt} = \left[\left(\bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{I}) + \bar{S}_t(\mathbf{I}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (7)$$

$$E_{\eta opt} = \left[\left(\bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{I}) + \bar{U}_t(\mathbf{II}) + \bar{S}_t(\mathbf{I}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (8)$$

PP malzeme için en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle hesaplanan eğilme mukavemeti ($\sigma_{\eta opt}$) ve eğilme modülünün ($E_{\eta opt}$) en büyük değerleri:

$$\sigma_{\eta opt} = \left[\left(\bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{I}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{III}) + \bar{S}_t(\mathbf{III}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (9)$$

$$E_{\eta opt} = \left[\left(\bar{T}_{eriyik}(\mathbf{I}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{III}) + \bar{S}_t(\mathbf{III}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (10)$$

Denklemler (7-10)'da PE ile PP malzemeler için hesaplanan eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün en büyük değerleri, Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir. Ayrıca, en büyük eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri kullanılarak son bir doğrulama deneyi hem PE hem de PP malzemeler için plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi yapılarak eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün deneysel değerleri ölçülmüştür. Üç noktalı eğme testleri, PE ve PP malzemeler için üç numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler alınmıştır. Tablo 9 ve Tablo 10, PE ve PP malzemeler için doğrulama testinden elde edilen değerleri, tahmin edilen (hesaplanan) değerleri ve geliştirme (kazanç) oranlarını göstermektedir.

Tablo 9. Deneysel ile tahmini sonuçlarının karşılaştırılması (PE)

Mekanik özellikler	Polietilen			
	Başlangıç değerler (dB)	Hesaplanan değerler (dB)	Doğrulama deneyleri (dB)	Geliştirme oranları (%)
Eğilme mukavemeti	26.5060	27.9241	30.4534	12.96
Eğilme modülü	59.2627	60.3760	63.2891	6.36

Tablo 10. Deneysel ile tahmini sonuçlarının karşılaştırılması (PP)

Mekanik özellikler	Polipropilen			
	Başlangıç değerler (dB)	Hesaplanan değerler (dB)	Doğrulama deneyleri (dB)	Geliştirme oranları (%)
Eğilme mukavemeti	30.5863	31.3722	36.8955	17.10
Eğilme modülü	62.7098	63.5013	68.5112	8.47

Tablo 9 ve Tablo 10 incelendiğinde, her iki plastik malzemede eğilme mukavemeti ve eğilme modülü için başlangıç değerler ile doğrulama deneyinden elde edilen değerler arasında belli oranlarda geliştirmeler sağlanmıştır. Her iki malzemede eğilme mukavemeti için sağlanan geliştirme oranlarının, eğilme modülü için sağlanan oranlardan daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, PE için sağlanan geliştirme oranları, PP için sağlananlardan daha küçüktür.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sırasında ürün kalitesine etki eden mekanik özelliklerin Taguchi yöntemiyle tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ortogonal deneysel tasarım, S/N oranı ve ANOVA, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun plastik enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu çalışma sonunda, aşağıda ifade edilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerlerinin literatürdeki sonuçlardan farklı olmadığı görülmüştür.
- ANOVA analizlerine göre, % 95'lik ($\alpha=0.05$) güvenilirlik aralığı içinde PE malzemede mekanik özellikler üzerinde en etkili parametreler, eriyik sıcaklığı (% **55.65**) ve ütüleme basıncı (% **38.75**) iken; PP malzemede en etkili parametre eriyik sıcaklığıdır (% **55.78** ve % **48.88**).

- S/N oranı analizlerinden, her iki polimer malzeme için mekanik özelliklerin başlangıç değerlerine göre belli oranlarda geliştirildiği görülmüştür.
- Aynı zamanda, doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar % 95'lik güvenilirlik aralığı içindedir.
- Bu sonuçlara dayalı olarak, uygulanan Taguchi yöntemi sayısal olarak yeterli olup, mekanik özelliklerin belirlenmesinde efektif ve güçlü bir araçtır.
- Plastik ürünlerin kalitesine etki eden mekanik özelliklerin dışında; fiziksel ve termal özelliklerin tespit edilmesinde de benzer Taguchi modelleri oluşturularak çözüme ulaşılabilir.

DETERMINATION OF OPTIMUM INJECTION MOLDING PARAMETERS AFFECTED MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC PRODUCTS BY USING TAGUCHI METHOD

Plastic injection molding is one of the most manufacturing methods which provide to inject plastic products as sensitive and quick. Mechanical properties affect highly the quality of products during plastic injection molding process. The determining mechanical properties of plastic products with injection process parameters is one of most popular research topics. In this study, it is purposed to determine the mechanical properties affecting the product quality during plastic injection of a DVD-ROM cover by utilizing optimum injection process parameters based on Taguchi method. For this purpose, 27 plastic injection experiments with five process parameters (polymer temperature, injection pressure, packing pressure, packing time and cooling time) designed according to L_{27} orthogonal array were performed for both the polymer materials of Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP). Then, the values of flexural strength and flexural modulus were obtained by conducting three-point bending test on the plastic samples removed from DVD-ROM cover. Signal/Noise (S/N) ratios were calculated by using these values. The effect of each injection process parameters on flexural strength and flexural modulus was identified by helps of Analysis of Variance (ANOVA) as statistically. At the end of the study, optimum process parameters providing to the values of highest flexural strength and flexural modulus were found by Taguchi method. Finally, a confirmation experiment was carried out to control the reliability and efficiency of Taguchi method in the plastic injection machine. From the obtained results, it was understood that Taguchi method is very easy, power and effective tool in evaluating mechanical properties affecting the quality of plastic products.

Keywords: Plastic Injection Molding, Mechanical Properties, S/N Ratio, ANOVA, Taguchi Method.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, plastik enjeksiyon deneylerin yapılmasında GÜNEŞ Plastik A.Ş.'ye, plastik kalıbın imalatında Öğr. Haydar Karakaya'ya, kalıp malzemelerinin temin edilmesinde KORKMAZ Çelik A.Ş.'ye, Üç noktalı eğme testinin yapılmasında, TSE'ye ve Plastik Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür eder.

KAYNAKÇA

1. Beaumont, J.P., Nagel, R., Sherman, R., Successful Injection Molding: Hanser/Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA, 2002.
2. Ataşımşek, S., Plastik ve Metal Kalıpcılık Teknikleri, Birsen Yayınevi, 2. Baskı, İstanbul, 2002.
3. Potsch, G. and Michaeli, W., Injection Molding: An Introduction, Hanser Publication, New York, USA, 1995.
4. Akyüz, Ö.F., Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, Pagev Yayınları, 3. Baskı, İstanbul, 103-115, 2006.
5. Türk Standart Enstitüsü (TSE), Plastikler-Eğilme Özelliklerinin Tayini, TS 985 EN ISO 178, Ankara, 1-15, 2006.
6. Kuo, H.C., Jeng, M.C Effects of Part Geometry and Injection Molding Conditions on the Tensile Properties of ultra-high Molecular Weight Polyethylene Polymer, Mater Des. 31, 884-893, 2010.
7. Ozcelik, B., Optimization of Injection Parameters For Mechanical Properties of Specimens with Weld Line Polypropylene Using Taguchi Method, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 38 (8), 1067-1072, 2011.
8. Mehat, N.M., Kamaruddin, S. Optimization of Mechanical Properties of Recycled Plastic Products via Optimal Processing Parameters Using The Taguchi Method. J. Materials Process. Technol. 211, 1989-1994, 2011.
9. Jafairan, A.R., Shakeri, M., Investigating the Influence of Different Process Parameters on Shrinkage of Injection-molding Parts, American Journal of Apply Science, 2, 3, 688-700, 2005.
10. Mehat, N.M., Kamaruddin, S. Investigating the Effects of Injection Molding Parameters on the Mechanical Properties of Recycled Plastic Parts using the Taguchi Method. Materials Manuf Process. 26, 202-209, 2011.
11. Yang, Y.K. Shie, J.R., Liao, H.T., Wen, J.L., Yang, R.T., A study of Taguchi and Design of Experiments Method in Injection Molding Process for Polypropylene Components, Journal

- of Reinforced Plastics and Composites, 27, 819, 2008.
12. Berginc, B., Kampus, Z., Sustaric, B., The Use of the Taguchi Approach to Determine the Influence of Injection Molding Parameters on the Properties of Green Parts, Journal of Achieving Materials Manufacturing Engineering, 15, 1-2, 63-70, 2006.
 13. Liao, S.J., Chang, D., Chen, H.J., Tsou, L.S., Ho, J.R., Yau, H.T., et al., Optimal Process Conditions of Shrinkage and Warpage of Thin Wall Parts. Polymer Engineering Science, 44, 917-928, 2004.
 14. Oktem, H., Erzurumlu, T., Uzman, I., Application of Taguchi Optimization Technique in Determining Plastic Injection Molding Process Parameters for a Thin-Shell Part, Materials & Design, 28, 1271-1278, 2007.
 15. Taguchi, G., Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1990.
 16. Ross, P.J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, Mc Graw-Hill, New York, USA, 1996.
 17. Phadke, M.S., Quality Engineering Using Robust Design, Printice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
 18. Yuin, W., Alan, W., Taguchi Methods for Robust Design, First ed. ASME Press, New York, 2000.
 19. Minitab Statistical Software, Release 15, Making Data Analysis Easier, State College, Minitab Corp., Pennsylvania, USA, 2007.
 20. Campo, E., A, Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards, William Andrew Inc., Norwich, USA, 2007.

Yaşlandırma Parametrelerinin Farklı Geometrilere Sahip Alüminyum Ekstrüzyon Ezilme Kutularında Darbe Performansına Etkileri

Emre Doruk
Mak. Yük. Müh.
TOFAŞ, Bursa

Gürkan Yılmazoğlu
Metalürji ve Malzeme Müh.
TOFAŞ, Bursa

Zeki Ayaz
TOFAŞ, Bursa

Tanya Başer
Dr.
TOFAŞ, Bursa

İsmail Durgun
Dr. Mak. Müh.
TOFAŞ, Bursa

Otomotiv sektöründe güvenlik ve konfor alanında ödün vermeden yüksek dayanımlı alaşımların kullanımı ve düşük yakıt tüketimi önemli bir hedef haline gelmektedir. Alüminyum alaşımları araç hafifletme ve çarpışma güvenliği gibi konularda daha iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek mukavemet hedefleri için sürekli geliştirilmektedir. Otomotiv sektöründe sac, ekstrüzyon ve döküm formundaki alüminyum kullanımı araç hafifletme çalışmalarında önemli derecede avantaj sağlarken, araç pasif güvenlik sistemlerinin tasarımında da etkili sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip alüminyum ekstrüzyon ezilme kutularının çarpışma performansına ısıl işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Isıl işlemler 160 °C'de ve farklı bekleme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı bekleme sürelerinin mekanik özelliklere etkilerini tespit etmek için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile de yaşlandırma parametrelerinin farklı geometrilere sahip ezilme kutularının çarpışma performanslarına etkileri araştırılmıştır.

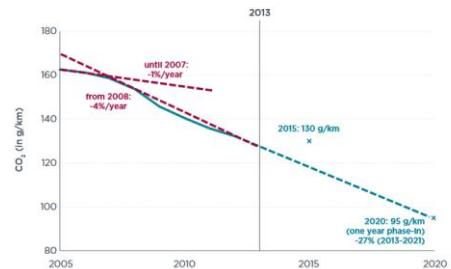
Anahtar Kelimeler: Alüminyum ekstrüzyon, ısıl işlem, çarpma performansı, AA 6XXX serisi

GİRİŞ

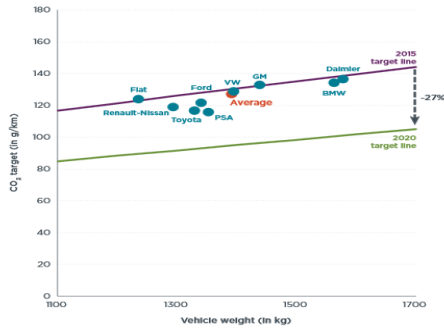
Otomotiv endüstrisinde, ekolojik dengeyi bozan CO2 emisyonlarını azaltmak için daha düşük yakıt tüketimi sağlayacak teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Şekil 1'de görülebileceği gibi Avrupa ve Türkiye CO2 emisyon standartlarına göre 2015 yılı sonuna kadar sınır değerlerin 130 g/km olacağı bilinmektedir. 2020 yılında ise bu değer 95 g/km olacaktır. Şekil 2'de bazı otomotiv üreticilerinin CO2 emisyon değerleri gösterilmektedir. Araçlarda konfor standartlarının yükselmesi ve yolcu güvenliğinin artırılması ile yeni aksam eklenmekte ve bu durum taşıt ağırlığında artışa neden olmaktadır. Yüksek yakıt tasarrufu için en etkin çözüm taşıttaki hafif alaşımlı parça miktarını arttırmaktır.

Şekil 3'de görüldüğü gibi alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyumun tercih edilmesinin nedenlerinden bir tanesi, araç tasarımı alanında en önemli husus olan yolcu güvenliğidir. Alüminyum bu

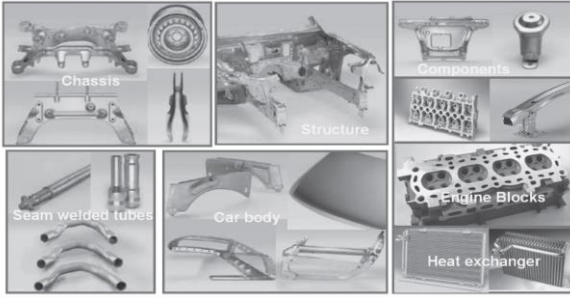
amaç için en uygun elementtir. Hem taşıt ağırlığını azaltmak, hem de güvenlik önlemlerini iyileştirmek için alüminyum alaşımları sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 1. Avrupa Birliği'ndeki binek araçların yıllar bazında CO2 emisyon seviyeleri [1]

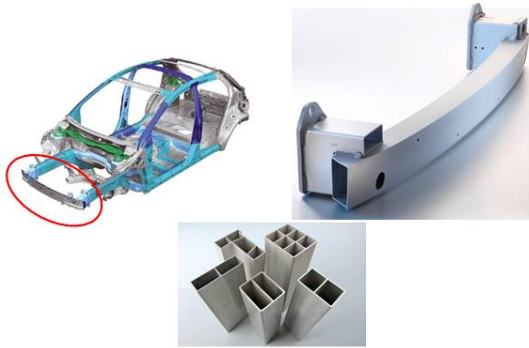


Şekil 2. Bazı otomotiv üreticilerinin CO2 emisyon seviyeleri [2]



Şekil 3. Otomotiv Uygulamalarında Kullanılan Alüminyum Parçalar [3]

Bu çalışma kapsamında alüminyum ekstrüzyon yöntemi ile imal edilmesi planlanan ve Şekil 4'de gösterilen çarpma traversi önden çarpmalı trafik kazalarında enerji absorbe eden en önemli parçalardan birisidir.



Şekil 4. Bir araca ait alüminyum ön çarpma traversi [4]

Çarpma traversinin kullanım amacı; araca önden gelen darbeleri sönmüleyip, belirli bir deformasyona uğratarak motor bölgesinde oluşacak hasarları minimize etmek ve kazanın etkilerini sürücü ve yolculara minimum düzeyde iletmeektir. Bu çalışmada otomotiv uygulamaları için ısıl işlem

parametrelerinin (çözeltiye alma sıcaklığı, yaşlandırma sıcaklık ve süresi) AA6082 alaşımının mekanik özelliklerine ve darbe performansına etkisi incelenmiştir. Tüm bunlara ek olarak, AA6082 ekstrüzyon profillerinde yaşlandırma sürelerinin darbe direncine etkisi için FE analizleri gerçekleştirilmiştir.

DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Al-Mg-Si alaşımları arasında yer alan AA6082 alaşımı kullanılmıştır. (Tablo 1). AA6082 alaşımı; 2 mm kalınlığında ekstrüzyon profilidir. Ekstrüzyon oranı 45'dir.

Tablo 1. AA6082 ekstrüzyon profilinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Al
0.78	0.4	0.08	0.5	0.67	0.16	Kalan

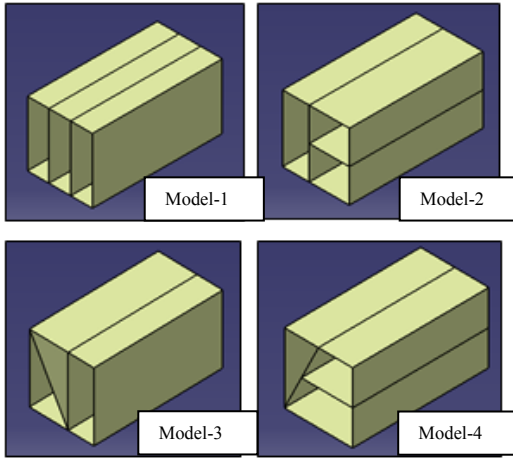
AA6082 ekstrüzyon profillerinden kesilen numunelere Nabertherm-L 24/12 ısıl işlem fırınında 600 °C'de 4 saat çözeltiye alma tavi uygulanmıştır. Çözeltiye alma tavi sonrası numuneler hava ile oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. Çözeltiye alma tavi sonrası numuneler ısıl işlem süresinin mekanik özellikler ve darbe performansına etkisini incelemek amacıyla; 160 °C'de 8, 10, 15, 18 ve 24 saat yapay yaşlandırılmıştır (YY).

160 °C'de farklı doğal yaşlandırma sürelerinin etkilerini incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Bu testler Zwick BZC-MM 14650.ZW01 model çekme testi cihazında 80 mm ölçüm boyundaki numune üzerinden 15 mm/dk çene hızında uygulanmıştır.

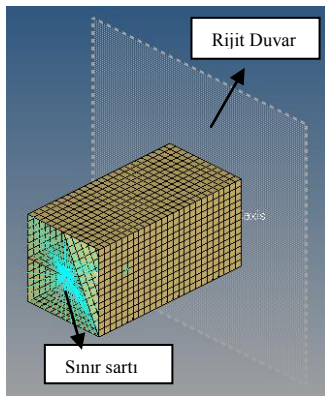
MODELLEME VE SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Bu çalışma kapsamında Şekil 5'te görülen 4 farklı alüminyum ekstrüzyon ezilme kutusu Catia yazılımı yüzey modülünde modellenmiştir. Ezilme kutularının boyutları 50x100 mm şeklindedir.

FE analizleri Altair HyperMesh yazılımında gerçekleştirilmiştir. Malzeme karakteristiklerini tanımlamak için MATL 24 malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model ile sonlu elemanlar analizine malzeme kartı oluşturulmaktadır. Burada tanımlanan parametreler; malzemenin akma ve kopma mukavemeti, yüzde uzaması, poisson oranıdır. Yarattılan model rijit duvara 16 m/s hız ile çarpıtılmıştır. Rijit duvarın ağırlığı 400 kg olarak tanımlanmıştır. Kontak tanımlamada otomatik tek yüzey kullanılmıştır.



Şekil 5. Farklı geometrilere sahip alüminyum ekstrüzyon ezilme kutuları



Şekil 6. Ezilme kutusunun çarpma sonlu eleman modeli

Şekil 6’da gösterilen sonlu elemanlar modeli, farklı geometrilere sahip 4 model içinde oluşturulmuştur. Bu oluşturulan modeller Ls-Dyna çözücüsü ile Tablo 2’de belirtilen farklı sürelerde yapılan YY değerlerinin sonucu olan mekanik özelliklere göre ayrı ayrı çözdürülmüştür. YY sonrası her bir numune üzerinden gerçekleştirilen çekme testleri ile elde edilen akma (σ_A) ve çekme (σ_C) dayanımları sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Böylece 4 model içinde yaşlandırma parametrelerinin darbe performansına etkileri tespit edilmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6082 ekstrüzyon profillerine çözeltiye alma tavlama 600 °C-4 saatte gerçekleştirilmiştir. 6082 profillerinin 160 °C’de farklı bekleme sürelerinde yapılan yapay

yaşlandırma (YY) sonrasındaki akma (σ_A) ve çekme (σ_C) dayanımları Tablo 2’de gösterilmektedir. Çözeltiye alma tavlama (ÇAT) hemen sonra yapılan çekme testi sonucu da Tablo 2’de karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır.

Tablo 2. 6082 ekstrüzyon profillerinde 160 °C’de farklı sürelerde yapılan YY tavlamalarının mekanik özelliklere etkisi (Numunelere 600 °C-4 saat ÇAT uygulanmıştır)

Yapay Yaşlandırma (YY) [saat]	σ_A [MPa]	σ_C [MPa]
ÇAT	118	225
8	220	274
10	236	279
15	262	287
18	270	285
24	289	295

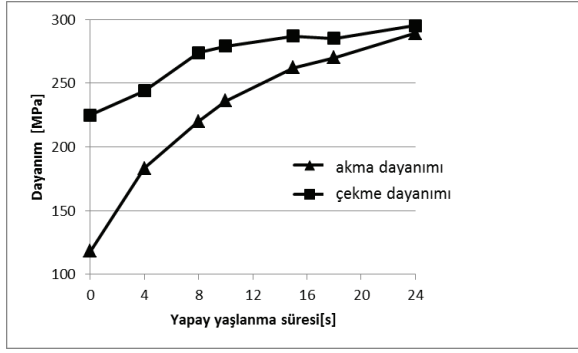
Yaşlanma süresinin (t_{YY}) mekanik özellikler üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek için farklı sürelerde doğal yaşlanmış numunelerin σ_A ve σ_C değerleri doğal yaşlanma süresinin fonksiyonu olarak Şekil 7’de gösterilmektedir. σ_A değeri t_{YY} ’nin artışı ile artmaktadır. Bununla birlikte t_{YY} artışı ile σ_C değerinde azalma gözlenmektedir. AA6082 alaşımların oda sıcaklığında bekleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişim çökelme sertleşmesi ile açıklanmaktadır. Literatürde AA6XXX alaşımlarındaki çökelme sırası aşağıdaki gibidir [5, 6];

Aşırı doymuş çözelti → GPI kümeleri → GPII kümeleri / yarı kararlı β'' (Mg_2Si) fazı → yarı kararlı β' (Mg_2Si) fazı → kararlı β (Mg_2Si) fazı

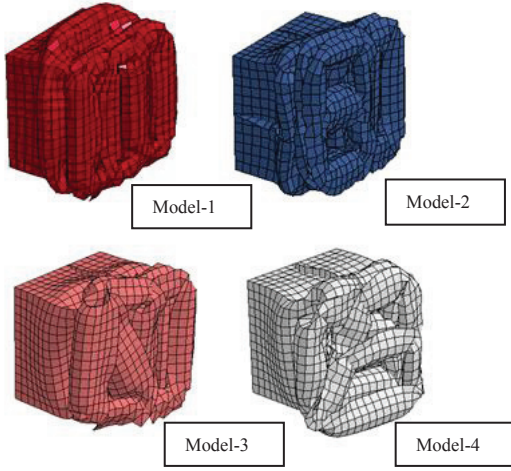
Aşırı doymuş çözelti, çözeltiye alma tavlama hemen sonra elde edilmektedir. Çözeltiye alma tavlama sonra Mg ve Si kümeleri oluşmaktadır. Mg ve Si kümeleri oda sıcaklığında doğal yaşlanma süresinin sonucu olarak GPI kümelerine dönüşmektedir [5, 6]. GP II kümeleri; diğer bir deyişle β'' fazı en yüksek sertlik değerinin sağlandığı fazdır. β'' fazı miktarının artması ile dayanım da artar. Bu nedenle σ_A ve σ_C daha uzun bekleme sürelerinde β'' fazı miktarının artması ile artmaktadır.

Şekil 8’de mekanik özellikleri Tablo 2’deki gibi olan 4 farklı alüminyum ekstrüzyon modelinin deforme olmuş halleri görülmektedir. İmalatçıdan temin edilen parça çözeltiye alma tavlamaına tabi tutulmuştur. Sonrasında ise 160 °C ‘de sırasıyla 8, 10,

15, 18, 24 h yaşlandırılmış ve sonrasında havada soğutulmuştur. Bu işlemler 4 model için de tekrarlanmıştır.



Şekil 7. Farklı t_{YY} fonksiyonu olarak σ_A ve σ_C değerleri



Şekil 8. Farklı modellerin plastik deformasyonları

Yapılan çarpışma analizleri sonucunda Tablo 3'de Model-1 için farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulan ve mekanik özellikleri değişen 6 farklı durumun enerji emme performansları ve reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir.

Yapılan çarpışma analizleri sonucunda Tablo 4'de Model-2 için farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulan ve mekanik özellikleri değişen 6 farklı durumun enerji emme performansları ve reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir.

Yapılan çarpışma analizleri sonucunda Tablo 5'de Model-3 için farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulan ve mekanik özellikleri değişen 6 farklı durumun enerji emme performansları ve reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir.

Tablo 3. Model-1 için karşılaştırmalı enerji emme kapasiteleri ve pik kuvvetleri (kN) [65 mm yer değiştirme için]

YY [saat]	Emilen Enerji [kJ]	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [kN]
ÇAT	2.80	76.84
8	4.22	133.9
10	4.52	143.9
15	4.16	159.8
18	4.04	164.5
24	3.81	175.6

Tablo 4. Model-2 için karşılaştırmalı enerji emme kapasiteleri ve pik kuvvetleri (kN) [65 mm yer değiştirme için]

YY [saat]	Emilen Enerji [kJ]	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [kN]
ÇAT	2.97	72.00
8	4.31	122.7
10	4.38	131.5
15	4.62	145.2
18	4.60	149.4
24	4.58	160.1

Tablo 5. Model-3 için karşılaştırmalı enerji emme kapasiteleri ve pik kuvvetleri (kN) [65 mm yer değiştirme için]

YY [saat]	Emilen Enerji [kJ]	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [kN]
ÇAT	2.90	79.88
8	4.19	137.1
10	4.43	146.6
15	4.76	161.8
18	4.81	166.4
24	4.88	178.2

Yapılan çarpışma analizleri sonucunda Tablo 6'de Model-4 için farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulan ve mekanik özellikleri değişen 6 farklı durumun enerji emme performansları ve reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir.

Tablo 6. Model-4 için karşılaştırmalı enerji emme kapasiteleri ve pik kuvvetleri (kN) [65 mm yer değiştirme için]

YY [saat]	Emilen Enerji [kJ]	Maksimum Reaksiyon Kuvveti [kN]
ÇAT	2.79	75.08
8	3.53	129.7
10	3.88	139.6
15	4.11	155.8
18	4.32	160.7
24	3.87	172.6

Model-1 için yapılan çarpma simülasyonlarına bakıldığında yaşlandırma süresinin artması ile maksimum reaksiyon kuvvetinin doğru orantılı bir şekilde arttığı fakat emilen enerjinin doğru orantılı şekilde artmadığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre en iyi durumun 10 saatlik yaşlandırma sürecinde alındığı tespit edilmektedir. 10 saatin üzerinde yapılan yaşlandırmanın enerji emilimine de maksimum reaksiyon kuvvetine de etkisi olumsuzdur.

Model-2 için yapılan çarpma simülasyonları incelendiğinde en iyi sonucun 15 saatlik yaşlandırma süresinde olduğu tespit edilmiştir. Fakat maksimum reaksiyon kuvvetinin model-1'e göre 1,3 kN fazla olduğu görülmektedir. Çarpma transvers tasarımı maksimum reaksiyon kuvvetinin düşük olması, enerji emilim değerinin yüksek olması istenir. Yüksek reaksiyon kuvvetleri parçanın plastik deformasyona uğramadan aniden kırılmasına neden olmaktadır.

Model-3 için yapılan çarpma simülasyonlarına bakıldığında ise, emilen enerjinin yaşlandırma süresi ile doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Aynı şekilde yaşlandırma süresi arttıkça maksimum reaksiyon kuvveti de artmaktadır. Maksimum enerji emilim değeri 24 saatlik yaşlandırma sonucunda 4.88 kJ olarak elde edilmektedir. Ancak buradaki reaksiyon kuvveti 178.2 kN'a çıkmaktadır. Burada çarpma transversinin normlardaki sınır değerleri göz önünde bulundurularak bir tercih yapılmalıdır.

Model-4 simülasyon sonuçları incelendiğinde, en iyi durumun 18 saatlik yaşlandırma süresinde elde edildiği görülmektedir. Ancak enerji emilim ve maksimum reaksiyon kuvveti değerlerine bakıldığında diğer 3 modele göre daha verimsiz olduğu görülmektedir.

ÖZET

Bu çalışmada otomotiv uygulamalarında kullanılan AA6082 ekstrüzyon profillerinde ısı işlem parametrelerinin (çözeltiye alma sıcaklığı, yaşlandırma sıcaklık ve süresi) mekanik özelliklere ve darbe performansına etkisi incelenmiştir. Doğal yaşlanma süresinin (t_{YY}) mekanik özellikler üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek için farklı sürelerde yapay yaşlanmış numunelerin σ_A ve σ_C değerleri yapay yaşlanma süresinin fonksiyonu olarak çizilerek karşılaştırılmıştır. σ_A değeri t_{YY} 'nin artışı ile artmaktadır. Bununla birlikte t_{YY} artışı ile σ_C değerinde azalma gözlemlenmiştir. AA6082 alaşımların oda sıcaklığında bekleme süresine bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişim çökeltme sertleşmesi ile açıklanmaktadır. Aşırı doymuş çözelti, çözeltiye alma tavından hemen sonra elde edilmiştir. Çözeltiye alma tavından sonra Mg ve Si kümeleri oluşmaktadır. Mg ve Si kümeleri oda sıcaklığında doğal yaşlanma süresinin sonucu olarak GPI kümelerine dönüşmüştür. GP II kümeleri; diğer bir deyişle β'' fazı en yüksek sertlik değerinin sağlandığı fazdır. β'' fazı miktarının artması ile dayanım da artar. Bu nedenle σ_A and σ_C daha uzun bekleme sürelerinde β'' fazı miktarının artması ile artmıştır. Yaşlandırma parametreleri 6082 ekstrüzyon profillerinin dayanım değerleri üzerinde önemli bir role sahiptir. Bu nedenle hedef dayanımları sağlayabilmek için yaşlandırma sıcaklık ve süreleri kontrollü bir şekilde yapılmalıdır. Yaşlandırma süresini arttırmak malzemenin mekanik dayanımını arttırmakta fakat bu artış malzemenin çarpma davranışını her zaman iyileştirmemektedir. Alüminyum ekstrüzyon yöntemi ile hücresel olarak imal edilen ezilme kutularının geometrileri de çarpma performansını etkilemektedir. Bu geometriler üzerinden yapılacak bir şekil optimizasyonu ile enerji emilim değerleri ve reaksiyon kuvvetleri daha da iyileştirilebilir.

THE EFFECT OF AGING PARAMETERS ON CRASH PERFORMANCE OF DIFFERENT GEOMETRICAL ALUMINUM EXTRUDED PROFILES

Development of high strength alloys and low fuel consumption of automobiles without sacrificing comfort and safety has become an important goal for automotive industries. Aluminum alloys were developed for the increasing demands in higher strength and better formability for light weight and crash worthiness aspects. Aluminum in its various product forms (sheet, extrusions, die castings) is an established automotive lightweight material offering excellent weight saving potential, including crashworthiness applications for passive vehicle

safety. In this study, the effect of heat treatment parameters on the crashworthiness of different geometrical extruded crash box is studied. The heat treatment was performed at 160 °C with different holding times on extruded profiles. Tensile tests are performed to determine the effect of different holding time on mechanical properties. FE analysis is also performed to investigate the effect aging parameters on crash performance of AA6082 extruded profile.

Keywords: Aluminum extrusion, heat treatment, crash performance, AA 6XXX series

TEŞEKKÜR

Yazarlar, TOFAŞ Ar-Ge Merkezi ve Canel Otomotiv'e sağladığı destek ve olanaklar için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Historical development and future targets for CO2 emission levels of new passenger cars in EU - Source: The International Council on Clean Transportation.
2. 2013 actual performance of the top-selling EU passenger car manufacturers, including 2015 and 2020 (effectively 2021) target lines – Source: The International Council on Clean Transportation.
3. Aluminum products for advanced automotive applications- Source: Jürgen Hirsch, Materials Transactions, Vol. 52, No. 5 (2011) p. 818.
4. Doruk, E., Başer, T. A., Durgun, İ., Taşıt Elemanlarında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Enerji Sönümleme Yeteneklerinin İncelenmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, , ALUS 2015.
5. Başer, T. A., Usta M., Çetin H., Özcan, Ş., Çeliker, T., 7th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 20-23 June 2013, Antalya, Türkiye, 77.
6. Engler O., Hirsch, J., Mater. Sci. Eng. A 2002, pp 336-249.

Merih Şengönül
Yrd.Doç.Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

İsmail Durgun
Dr.

TOFAŞ Ar-Ge Merkezi, Bursa

Nihan Dökmetaş
M.Sc

ATILIM Üniversitesi
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
Ankara

Hakan Kalkan
M.Sc

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

Bilgin Kaftanoğlu
Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü ve
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
Ankara

Bor Nitrür Kaplamanın, Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışlarına Etkisi

Sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkiler veya korozyon nedeniyle endüstride kullanılan malzemelerin ticari ömürleri sıklıkla beklenenden daha önce sona ermektedir. Genellikle yüzeyde meydana gelen bu etkilere maruz kalan malzemelerin ömürlerini uzatmak için yine yüzey seviyesinde değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Fonksiyonel kaplamalar yüzey iyileştirme yöntemlerinden en önemlisidir. Bu kaplamalar içinde bor nitrür üstün mekanik ve kimyasal özellikleri nedeni ile özellikle çelik yüzeyler için son zamanlarda en fazla dikkat çeken kaplamalardan birisi haline gelmiştir. Bu çalışmada, otomotiv sanayinde nokta kaynak uygulamaları sırasında kaynak aparatlarına kaynak çapaklarının yapışmasını engellemeye yönelik olarak bor nitrür kaplamanın performansı araştırılmıştır. Bu aparatların yüzeylerine yapışan kaynak çapaklarının, imalat süreci durdurularak sık sık temizlenmesi ihtiyacı nedeniyle oluşan önemli bir zaman kaybı vardır. Bu sürecin olabildiğince kısaltılması imalat maliyetleri açısından verimlilik artıracak bir yaklaşım olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Bor nitrür, kaynak aparatları, kaplamalar

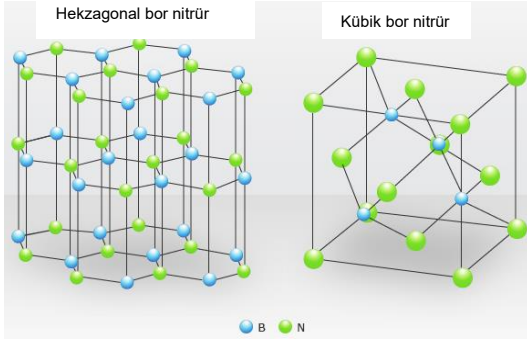
GİRİŞ

Borun, çeliklerin yüzey sertliğini artırdığı ve aşınmaya karşı etkili koruma sağladığı uzun bir süredir bilinmektedir. Bor, Fransız kimyacı Henri Moissan tarafından 1895 yılında ilk defa %98'lere varan bir saflıkta elde edilmiştir. Son yarım asırlık zaman zarfında ve özellikle son dönemlerde, bor uygulamaları büyük ölçüde arttı. Günümüzde borlama teknolojisi belli bir olgunluğa ulaşmış olmasından ötürü endüstride, özellikle çokça kullanılan alternatif yüzey sertleştirme yöntemlerinden birisi haline gelmiştir. Almanya'da katı ortamda, Rusya'da ise sıvı ortamda borlama birçok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır [1]. Ayrıca, son dönemde bor üzerine yoğunlaşan bilimsel araştırmalar sayesinde, bor bileşiklerinin yaygın kullanımını sağlayacak yeni alanlar ortaya çıkmaktadır. Bu bileşiklerin bazıları uygulama alanları açısından son derece değerlidir ve bu da dünya bor rezervlerinin en büyük kısmına sahip olan

ülkemiz için önemli bir ticari potansiyel yaratmaktadır. Bu kaynakların ileri teknoloji alanlarında değerlendirilmesi ülkemiz geleceği açısından hayatidir [2].

Kübik yapıdaki bor nitrür (c-BN), üstün mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı yüksek aşınma direnci sunmaktadır ve bu da c-BN'i geniş kullanım alanları bulan önemli bir kaplama malzemesi konumuna getirmiştir (Şekil 1). Yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, iyi ısıl iletkenlik, yüksek elektrik ve aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığı c-BN'in en bilinen özellikleri olarak sayılabilir. Kübik bor nitrür (c-BN) elmasan sonra bilinen en sert malzemedir. Hatta yüksek sıcaklıklarda oksijen ve demir bazı malzemelere karşı gösterdiği kimyasal kararlılığı, elmasa göre daha iyidir [3]. Talaşlı imalat sırasında kullanılan atık soğutma sıvılarının yarattığı çevre sorunları ve üretime getirdikleri ilave maliyetler göz

önünde bulundurulduğunda, yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve aynı zamanda kullanım ömrü, aşınma ve yıpranmanın azalmasından dolayı daha uzun olan kesici takım bıçaklarına talep giderek artmaktadır. Bor Nitrür (BN) kaplama teknolojisi bu amacı gerçekleştirmek üzere geliştirilmiştir [4, 5].



Şekil 1. Bor nitrür bileşiğinin denge yapısal formları [6]

Bu çalışmada, nokta kaynağı sırasında aparat üzerinde oluşan kaynak çapaklarının önlenmesinde alternatif ve yenilikçi bir yaklaşım olarak bor nitrür kaplama kullanılmış ve bunun etkileri araştırılmıştır. Otomobil gövde parçalarının bir araya getirilmesinde nokta kaynağı ana birleştirme yöntemidir. Birleştirme işlemleri tamamlanmış bir araç gövdesinde yaklaşık 4000 ile 6000 arasında nokta kaynağı bulunmaktadır (Şekil 2). Ancak, nokta kaynağı uygulamasında ark kıvılcımlarının oluşmasının önüne geçilmesi prosesin doğası gereği pek kolay değildir. Bu kıvılcımlar parça yüzeylerinden kopardıkları küçük partikül ve çapakları çevre aparatların yüzeylerine yapıştırarak biriktirirler. Bu topaklanmanın araç gövde parçalarına temas eden yüzeylerde oluşması özellikle arzu edilmez. Zira üzerlerindeki çapak birikmesi arttığında parçaların aparata tam oturması gerçekleşmeyebilir ve bu da birleşen parçaların nihai ölçümlerinde sapmalara yol açar. Bu nedenle otomotiv üreticileri kaynak işlemlerine ara vererek belirli periyotlar ile aparatlar üzerine yapışarak biriken bu çapakları temizlerler. Bu temizlik genellikle su jetiyle yapılmaktadır, ancak son dönemlerde kuru buz ile yüzey temizliği de tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak, bu temizlik uygulamalarına gerek bırakmayacak şekilde aparat yüzeylerinde çapak birikmesini önleyecek yenilikçi yaklaşımlar, hem aparat yüzeylerinin temizlik maliyetlerinin aşağı çekilmesini hem de bu nedenle kaybedilen zamanın azaltılmasını sağlayarak verimli ve dolayısıyla rekabetçi bir üretim hattı uygulamasına fırsat verecektir.



Şekil 2. Otomobil gövde üretim hattı [7]

DENEYSEL YÖNTEMLER

Numune hazırlama

Bu çalışma için kaynak çapaklarından temizlenme gereksinimi duyulan üç farklı gövde aparat parçası seçilmiştir. Bu parçaların her birinden ikişer adet imal edilmiş ve birinci takıma bor nitrür kaplama yapılırken, kontrol deney için hazırlanan diğer takıma kaplama yapılmamıştır. Hazırlanan bu parçalar aynı sayıda kaynak adetlerince ve aynı sürelerde üretim hattında kullanılmışlardır (Şekil 3).

Aparat numulerinin bor nitrür (BN) ile kaplanması

Kaplama yapılmadan önce sistemin genel bakımı ve kaplama kabınınin detaylı temizliği yapılmıştır. Aparat yüzeylerinin homojen şekilde kaplanabilmesi için kaplama kabini içerisine uygun bir şekilde yerleştirilmesi gereklidir. Bu durum dikkate alınarak tutucular buna göre kaplama öncesinde tasarlanmış ve imal edilmişlerdir. Son olarak da tüm numuneler ve tutucular kumlama, ultrasonik ve çeşitli kimyasallar kullanılarak temizlenmişlerdir. Numunelere aseton ve de-iyonize sudan oluşan bir çözelti içinde oda sıcaklığında yaklaşık 10 dakika süre ile ultrasonik temizlik yapılmıştır. Bu işlem süresince ortam sıcaklığının oda sıcaklığına yakın sıcaklıklar civarında olması sağlanmıştır. Kaplama öncesinde hazırlanan aparat numuneleri Şekil 4'de gösterilmiştir.

Temizleme işleminden sonra, numuneler daha önce tasarlanmış olan Şekil 5'de gösterilen hem aksenal hem de orbital dönen mil mekanizmasına bağlı tutucular üzerine yerleştirildi. Kaplanacak malzemenin geometrisi ve kaplanacak alan göz önünde bulundurularak hedefleme ve dönme sistemi kaplamaya hazır hale getirilmektedir. Dönme hızı ortalama 25-30 d/d arasındadır. Tutuculara yerleştirilen numuneler daha sonra yüzeyleri magnetron saçtırma tekniği ile bor nitrür ile kaplandı.



Şekil 3. Aparatlar üzerinde biriken kaynak çapakları

Kaplama yöntemleri arasında fiziksel buhar çöktürme (PVD) prensibine dayanan magnetron saçırma tekniği özellikle düşük kaplama sıcaklığı nedeni ile öne çıkmaktadır (Şekil 6). Düşük sıcaklıkta kaplama uygulamaları, metal alttaşlarının arzu edilmeyen ısıl işlemlere maruz kalma durumlarını ortadan kaldırdığı için oldukça önemlidir. PVD magnetron saçırma tekniği, keskin kenarlı karmaşık parça biçimleri üzerine bor nitrürün tüm kristal formlarının ince bir film olarak kaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [8-13]. Bor Nitrür (BN) kaplama, katot olarak kullanılan

yaklaşık 100x250mm boyutlarındaki sinterlenmiş hekzagonal bor nitrür (hBN) hedef plakasından yüksek vakum altında oluşan plazma ile koparılıp iyonlaştırılan atomların alttaş numunesi üzerinde biriktirilmesi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Kaplanacak numunelerin yerleştirilmesinin ardından mekanik pompa ile ortam basıncı öncelikle 10-2 Torr'a kadar düşürülmektedir. Bu esnada sisteme sıcak su verilerek ortamdaki olası su moleküllerinin buharlaştırılması sağlanmaktadır.



Şekil 4. Kaplanmamış kaynak aparat numuneleri

Basıncın 10^{-2} Torr'a düşmesinin ardından ortama kapalı devre su sistemi ile su verilerek turbo pompa çalıştırılmaktadır. Basıncın 2×10^{-5} Torr'a düşmesinin ardından da ortama Argon gazı verilerek 250 W RF ile plazma temizliği uygulanmaktadır. 10 dakika süren plazma temizliğinin ardından 700 W magnetron RF'i ile kaplama işlemi yapılmaktadır. Argon ve Azot gaz oranları 5/1 olacak şekilde ayarlanmaktadır. Sistem içerisinde yer alan iki adet lamba ısıtıcının önünde bulunan ısı çift sayesinde sıcaklık ölçüm ve ayarı yapılmakta ve sıcaklık yaklaşık 200°C civarında tutulmaktadır. Kaplama işlemi sistemin vakumlanması ve plazma temizliği dâhil yaklaşık 5 saat kadar sürmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Bor nitrür kaplama merkezi

Bor nitrür (BN) kaplamalarının karakterizasyonu

Kaplamaların yüzey morfolojisi ve dağılımı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. BN kaplamanın çapak birikmesine etkileri de, yüzeyden koparılabilen çapak miktarının hassas terazi de ölçülmesi ile test edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) 1.75, 5.60 ve 17.5 mm'lik doğrusal bir yüzey taranarak elde edilmiş ve daha sonra aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bunlara ilave olarak, kaplanmış parçaların nanosertlikleri nano çentik ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Örnek tutucular

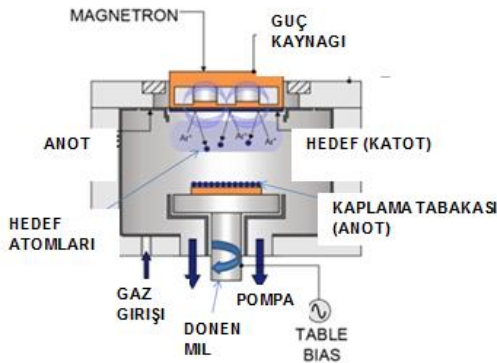
DENEY BULGULARI

Kaplama işleminden sonra numune yüzeylerindeki değişiklikler çıplak gözle incelendi. Ardından, aynı şekilde aynı ağırlıkla üretilmiş fiştirler aynı imalat koşullarında nokta kaynak uygulamasına eşit zaman dilimleri ile maruz bırakıldılar. Daha sonra kaplanmış ve kaplanmamış aparatların üzerinde oluşan çapaklar dökülerek hassas terazide miktarları ölçüldü (Tablo 1).

Tablo 1. Numuneler üzerinde biriken çapak ağırlıkları

	BN Kaplanmış Numune	BN Kaplanmamış Numune
1	0,4502 g	1,9900 g
2	0,1351 g	1,9683 g
3	0,2605 g	1,0197 g
Ortalama	0,2820 g	1,6593 g

Yüzey pürüzlülüğünün çapak yapışma davranışına etkisini incelemek üzere Mar Surf PS1 Mahr cihazı ile R_a yüzey pürüzlülük değerleri ölçüldü. Sırasıyla 1.75, 5.60 ve 17.5 mm'lik çizgisel yüzeylerden altışar adet ölçüm alındı. R_a yüzey pürüzlülük değerleri Kaplamalı ve Kaplanmamış numuneler için Tablo 2. ve Tablo 3.'de verilmiştir.



Şekil 6. Fiziksel buhar çöktürme yöntem şeması [14]

Tablo 2. Kaplamasız fikstürlerin Ra yüzey pürüzlülük değerleri

Test	Ölçüm uzunluğu (mm)	Ra (μm)
1	1,75	0,946
2	1,75	1,072
3	1,75	0,890
4	1,75	0,586
5	1,75	0,830
6	1,75	0,889
1	5,60	1,599
2	5,60	1,226
3	5,60	1,640
4	5,6	1,401
5	5,60	1,087
6	5,60	1,706
1	17,5	2,507
2	17,5	2,387
3	17,5	1,840
4	17,5	1,596
5	17,5	1,810
6	17,5	1,785
Aritmetik Ortalama		1,433

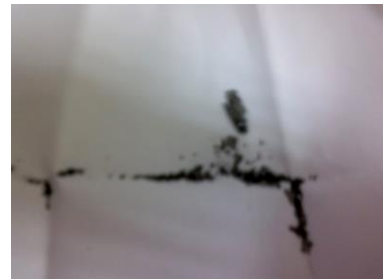
Tablo 3. Kaplamalı fikstürlerin Ra yüzey pürüzlülük değerleri

Test	Ölçüm uzunluğu (mm)	Ra (μm)
1	1,75	0,550
2	1,75	0,634
3	1,75	0,576
4	1,75	0,383
5	1,75	0,395
6	1,75	0,377
1	5,60	1,781
2	5,60	1,880
3	5,60	1,236
4	5,60	0,747
5	5,60	0,756
6	5,60	0,800
1	17,5	1,956
2	17,5	1,942
3	17,5	1,947
4	17,5	1,070
5	17,5	1,217
6	17,5	1,651
Aritmetik Ortalama		1,105

Şekil 8 ve 9'da kaplamalı ve kaplamasız aparatlardan toplanan kaynak çapakları gösterilmiştir.

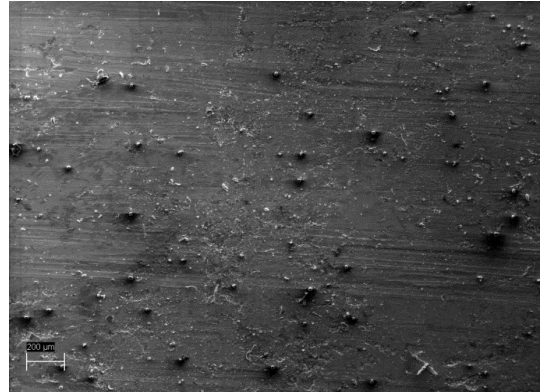
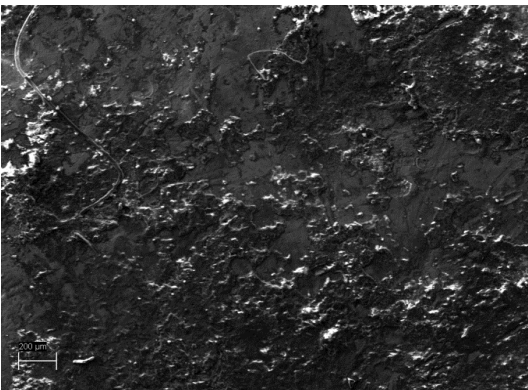
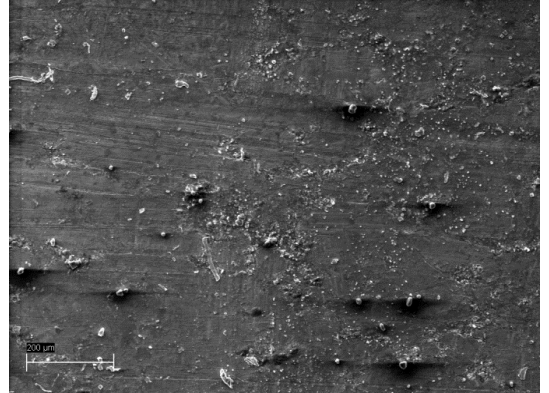
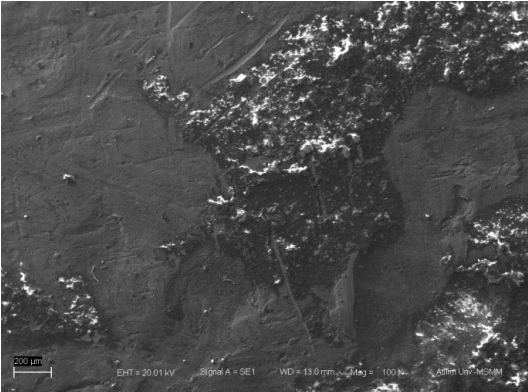
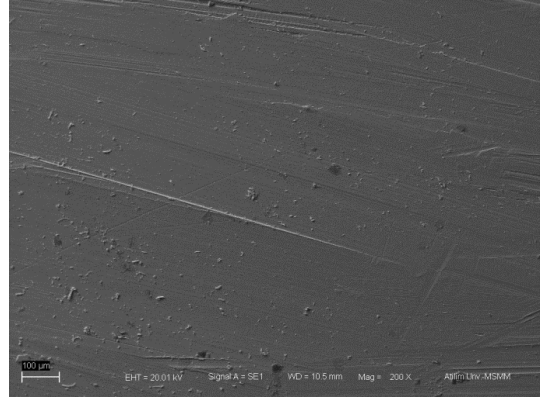
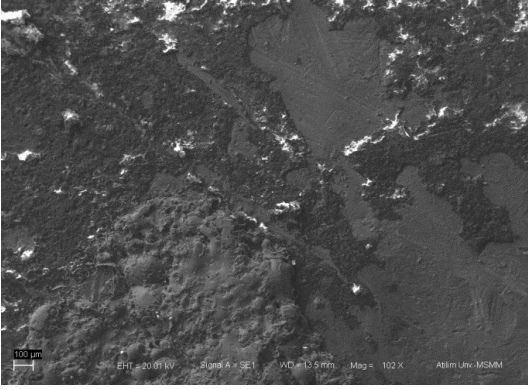
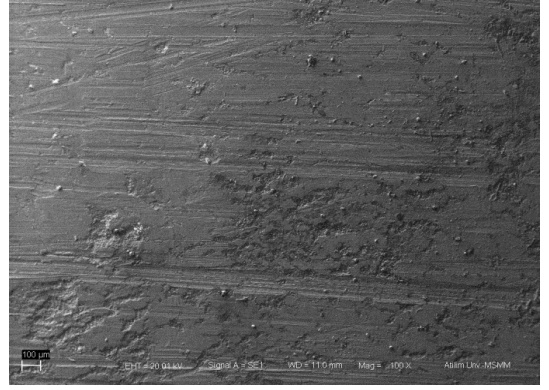
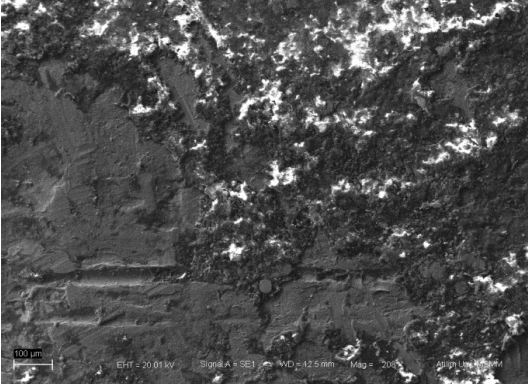


Şekil 8. Kaplanmamış aparatlardan toplanan kaynak çapakları



Şekil 9. BN kaplanmış aparatlardan toplanan kaynak çapakları

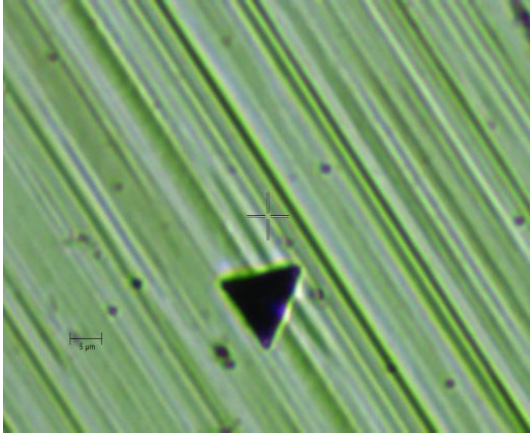
Numune üzerinde kalan çapak oluşumlarının yüzeydeki dağılımlarını gözlemek üzere Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'nda 100 ve 200 X büyütmede görüntüler alındı. Şekil 10 ve 11'de de görüleceği üzere BN kaplanmış numunelerdeki çapakların kaplanmamış numunelere göre oldukça az olduğu tespit edildi.



Şekil 10. Kaplanmamış numunelerin 100 ve 200 X büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 11. BN kaplanmış numunelerin 100 ve 200 X büyütmelerdeki SEM görüntüleri

Nano çentik cihazı ile yapılan ölçümlerde kaplanmamış numunelerin sertliği yaklaşık 250 Vickers çıkarırken kaplanmış numunelerin sertliği yaklaşık 430 Vickers olarak ölçüldü.



Şekil 12. Numunelere uygulanan nano çentik testi örneği

SONUÇLAR

Kaynak aparatlarının dış yüzeylerinin olabildiğince temiz kalabilmesi kaynak uygulamaları için önemlidir. Bu yapılan çalışmada, BN kaplı aparat numuneleri üzerindeki kaynak çapak birikmelerinin kaplamasız aparat numunelerine göre oldukça az olduğunu görülmüştür. Bu olumlu sonucun oluşmasında, yüzeylerin ortalama Ra yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki farklılığın neden olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde, BN kaplama sonucunda ortalama Ra yüzey pürüzlülük değerlerinin 1.433 μm 'den 1.105 μm 'ye düşerek 0.328 μm 'lik bir iyileşme kaydettiği tespit edilmiştir. Ancak numuneler arasında oluşan söz konusu Ra farkının, kaplamasız numunelerin ortalama standart sapma değeri 0.2364 μm ve kaplamalı numunelerin ortalama standart sapma değeri 0.314 μm 'ye çok yakın olması, yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki farkın kaynak çapaklarının yapışmasına kayda değer etki yapacak düzeyde olmadığı görüşüne bizi sevk etmiştir. Bunlara ilave olarak, BN kaplı yüzeylerin yüzey sertliğinde de, kaplanmamış numunelere göre 2 kata yakın bir artış kaydedilmiştir. Bu durumun kaynak çapak yapışmasına hafif bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber, bu davranışın asıl sebebin, altta imalatında kullanılan çeliğe kıyasla bor nitridin yüksek ergime sıcaklığı (2950°C) olduğu düşüncesindeyiz. Zira nokta kaynağı işlemi sırasında çok yüksek sıcaklıklara çıkılmaktadır. Dolayısıyla bu işlem sırasında oluşan kızgın haldeki ark sıçramalarıyla oluşan çapaklar çıplak metal yüzeylerine yüksek sıcaklıkta güçlü bir şekilde

kaynamaktadırlar. BN kaplamaların yüksek ergime sıcaklıklarından ötürü yapısal bütünlüklerini koruyarak bu esnada oluşan yüksek sıcaklıktaki çapakların aparat yüzeyine kaynamalarına imkan vermediğini düşünmekteyiz. Bu durum, kaynak çapaklarının az birikmesini ve aparatların kolay temizlenebilmesini sağlamaktadır. Kaynak aparatlarına BN kaplama uygulanması halinde, temizlik için gereken zamanın ciddi miktarlarda azalacağı ve bu sayede hattın verimliliğinin artacağı görüşündeyiz. Tablo 1'de de görülebileceği gibi aynı şartlar altında kullanılan BN kaplanmış yüzeylerde biriken kaynak çapak miktarı kaplanmamış yüzeylerdeki birikimin neredeyse dörtte biri kadardır ve yumuşak bir kıl fırça yardımıyla bile temizlenebilmektedirler. Ancak kaplanmamış numunelerde kaynak çapaklarını yüzeylerden koparmak için metal spatulaların kullanılması gerekmiştir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, BN kaplanmış aparatlar ile temizlik arası verilmeksizin yapılabilecek üretim süresi yaklaşık dört kat artabilecektir.

Ayrıca, kaynak aparatları üzerinde biriken çapaklar, BN kaplama yüzeylerine güçlü bir şekilde yapışmadıkları için su jeti veya kuru buz temizliğine ihtiyaç olmaksızın yumuşak bir fırça veya bez yardımı ile temizlenebileceklerdir. Kaplanmamış yüzeylerin çapak temizliğinin üretim süreci durdurularak yapılması gerekirken BN kaplı yüzeylerde üretimi durdurmadan istenilen zamanda ve çok kısa sürede temizlik yapılabilecek olması özellikle vurgulanması gereken bir husustur. Bu da kaynak çapaklarının oluşturduğu geometrik problemlere anında müdahale etme imkanı tanıdığı için ürün kalitesine iyileşme olarak yansacaktır.

INFLUENCE OF BORON NITRIDE COATING ON THE ADHESION OF WELDING SPATTERS ON METALLIC WELDING FIXTURES

The commercial timespan of materials used in industry can be severely shortened by the tribological factors like friction/wear and by corrosion. To extend the lifetime of such materials, their surfaces need to be modified. Functional surface coatings are mainly used for this purpose. Because of its superior chemical and mechanical properties, Boron Nitride is recently becoming one of the attractive and preferred coatings for steel. In this research, performance of boron nitride coating on the prevention of adhesion of welding spatters on welding fixtures is studied. It is an important issue to reduce the manufacturing costs of welding and hence increase the efficiency of the manufacturing process by shortening the intersession time of the welding processes allocated for the cleaning of the fixtures.

Keywords: Boron nitride, welding fixtures, coatings

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki katkılarından ötürü Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, BOREN Bor Kaplamalar Yetkinlik Merkezi ve TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikaları A.Ş.'ne teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKÇA

1. Uzun, H.A., “Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
2. Addemir, O., “Bor Ürünlerinin Teknolojileri ve Türkiye'nin Durumu”, 1. Uluslar Arası Bor Sempozyumu, Kütahya, 3-4 Ekim 2002
3. Kaftanoğlu, B., Dökmetaş, N., “Kübik Bor Nitrür (c-BN) Kaplamalar”, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim 2012, Ankara
4. Willa G., Perkins P.-G., “Is There a New Form of Boron Nitride With Extreme Hardness?”, *Diamond and Related Materials* 10 (2001) 2010_2017
5. Audronis M., Valiulis A.-V., “Silickas P., Recent Developments in the Deposition of c-BN Coatings”, ISSN 1392–1320 *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*, Vol. 10, No. 2. (2004)
6. <http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Ceramics/Sci-Media/Images/Boron-nitride>
7. <http://www.jec-inc.com/>
8. Deng J., Wang B., Tan L., Yan H., Chen G., “The Growth of Cubic Boron Nitride Films by RF Reactive Sputter”, *Thin Solid Films* 368 (2000) 312-31
9. Zhu P.W., Zhao Y.N., Wang B., He Z., Li D.M., Zou G.T., “Prepared Low Stress Cubic Boron Nitride Film by Physical Vapor Deposition”, *Journal of Solid State Chemistry* 2002 167, 420–424
10. Ye J., Rothaar U., Oechsner H., “Conditions For The Formation of Cubic Boron Nitride Films by R.F. Magnetron Sputtering”, *Surface and Coatings Technology* 105 (1998) 159–164
11. Hu C., Kotake S., Suzuki Y., Senoo M., “Boron Nitride Thin Films Synthesized by Reactive Sputtering”, *Vacuum* 59 (2000) 748-754
12. Zhao Y.-N., Wang B., Yu S., Tao Y.C., He Z., Li D.M., Zou G.T., “Preparation of c-BN Films by RF Sputtering And The Relation of BN Phase Formation to The Substrate Bias And Temperature”, *Thin Solid Films* 320 (1998) 220-222
13. Jiang L., Fitzgerald A.-G., Rose M.J., Lousa A., Gimeno S., “Formation of Cubic Boron Nitride by RF Magnetron Sputtering”, *Surface Interface Analysis* 2002 , 34, 732-734 228
14. [http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-and-growth/plasma-etch-deposition/physical-vapour-deposition-\(pvd\)](http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-and-growth/plasma-etch-deposition/physical-vapour-deposition-(pvd))

Yusuf Tansel İ
Doç. Dr.

F. Selin Akkoç
End. Müh.

Nergis Gümüşboğa
End. Müh.

Zeynep Ballı
End. Müh.

Başkent Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Endüstri Müh. Bölümü
Ankara

Tornalama İşleminde Karbon Emisyonunu En Aza İndiren Bir Modelin Geliştirilmesi

Son günlerde birçok araştırmacı büyük miktarda enerji tüketen ve atmosfere karbon salan imalat işlemleri üzerinde yoğunlaşmışlardır. Karbon salınımını azaltmayı amaçlayan düşük karbonlu üretim literatürde popüler bir konu başlığıdır. Bu çalışma, geleneksel tornalama işleminde karbon salınım miktarının belirlenmesine yönelik bir bütünlük model sunmaktadır. Çalışmada kesici takım, elektrik sistemi, iş parçası ve kesici takım malzeme özellikleri ve talaş kaldırma gibi geleneksel torna tezgahı alt sistemlerinin toplam karbon emisyonuna katkıları araştırılmıştır. Ardından tekil alt sistemlerin toplam karbon salınımı miktarını nicel olarak ortaya koyan bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model geleneksel bir torna tezgahında farklı kesme faktörlerinin karbon salınımına etkilerini tespit etmek için bir tornalama işlemine uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon salınımı; talaşlı imalat; tornalama; Taguchi Yöntemleri; enerji tüketimi.

1. GİRİŞ

Karbon salınımı karbon içerikli yakıtların (fosil yakıtlar, petrol, doğalgaz, kömür vb.) yanması sonucu karbondioksitin oluşarak atmosfere karışmasıdır.

Endüstri sektörlerinin önemli bir parçası olan talaşlı imalat işlemleri küresel ekonomide oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, talaşlı imalatın gerçekleştirildiği üretim süreçlerinde enerji tüketiminin azaltılması, çevreye duyarlı üretim açısından önemli bir konu haline gelmiştir. Bilindiği üzere; fosil yakıtların, özellikle endüstriyel sektörlerde giderek daha yaygın kullanılması, atmosferde sera gazlarından biri olan karbondioksit (CO₂) miktarında önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu nedenle karbon salınımının çevre üzerindeki olumsuz etkisi reddedilemez bir gerçek haline gelmektedir.

Küresel ısınma konusundaki kaygıların artmasına paralel olarak, büyük ölçüde enerji tüketip, atmosfere karbon salan endüstriyel etkinliklerde karbon salınımının azaltılması günümüzün önemli konularından biri haline gelmiştir. Karbon salınımını büyük ölçüde arttıran enerji tüketimi ile paralel olarak artan çevre kirliliği ve küresel ısınma konusundaki kaygılar da gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle karbon yoğunluğunu azaltarak, kaynak kullanımını iyileştirmeyi amaçlayan düşük karbonlu üretim yöntemlerine yönelik araştırma ve çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada, bir tornalama işleminde tornalama işlemine katkısı olan alt

sistemlerin karbon salınımını (emisyonunu) en aza indirmek üzere, tornalama işlemi kesme parametrelerinin eniyilenmesine yönelik bir model geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle; elektrik sistemi, kesici takım sistemi, iş parçası ve kesici takım malzeme özellikleri ve talaş oluşumu gibi, bir torna tezgahının toplam karbon emisyonu değerine katkıda bulunan alt sistemler için karbon salınımı değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Daha sonra, tekil bazdaki alt sistemler sonucunda ortaya çıkan karbon salınımı miktarları toplanarak tornalama işlemi için toplam salınım miktarının hesaplanabildiği bir uygulama geliştirilmiştir. Ardından tornalama işleminde karbon salınımını en aza indiren kesme koşullarının belirleneceği bir model Taguchi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde talaşlı imalatla ilgili olarak karbon salınımı değerine etki eden faktörleri sınıflayan ve alt sistemler bazında karbon salınımının hesaplanabildiği formülasyonları ayrıntılı olarak ortaya koyan nitelikteki bir çalışma Li v.d. [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. Diğer bir çalışmada Herrmann ve Thiede [2] üretim sistemlerinde farklı katmanlardaki enerji verimliliğini artırmak için bir süreç zinciri benzetim yöntemi ortaya koymuştur. Tian [3] enerji değerlendirme yöntemi ve ilişkiyi süreç planlama için olasılıklı eniyileme modelleri üzerinde çalışmıştır.

Rahimifard [4], hangi enerji verimsizliklerinin kolayca belirlenerek iyileştirilebileceğine bağlı bir model önermiştir. Gutowski [5] ise kaynak tüketim özelliklerinin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin araştırılmasını sağlayan bir çerçeve çalışması sunmuştur. Neugebauer [6], Gutowski'nin çalışmasına benzer bir çalışmayı metal kesme takımları için gerçekleştirmiştir. Diaz [7] ise yine Gutowski'nin çalışmasına benzer bir çalışmayı freze tezgahı takımlarının enerji tüketimi azaltma stratejileri için gerçekleştirmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmalara benzer türde yine kesici takımlarının, işlemlerin ve sistemlerinin enerji verimliliklerini ortaya koymak üzere geliştirilen modellerle ilgili literatürdeki diğer çalışmalar Tablo 1'de sunulmuştur.

Bu çalışmamızda, ülkemizde imalat sanayiinde önemli bir paya sahip olan talaşlı imalat sektöründe

en yaygın kullanıma sahip işlemlerden biri olan tornalama işlemi için karbon salınımını en aza indirecek bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin literatürdeki çalışmalardan en önemli farkları; modelin Türkiye Enerji Verimliliği değerleri ve ilgili parametreleri kullanılarak geliştirilmiş olması, karbon emisyonu modelinin tornalama işlemi için en uygun kesme şartlarını sunabilmesi, tornalama süresini formülasyonlar kullanarak hesaplamak yerine, gerçek zamanlı tornalama işlemi deneyleri gerçekleştirilerek yapılması ve böylece deneye etki eden kontrol edilemeyen unsurların da sonuçlar üzerine etkisinin yansıtılabilmesidir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kesme parametrelerinin en iyi değerlerinin hesaplandığı bir deney tasarımı modeli de çalışmada sunulmuştur.

Tablo 1. Karbon emisyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar

Kaynak No	Yazar	Yıl	Açıklama
[8]	Jia v.d.	2013	İşleme proseslerine yönelik bir enerji talebi modelleme yöntemini incelenmiştir.
[9]	Krishnan v.d.	2004	Çevre değer sistemlerinin analizini kullanarak, yarı iletken ekipmanların karbon ayak izinin ölçümünü yapmıştır.
[10]	Jeswiet ve Kara	2008	Üretimde enerji tüketimi ile karbon emisyonu arasındaki ilişkiyi göstermek amacıyla elektrik karbon emisyon faktörü kavramını ortaya atmıştır.
[11]	Tridech ve Cheng	2008	Karbon emisyon analizini, düşük karbonlu üretimin özelliklerini modellemeyecek biçimde genişletmiş ve daha sonra, hem tesis ortamında, hem de tedarik zinciri düzeyinde düşük karbonlu üretim için iki işletim modeli ortaya atmış ve benzetim modelini sunmuştur.
[12]	Diaz v.d.	2010	Freze tezgahlarının enerji tüketimini temel alarak, bu tezgahların çevreci tasarım ve işletim stratejilerini araştırmıştır.
[13]	Song ve Lee	2010	Malzeme listesinden hareketle, entegre bir düşük karbon salımlı ürün tasarım sistemi öne sürmüş ve ürün parçalarının karbon emisyonlarını da çalışmasına dahil etmiştir.
[14]	Rajemi v.d.	2010	İşlenmiş bir ürünün enerji ayak izinin optimizasyonu için yeni bir model ve metodoloji geliştirmiştir.
[15]	Le ve Lee	2011	Küresel tedarik zinciri ağının ekolojik – çevresel etkisini analiz etmek için bir model geliştirmiştir.
[16]	Halavi v.d.	2011	Tahrik takımlarının boşa bekleme zamanını kontrol ederek bir enerji tüketimi azaltma yöntemi geliştirmiştir.
[17]	Chen v.d.	2011	Çin enerji sektöründeki düşük karbonlu üretim teknolojilerinin ayrıntılı bir senaryo analizi, kapsamlı bir güç karışımı planlama modeline dayanılarak gerçekleştirilmiştir.
[18]	Fang v.d	2011	Enerji tüketimi ve bununla ilişkili karbon ayak izinin yanı sıra çevrim zamanını dikkate alan atölye tipi çizelgeleme çalışmasını ortaya koymuştur.
[19]	Duflou v.d.	2012	Enerji ve kaynak verimliliğine sahip üretime yönelik metodoloji ve teknolojilerin kapsamlı bir değerlendirmesi verilmiştir.

3. TORNALAMA İŞLEMİ İÇİN KARBON SALINIMI MODELİ

Tezgah bazlı karbon salınımı modelleri genellikle her biri takım tezgahı, bağlantıları, kesici takımları, iş parçaları ve bunlar gibi bileşenlerden oluşan bir veya daha fazla unsuru içerir [1]. Bu tür sistemlerin karbon salınımları ise dolaylı olarak, tezgah işletim sistemlerinin çalışması sonucu ortaya çıkar. Bir takım tezgahı elektrikle çalışır. Tezgahın çalışması için gereken elektrik kullanımı karbon salınımı ortaya çıkarmasa dahi, elektrik santralinin ürettiği elektrik miktarını artırması nedeniyle karbon salınımına katkıda bulunur. Dolayısıyla tezgah daha az zorlanarak daha uygun kesme koşullarında çalışırsa, daha az elektrik tüketerek daha az karbon salınımı yapılmasına katkıda bulunur.

Endüstri sektörlerinin önemli bir parçası olan talaşlı imalat, küresel ekonomide oldukça önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, enerji yoğunluklu işlemlerin atmosferdeki CO₂ düzeyinin hızlı artışında payı büyüktür. Üretimde tüketilen enerji, geçtiğimiz 60 yılda neredeyse iki katına çıkmış olup, bu değer artmaya devam etmektedir. Özellikle çok büyük miktarlarda üretilen, yüksek güç ve uzun kullanım ömrüne sahip takım tezgahları, üretimdeki enerji

tüketiminin ana kaynağını oluşturmaktadır [20]. Dolayısıyla, takım tezgahlarının gerçekleştirdiği üretim süreçlerinde enerji tüketiminin azaltılması, çevreye duyarlı üretim açısından son derece önemli bir konu haline gelmiştir [1]. Çalışmamızda gerçekleştirilecek analizler için ülkemizde halihazırda özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde yaygın olarak kullanılan geleneksel torna tezgahı tercih edilmiştir. Yine en kötü kesme şartlarının değerlendirilebilmesi için kuru kesme koşulları ele alınmıştır.

3.1. Tornalama İşlemi İçin Karbon Salınımının Nicel Ölçümleri ve İlgili Formülasyonlar

Çalışma kapsamında yapılacak hesaplamalar için gerekli formülasyonlar literatürden derlenerek Türkiye koşullarına uygun bir şekilde yeniden düzenlenmiştir. Tornalama işleminde tezgah bazlı karbon emisyonlarını ifade eden CE_{ms} formülasyonu aşağıdaki eşitlikte de verildiği üzere; elektrik sistemi, kesme sıvısı sistemi, kesici takım, motor ve talaştan kaynaklanan karbon emisyonu alt bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. Çalışmada kuru kesme koşulları ele alındığı için kesme sıvısı sistemi formülasyonlarda dikkate alınmamıştır. Aşağıda her bir bileşenin hesaplanmasına ilişkin olarak detaylı formüller sunulmaktadır [1, 14]:

Tornalama İşleminde Karbon Salınımını Hesaplama Formülü:

$$CE_{ms} = CE_{elek} + CE_{takım} + CE_{motor} + CE_{talaş} \quad (1)$$

CE_{ms} : Tornalama İşleminde tezgah bazlı karbon salınımı ($kgCO_2$)

CE_{elek} Hesaplanması:

$$CE_{elek} = CEF_{elek} \times EC_{makine} \quad (2)$$

CE_{elek} : İşlemler için gerekli elektrik üretiminin yol açtığı karbon salınımı ($kgCO_2$)

CEF_{elek} : Elektrik karbon salınımı faktörü ($\frac{kgCO_2}{kWh}$)

$$EC_{makine} = [P_u \times (t_{boşta}) + P_i \times (t_c)] / 3600 \quad (3)$$

EC_{makine} : Tezgahın enerji tüketimi (kWh)

t_c : Kesme süresi (sn)

$t_{boşta}$: Atıl süre (sn)

P_u : Atıl güç (W)

P_i : Giriş gücü (W)

$CE_{takım}$ Hesaplanması:

$$CE_{takım} = \left(\frac{t_c}{T_{takım}} \right) \times CEF_{takım} \times W_{takım} \quad (4)$$

$CE_{takım}$: Kesici takımın yol açtığı karbon salınımı ($kgCO_2$)

$$CEF_{takım} = (CEF_{elek} \times K / 3,6) \times (1000 / W_{takım}) \quad (5)$$

$CEF_{takım}$: Kesici takımın karbon salınımı faktörü ($\frac{kgCO_2}{kg}$)

K : Kesici takım enerji tüketim sabiti

$W_{takım}$: Takımın kütlesi (g)

$T_{takım}$: Takımın kullanım ömrü (dk)

CE_{motor} Hesaplanması

$$CE_{motor} = CEF_m \times M_{talaş} \quad (6)$$

CE_{motor} : Hammadde üretiminin yol açtığı karbon salınımı ($kgCO_2$)

$$M_{talaş} = (v_c \times f \times a_p \times t_c \times \rho) / 10^6 \quad (7)$$

$M_{talaş}$: Talaş kütlesi (kg)

$$\rho = \text{Malzeme yoğunluğu} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

$$CEF_m : \text{Malzeme karbon salınımı faktörü} \left(\frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (8)$$

$CE_{talaş}$ Hesaplanması:

$$CE_{talaş} = CEF_{talaş} * M_{talaş} \quad (9)$$

$CE_{talaş}$: Talaş kaldırma işleminin yol açtığı karbon salınımı ($kgCO_2$)

$$CEF_{talaş}: \text{Talaşın karbon salınımı faktörü} \left(\frac{kgCO_2}{kg} \right)$$

Deneyde kullanılacak olan 60 mm çapında 160 mm uzunluğundaki alüminyum malzemeden yapılmış silindirik deney numunesine ilişkin olarak karbon salınımı hesaplamasında yukarıdaki formüllerde kullanılacak iş parçası/tornalama işlemi bağlantılı parametreler ise aşağıda sunulmuştur:

$$CEF_{talaş} = 0,256 \left(\frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$CEF_m = 16,13 \left(\frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$d_w = 60 \text{ (mm)}$$

$$L_w = 160 \text{ (mm)}$$

$$\rho = 2,73 \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$K: \text{Kesici takım başına enerji} = 5,3 \text{ MJ}$$

$$t_{boşta} = 60 \text{ (sn)}$$

$$W_{takım} = 15 \text{ (g)}$$

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'ndan alınan ve enerji üretiminde en önemli paya sahip olan doğalgaz, taş kömürü ve linyitin Ankara ili için kWh başına “kg CO_2 ” miktarlarını içeren CEF_{elek} değeri 0,4916 kg CO_2 /kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer kullanılarak yukarıda verilen formülasyonlarla birlikte Türkiye koşulları için karbon salınımı değerleri ve gerekli parametreler hesaplanmıştır. Tornalama işleminde farklı unsurların (alt sistemler) ortaya çıkardığı karbon salınımlarının ayrıntılı hesaplamaları Excel programında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ilgili parametre değerlerine göre karbon salınımı hesaplamaları otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

4. TAGUCHİ YÖNTEMİ UYGULAMASI

Taguchi yöntemi değişik faktörlerin değişik seviyeleri içerisinde en iyi kombinasyonu bulmak için oldukça faydalı bir yöntemdir. Her bir faktörün

değişik seviyelerini içeren tüm kombinasyonlar için çok fazla deney yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu [21] kullanılarak çok daha az sayıda deneyle sonuca ulaşmak mümkündür. Yöntemin gerek geniş kullanım alanına sahip olması, gerekse daha az deney yaparak hem zaman kazancı, hem de daha az maliyetle sonuçların elde edilmesine imkân sağlaması gibi avantajlar sunması, çalışma kapsamında Taguchi yönteminin kullanılmasında etkili olmuştur. Literatürde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan ve iyi bilinen Taguchi Yönteminin uygulama aşamalarının açıklamasına bu çalışmada yer verilmemiş olup, ilgilenen araştırmacılar yöntemin uygulanmasına ilişkin detaylı bilgilere [21-23] numaralı kaynaklardan ulaşabilirler.

Çalışmanın bu bölümünde, deneyde tornalama işlemine tabi tutulacak olan iş parçası alüminyum malzemeden yapılmış olan 60 mm çapında, 160 mm uzunluğunda silindirik bir iş parçasıdır. Deneyde 3 farklı kesici takım kullanılmıştır. 1 numaralı kesici takım tungsten carbide alaşımı (KNUX160405 R11H01), 2 numaralı kesici takım titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımı (KNUX160405 R11DP30), 3 numaralı kesici takım ise alaşım oranları 2 numaralı takımından farklı olan yine titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımıdır (KNUX160405 R117010). Kesme hızı, kesici takım tipi ve kesme derinliği olmak üzere tespit edilen kesme parametrelerinin 3'er seviyesi (Tablo 2) kullanılarak Taguchi'nin L9 tasarımı (Tablo 3) doğrultusunda bir deney tasarımı oluşturulmuş ve 3 tekrarlı deney sonuçları elde edilmiştir. Deneylerde yanıt olarak işlem tamamlanma süresi alınmıştır. Deneyde kullanılan geleneksel torna tezgahının resmi Şekil 4'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Kesme Hızı (Faktör A)	1,25m/sn	3,75m/sn	6,25m/sn
Kesici Takım (Faktör B)	1.tip	2.tip	3.tip
Kesme Derinliği (Faktör C)	1mm	1,5mm	2mm

Tablo 3. L9 ortogonal tasarım

Deney No	Faktör A	Faktör B	Faktör C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



Şekil 4. Torna tezgahı ve iş parçası

Deneyin başlangıç aşamasında, 3 kez tekrarlanacak deney seti için üç farklı gün ve günün farklı saatleri seçilmiştir. Her bir deney setinde gerçekleştirilecek deneyler için deney senaryolarının

sıralaması 1-9 arasında rassal sayı oluşturularak belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4'de koyu yazı karakteriyle belirtilen 1. Gün gerçekleştirilen ilk deney için karbon emisyonu hesaplama detayı aşağıda sunulmuştur:

Tablo 4. Deney sonuçları

Deney	Faktörler			Yanıt	
	Kesme Hızı (m/sn)	Kesici Takım Tipi	Kesme Derinliği (mm)	t _c (Ölçülen Süre,sn)	Karbon Salınımı (kg CO ₂)
1.gün	1,25	3	2	452	10,20
	1,25	1	1	456	5,20
	3,75	1	1,5	131	6,63
	6,25	1	2	92	10,31
	6,25	2	1	83	4,66
	1,25	2	1,5	455	7,73
	3,75	2	2	136	9,16
	3,75	3	1	125	4,22
	6,25	3	1,5	85	7,15
	1,25	3	2	455	10,27
2.gün	1,25	2	1,5	452	7,68
	1,25	1	1	450	5,13
	1,25	3	2	451	10,18
	3,75	2	2	128	6,52
	3,75	1	1,5	129	6,52
	3,75	3	1	128	4,32
	6,25	1	2	84	9,41
	6,25	3	1,5	85	7,15
	6,25	2	1	84	4,72
	3.gün	6,25	2	1	84
3,75		2	2	126	8,48
1,25		2	1,5	454	7,71
3,75		3	1	127	4,29
6,25		3	1,5	86	7,23
3,75		1	1,5	129	6,52
1,25		1	1	449	5,12
6,25		1	2	83	9,30

$$a) Eş. (3)'den; EC_{makine} = [(0,42 \times 60) + (1,091 \times 452)] / 3600 = 0,144 \text{ kWh} \quad (10)$$

$$Eş.(2)'den; CE_{elek} = 0,4916 \times 0,144 = 0,07 \text{ kgCO}_2 \quad (11)$$

$$b) Eş(5)'den; CEF_{takım} = 0,4916 \times (1,5/3,6) \times (1000/9,5) = 21,56 \text{ kgCO}_2/\text{kg} \quad (12)$$

$$Eş(4)'den; CE_{takım} = (452/100 \times 60) \times 21,56 \times (15/1000) = 0,0244 \text{ kgCO}_2 \quad (13)$$

$$c) Eş.(7)'den; M_{talaş} = (1,25 \times 0,2 \times 2 \times 452 \times 2,73) / 1000 = 0,617 \text{ kg} \quad (14)$$

$$Eş.(6)'dan; CE_{motor} = 16,13 \times 0,617 = 9,95 \text{ kgCO}_2 \quad (15)$$

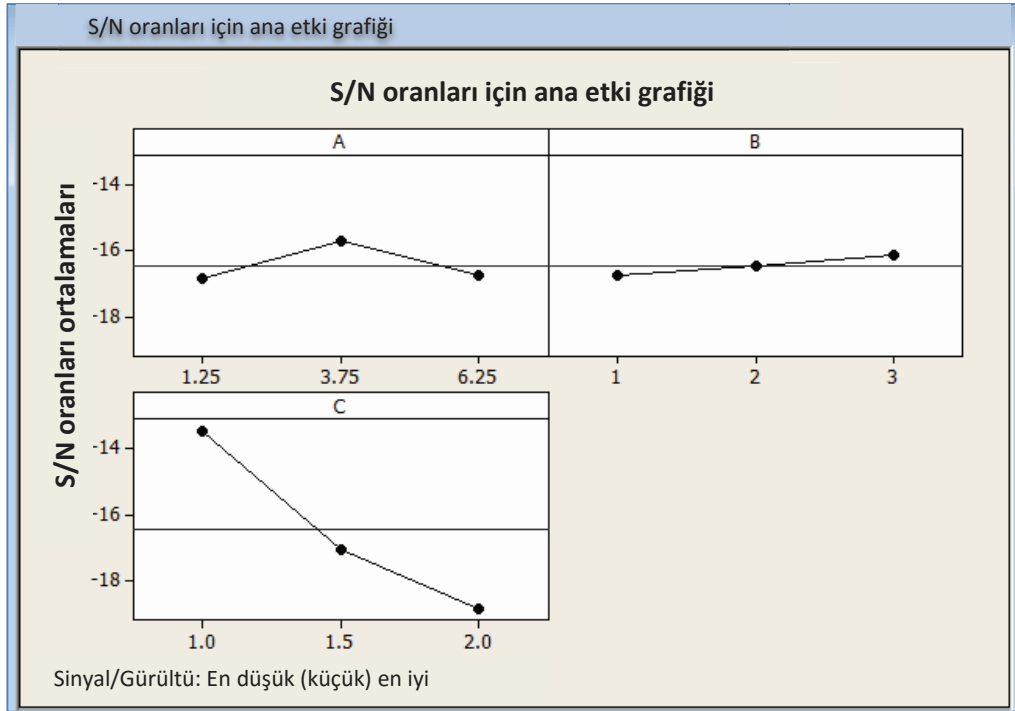
$$d) Eş.(9)'dan; CE_{talaş} = 0,256 \times 0,617 = 0,158 \text{ kgCO}_2 \quad (16)$$

Toplam karbon emisyonu ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$CE_{ms} = CE_{elek} + CE_{takım} + CE_{motor} + CE_{talaş} = 0,07 + 0,0244 + 9,95 + 0,158 = 10,20 \text{ kgCO}_2 \quad (17)$$

Yapılan deneylerde ölçülen süreler doğrultusunda yukarıdaki örnek hesaplamada olduğu gibi tüm süreler ve kesme parametreleri senaryoları için karbon emisyonu değerleri hesaplanmıştır. (Tablo 4, son sütun). Ardından elde edilen emisyon değerleri Taguchi yönteminde yanıt olarak

kullanılarak karbon emisyonu değerlerini en aza indirecek kesme parametreleri elde edilmiştir (Tablo 5). Bu sonuca göre en düşük karbon salınımı (emisyonu) için en iyi faktör seviyeleri A₂B₃C₁ olarak belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. S/N oranları için ana etkiler

Tablo 5. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	A	B	C
1	-16.88	-16.76	-13.43
2	-15.72	-16.46	-17.06
3	-16.76	-16.13	-18.86
Sıra	2	3	1

Taguchi yönteminde Sinyal/Gürültü oranı (S/N:Signal/Noise ratio) olarak bilinen ve deneyde elde edilen yanıtta beklentiye göre 3 farklı amaca (“en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi”) uygun fonksiyon bulunmaktadır. Karbon emisyonu “en küçük en iyi” tipte bir yanıt olduğu için Taguchi’nin tanımladığı “en küçük en iyi” tip S/N oranı kullanılmış ve 3 tekrar sonucu elde edilen CO₂ emisyon değerleri Eş.(18) kullanılarak deney sonuçları tek bir değere dönüştürülmüştür.

En düşük (küçük) en iyi için S/N oranı:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (18)$$

Eşitlikte y_i : Karbon emisyonu yanıtının i . gözlem değeri, n : bir denemedeki test sayısını ifade etmektedir.

S/N oranları baz alındığında %95 güven düzeyinde A, B ve C faktörlerinden sadece C faktörünün (Kesme Derinliği) sonuçlar üzerinde etkili

faktör olduğu ($p=0,010<0,05$) görülmektedir (Tablo 6-7). Ayrıca elde edilen model için elde edilen R² değerinin %96,1 olarak elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç modelin geçerli olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.S/N oranları için tahmini model katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	-16,4518	0,1626	-101,163	0,000
A 1,25	-0,4233	0,2300	-1,841	0,207
A 3,75	0,7321	0,2300	3,183	0,086
B 1	-0,3120	0,2300	-1,357	0,308
B 2	-0,0089	0,2300	-0,039	0,973
C 1,0	3,0181	0,2300	13,123	0,006
C 1,5	-0,6115	0,2300	-2,659	0,117

$$S = 0,4879 \quad R\text{-Sq} = 99,0\% \quad R\text{-Sq(ajd)} = 96,1\%$$

Tablo 7. S/N oranları için varyans analizi

Faktör	SD*	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	2,4315	2,4315	1,2157	5,11	0,164
B	2	0,6012	0,6012	0,3006	1,26	0,442
C	2	45,8238	45,8238	22,9119	96,26	0,010
Artık Hata	2	0,4760	0,4760	0,2380		
Toplam	8	49,3325				

*SD:Serbestlik Derecesi

5. SONUÇLAR

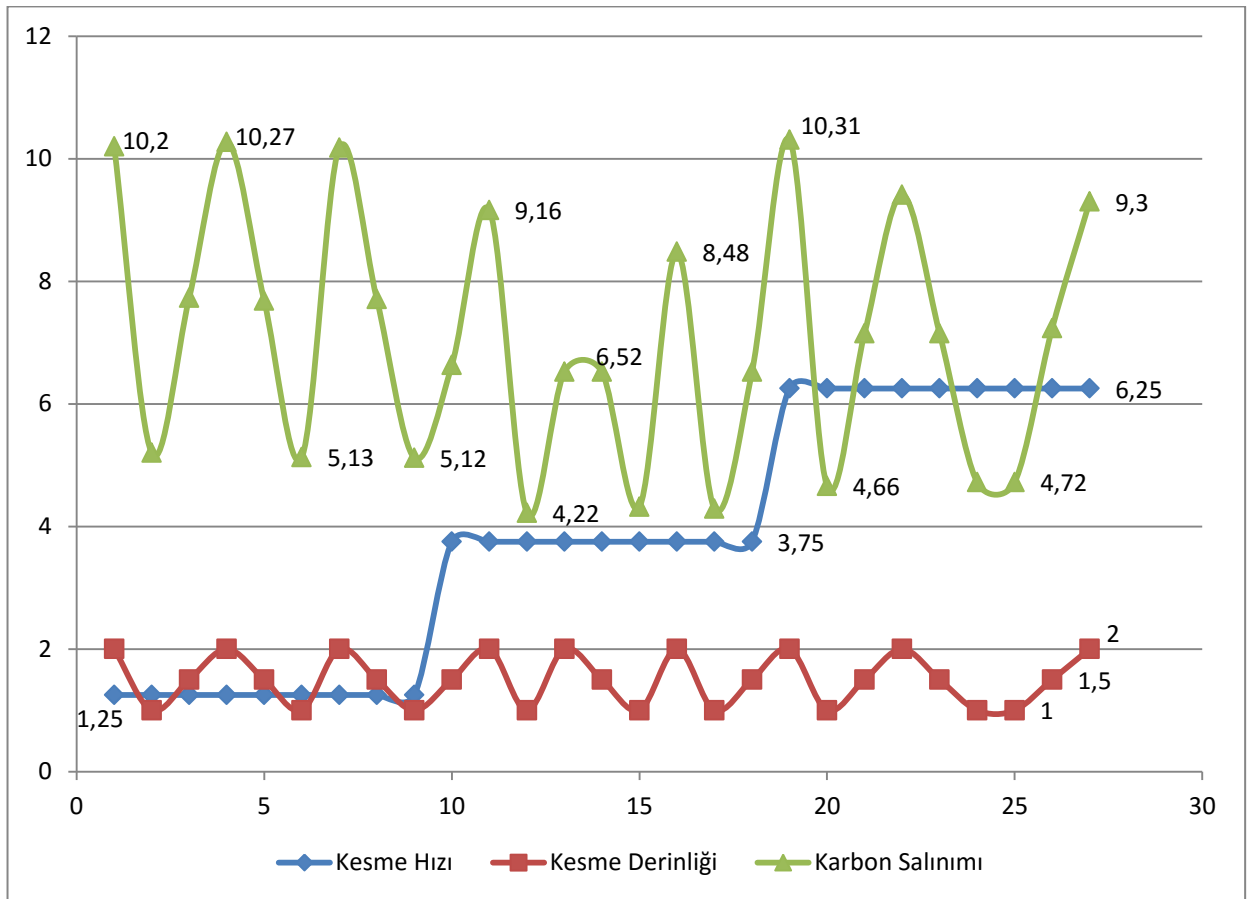
Bu çalışma kapsamında talaşlı imalatta CO₂ salınımının nasıl azaltılabileceği yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki talaşlı imalatla ilgili CO₂ salınımına ilişkin formülasyonlar ve hesaplama

yöntemleri derlenerek Türkiye şartlarına göre uyarlanmış (Türkiye Enerji Verimliliği değerleri kullanılarak) ve ilgili formülasyonlar yeniden düzenlenmiştir. Ardından Taguchi yöntemi kullanılarak tornalama işlemindeki temel kesme parametrelerinin karbon salınımını en küçükleyen en iyi değerleri elde edilmiştir. Bu sonuca göre 3,75 m/sn kesme hızında KNUX160405 R117010-titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımı kesici takım kullanılarak ve 1 mm'lik kesme derinliğinde en az karbon emisyonu değerinin elde edildiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara ilişkin olarak Kesme Hızı- Kesme Derinliği-Karbon Salınımı grafiği çizildiğinde kesme hızının her yüksek değerinde karbon salınımının düşmediği, kesme hızı için en iyi bir değer olması gerektiği gözlenmektedir. Kesme hızı arttığında kesici takımın ömrü olumsuz yönde

etkilenmektedir. Diğer bir deyişle, işleme verimliliğini sağlamak için kesme hızının artırılması, her zaman düşük karbon emisyonlarının elde edilmesini sağlamamaktadır. Hem kesici takım, hem işleme verimliliği ve hem de karbon emisyonunun en iyi değeri en iyi kesme hızıyla sağlanabilmektedir. Bu değerlendirme literatürdeki çalışmalarda da vurgulanmakta ancak bu çalışmalarda en iyi hız değerine ilişkin nicel bir değer verilmemektedir. Bu çalışmamızda literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem kesme hızı, hem de kesme derinliği değerine ilişkin nicel değerler de sunulabilmektedir.

Tornalama işlemi için daha sert kesici takım kullanılarak, daha düşük kesme derinliği değerinde ve orta değerlerdeki kesme hızında daha az karbon salınımı elde edilebildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar alüminyum malzeme için gerçekleştirilmiş olup, çelik, dökme demir, bronz, pirinç gibi farklı iş parçası malzemeleri için ve farklı kesici takımlarla ilerleyen dönemlerde benzer çalışmalar gerçekleştirilebilir.



Şekil 6. İş mili hızı artışı ile karbon salınımı değişimi

Semboller ve Kısaltmalar:

CE_{ms}	: Tornalama İşleminde tezgah bazlı karbon salınımı
CE_{elek}	: İşlemleri için gerekli elektrik üretiminin yol açtığı karbon salınımı
CEF_{elek}	: Elektrik karbon salınımı faktörü
EC_{makine}	: Tezgahın enerji tüketimi (kWh)
t_c	: Kesme süresi (sn)
$t_{boşta}$: Atıl süre (sn)
P_u	: Atıl güç (W)
P_i	: Giriş gücü (W)
$CE_{takım}$: Kesici takımın yol açtığı karbon salınımı
K	: Kesici takım enerji tüketim sabiti
$W_{takım}$: Takımın kütlesi (g)
$T_{takım}$: Takımın kullanım ömrü (dk)
CE_{motor}	: Hammadde üretiminin yol açtığı karbon salınımı
$M_{talaş}$: Talaş kütlesi (kg)
ρ	: Malzeme yoğunluğu ($\frac{g}{cm^3}$)
CEF_m	: Malzeme karbon salınım faktörü ($\frac{kgCO_2}{kg}$)
$CEF_{talaş}$: Talaşın karbon salınım faktörü
K	: Kesici takım başına enerji (MJ)
v_c	: Kesme hızı ($\frac{m}{sn}$)
f	: ilerleme hızı ($\frac{mm}{devir}$)
a_p	: Kesme derinliği (mm)
dk	: Dakika
sn	: Saniye
mm	: Milimetre
m	: Metre

DEVELOPMENT OF A MODEL TO MINIMIZE CARBON EMISSIONS OF TURNING PROCESS

Nowadays, much researcher has been focused on manufacturing processes that largely consume energy and emit carbon to the atmosphere. Low-carbon manufacturing, aiming to reduce carbon emission, is a hot topic in the literature. This paper presents an integrated model of quantifying carbon emissions of a conventional turning process. This paper investigates the breakdown of the turning machine tool sub-systems that contribute to the overall carbon emissions of a turning process, such as cutting tools, electricity, work-piece and cutting tool material specifications and chip disposal, etc. The model of quantifying the amount of carbon emissions from individual sub-systems is then developed. The proposed model is applied into a turning process case, in which the impact of different cutting factors on carbon emissions in the conventional turning machine tool is analyzed.

Keywords: Carbon emissions, machining, turning process, Taguchi Methods, energy consumption.

KAYNAKÇA

1. Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P., A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems, *Int. J. Of Advanced Manufacturing Tech.*, 26 (2015), 911–922.
2. Herrmann, C., Thiede, S., Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (2009) 4, 221–229.
3. Tian, G. D., Liu, Y. M., Ke, H., Chu, J. W., Energy evaluation method and its optimization models for process planning with stochastic characteristics: A case study in disassembly decision making, *Computers and Industrial Engineering*, 9(2012) 2, 107–112.
4. Rahimifard, S., Seow, Y., Childs, T., Minimizing embodied product energy to support energy efficient manufacturing, *Manufacturing Technology*, 59(2010) 1, 25–28.
5. Gutowski, T. G., The carbon and energy intensity of manufacturing, *Proceedings of the 40th CIRP international manufacturing systems*, 2007.
6. Neugebauer, R., Wertheim, R., Harzbecker, C., Energy and resources efficiency in the metal cutting industry, *Proceedings of the 8th global conference on sustainable manufacturing*, 36, 247–257, 2011.
7. Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use, *Proceedings of 18th CIRP international conference on lifecycle engineering*, 263–267, 2011.
8. Jia, S., Tang, R. Z., Lv, J., Therblig-based energy demand modeling methodology of machining process to support intelligent manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25 (2014) 5, 913-931.
9. Krishnan, N., Raoux, S., Dornfeld, D., Quantifying the environmental foot print of semiconductor equipment using the environmental value systems analysis (EnV-S), *IEEE transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17(2004) 4, 554–561.
10. Jeswiet, J., Kara, S., Carbon emissions and CES in manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57 (2008) 1, 17–20, 2008.

11. Tridech, S., Cheng, K., Low carbon manufacturing: Characterisation, theoretical models and implementation, *International Journal of Manufacturing Research*, 6 (2008) 2, 110–121.
12. Diaz, N., Choi, S., Helu, M., Chen, Y. F., Jayanathan, S., Yasui, Y., Kong, D., Pavanaskar, S., Dornfeld, D., Machine tool design and operation strategies for green manufacturing, *Proceedings of 4th CIRP international conference on high performance cutting*, 1–6, 2010.
13. Song, J. S., Lee, K. M., Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions, *Resources Conservation and Recycling*, 54 (2010) 9, 547–556.
14. Rajemi, M. F., Mativenga, P. T., Aramcharoen, A., Sustainable machining: Selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations, *Journal of Cleaner Production*, 18 (2010) 10–11, 1059–1065.
15. Le, T. P. N., Lee, T. R., Model selection with considering the CO₂ emission along the global supply chain, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24 (2013) 4, 653–672.
16. Halevi, Y., Carpanzano, E., Montalbano, G., Koren, Y., Minimum energy control of redundant actuation machine tools, *Manufacturing Technology*, 60 (2011) 1, 433–436.
17. Chen, Q. X., Kang, C. Q., Xia, Q., Guan, D. B., Preliminary exploration of China's power sector, *Energy*, 36 (2011) 3, 1500–1512.
18. Fang, K., Uhana, N., Zhao, F., Sutherland, J. W., A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, *Journal of Manufacturing Systems*, 30(2011) 4, 234–240.
19. Dufloy, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., et al., Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, *Manufacturing Technology*, 61(2012) 2, 587–609.
20. Canadell, J. G., Quèrè, C. L., & Raupach, M. R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R. A., Marland, G., Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(47), 18866–18870, 2007.
21. İç, Y.T., Yıldırım, S., Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte TAGUCHI Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Geliştirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(2012) 2, 447-458.
22. Tong, L.I., Chen, C.C., Wang, C.H., Optimization of multi-response processes using the VIKOR method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(2007), 1049–1057.
23. Lan, T-S., Taguchi optimization of multi objective CNC machining using TOPSIS, *Information Technology Journal*, 8(2009) 6, 917-922.

Gömülü Sistemlerin Uçuş Öncesi Testlerdeki Kazanımları

Barış SOYAL
Makine Müh.

TUSAŞ-Türk Havacılık ve
Uzay Sanayii A.Ş. Kazan/Ankara

Barış ÇETİN
Makine Müh.

FNSS Sav. Sis. AŞ
Gölbaşı / Ankara

Yüksek bir hızda büyümekte olan havacılık endüstrisinin ihtiyaçlarına binaen gömülü sistemlerin, özellikle uçuş öncesi yer testlerindeki kullanım alanları sürekli olarak artış göstermektedir. Gömülü sistemler, havacılık endüstrisindeki test ve doğrulama çalışmalarının çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Gömülü sistem uygulamaları, bu alanlarda çeşitli mühendislik ilerlemeleri sağlayabilmekte ve ayrıca önemli bir modernizasyon potansiyeli oluşturmaktadırlar. Hatta bazı özel durumlarda analog uçak sistemleri, dijital sistemler ile modernize edilebilmektedir. Bu, gömülü sistemler bazı modernizasyon çalışmaları da havacılık sanayisi için önemli artılar yaratmaktadır. Ayrıca bilişim teknolojisindeki yenilikler ve artan profesyonel teknisyen ihtiyacının, gömülü sistemlerin uçuş hattı test operasyonlarındaki kullanım alanlarını artırdığı gözlemlenmektedir.

Bu çalışmada, havacılık sektörünün yüksek büyüme hızının sonucu olarak, yakın gelecekte kümülatif olarak artacak olan pilot ve uzman teknisyen ihtiyacına istinaden ortaya çıkacak sıkıntılara karşı, gömülü sistemlerin çözüm bulabilme potansiyeli incelenmiştir. Ayrıca sektörün sürekli artan test & doğrulama talebine cevap olarak gömülü sistemlerin sağladığı avantajlar da açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gömülü sistemler, Uçuş öncesi yer testleri, Modernizasyon

1. GİRİŞ

Günümüzde gerek sivil havacılık alanında, gerekse askeri hava sistemleri endüstrisinde süreklilik arz eden bir büyüme yaşanmaktadır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Kurumunun (IATA) raporuna göre global havacılık endüstrisi 2004 yılında 369 Milyar \$ iken, son on yılda hacmini ikiye katlayarak 746 Milyar \$'a ulaşmıştır [1]. Ayrıca "Research & Markets" şirketinin "The Global Military Aircraft Market (2015-2025) Market Size and Drivers Market Profile" başlıklı raporuna göre 2015 yılında 61.2 Milyar Dolar olan savaş uçağı pazarı, yıllık % 3.64 büyüme ile 87.5 Milyar \$'a ulaşacaktır [2]. Aynı şekilde, "2015 Küresel Havacılık ve Uzay Endüstrisi ve Savunma Sanayi Görünümü" raporuna göre, endüstride yıllık %3'lük bir büyüme beklenmektedir [3].

Sivil havacılıkta sektörün toplam iş hacmindeki büyüme, askeri havacılıkta ise yeni geliştirilen hava savunma/taarruz sistemleri, yeni nesil savaş uçakları ve modernizasyon çalışmaları nedeniyle bu endüstri kolundaki firmalarda proje sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu artan proje sayısı, hem gerekli teknik donanımına sahip mühendis ve teknisyen

kadrolarının, hem de güçlü bir proje yönetimi altyapısının gerekliliğini zorunlu kılmaktadır.

Havacılık sanayi, kendine özgü şartları nedeniyle çok daha kapsamlı ve detaylı, uzun süreli, geniş bir deney ve test matrisini kapsayan zorlu bir doğrulama (verification) prosedürüne sahiptir. Çoğu zaman da bu amaca spesifik olarak düzenlenmiş kalite standartları, şartnameleri ve firma iç prosedür ve şartnameleri mevcuttur [4]. Sektördeki artan proje potansiyeli, konusunda uzman ciddi bir mühendis ve ara eleman gerekliliği yarattığı gibi; test & doğrulama işlemleri için daha hızlı, esnek ve gürbüz (robust) çözümlerin de geliştirilmesini tetiklemektedir. Bu anlamda gömülü (embedded) sistemlerin uçuş öncesi test & doğrulama etabında kullanılmasının kayda değer ölçüde bir pozitif katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

2. HAVACILIK SEKTÖRÜNDE ARTAN İŞGÜCÜ İHTİYACI

Boeing firması tarafından, 21 Temmuz 2015 tarihinde yayımlanan, "Tahmini Pilot ve Teknisyen Gereksinimi Raporuna" göre, 2015-2034 yılları arasında, küresel bazda 558.000 yeni ticari havayolu

pilotuna ve 609.000 yeni ticari havayolu bakım teknisyenine ihtiyaç duyulacaktır [5]. Boeing firması tarafından yayımlanan bu yıllık raporlar incelendiği zaman, öngörülen toplam personel hacminde, özellikle de öngörülen teknisyen sayısında bir artış eğilimi olduğu tespit edilmektedir. Örneğin 2015 yılına ait rapor, 2014 tahminine göre yüzde 5'lik kümülatif bir artışa işaret etmektedir [5]. Pilotlara olan talepte ise yaklaşık yüzde 4'lük bir artış söz konusudur. Genel bir bakış açısı ile her yıl yaklaşık 28.000 yeni pilot ve 30.000'den fazla yeni uzman teknisyene ihtiyaç duyulacağı hesaplanmaktadır.

Bununla birlikte, birçok ülkenin hava kuvvetlerinde yetişmiş personel sayısındaki yetersizliğin söz konusu olduğu bilinmektedir. Bu insan kaynağı sıkıntısını gidermek için çeşitli disiplinlerin bir araya getirilmesi sureti ile verim ve bilgi birikimi artırımı çalışmaları devam etmektedir. Bu kapsamda test & doğrulama ve bakım personeli alt başlığında şu tespit yapılabilir: Elbette bu geçiş sürecinde personel kendi uzman olduğu alanın dışındaki test ve bakımlarda bir yandan kendini geliştirirken, istenilen uzmanlık seviyesine ulaşması için belirli bir süre geçecektir. Bu sürecin doğal bir sonuca olarak da elde edilen test datalarının işlenerek raporlanması, test düzeneklerin donanımsal ve yazılımsal kurulumu, arızaların giderilmesi, vb. işlemler için gerekli zamansal öngörüler artabilecektir.

3. GÖMÜLÜ SİSTEM UYGULAMALARI

Günümüz teknolojisindeki gömülü sistemler özelindeki gelişmeler, uçuş öncesi test ve arıza tespiti çalışmalarındaki doğacak, bu türlü yetişmiş teknisyen ihtiyacı için bir çözüm oluşturma potansiyeli sağlamaktadır. Belirli bir görevi gerçekleştirmek için tasarlanmış, herhangi bir sistemin içinde gömülü olan ve sisteme akıllılık özelliği veren yazılım ve donanım kombinasyonları, gömülü sistemler olarak adlandırılmaktadır. Gömülü sistemler, mikro kontrolcü tabanlı olarak, hassas pozisyon kontrolü, kalite kontrol uygulamaları vb. gibi genel mühendislik alanlarında uzun yıllardır kullanılmaktadır [6-7]. Fakat gömülü sistemler savunma sanayinde de uçuş kontrolü, güdüm, şifreleme, görüntü işleme gibi daha spesifik ve teknoloji yoğun alanlarda kullanılmaktadır.

Gömülü sistemlerin, havacılık testlerindeki uygulamaları ise üç başlık altında incelenebilir. Birincisi, yeni nesil uçaklarda olduğu gibi sistemlerin yazılım içermesi ve arıza durumunda kokpite direkt arıza bilgilendirmesi yapması. İkincisi, eski uçakların mevcut analog cihazlarının, dijital cihazlar ile değiştirilmesi ile uçak üzerinde istenen sistemlerin dijitale çevrilmesidir. Bu şekilde

modernize edilmiş sistemler de kendi testlerini yapıp arıza bilgilendirmesi yapabilirler. Üçüncü ve son uygulama ise uçak üzerindeki analog sistemin dışarıdan bağlanan bir dijital yer destek test cihazı ile kontrol edilmesidir. Bu şekilde tek tuşla istenen testler yapılır ve sistem kontrol edilmiş olur. Sonuç olarak da var olan arızalar test ekipmanının ekranında görülür.

3.1 Yeni Nesil Uçaklar

Gömülü sistemlerin, havacılık testlerinde kullanımı ve uçağın uzaktan kumanda edilmesi, yeni nesil savaş uçaklarında kullanılan temel bir yaklaşımdır. Bu tarz çalışmaların ilk örnekleri uzun yıllar önce hayata geçirilmiştir. NASA'nın 1988 yılında yayımladığı "The use of an automated flight test management system in the development of a rapid prototyping flight research facility" başlıklı raporuna göre askeri jet uçaklarının akıllı sistemler ile test edilmesi ve uzaktan pilotsuz kontrolü deneysel amaçlı da olsa 1970'li yıllarda gerçekleştirilmiştir [8].

Günümüzde de yeni nesil uçaklarda bu gömülü sistemler son derece aktif olarak kullanılmaktadır. Amerikan GAO (Government Accountability Office) raporuna göre F-35 Lightning II veya Joint Strike Fighter uçağında 22,9 milyon satır yazılım kodu mevcuttur [9]. TAI firmasında tasarlanan özgün ürünler için de benzer gömülü sistemler sayesinde özel yazılım kodları oluşturularak son ürüne yüklenmektedir. Gömülü sistemli elektronik üniteler, uçağın kendi bünyesinde kullanıldığında birçok yer destek test ekipmanına olan gereklilik ortadan kalkmaktadır. Bir dizüstü bilgisayar ile bağlanıp birçok testin yapılabilmesi, bu yeni nesil gömülü sistem entegrasyon teknolojileri ile artık günümüzde mümkündür.

3.2 Modernizasyon

Yeni nesil uçaklarda kullanılan gömülü sistemler teknolojisinin çeşitli modernizasyon programları ile daha eski uçaklara da uygulanabiliyor olması önemli bir avantaj yaratmaktadır. Lockheed Martin ve Sikorsky gibi büyük havacılık firmaları bir yandan yeni nesil gömülü sistemli hava araçları üretmelerinin yanı sıra, çeşitli modernizasyon projeleri ile kullanımda olan çok sayıda hava aracına da bu akıllı sistemleri uyarlamaktadırlar.

U.S. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) raporuna göre Sikorsky firması ile faz 1 (8 Milyon \$) ve faz 2 (9,8 Milyon \$) olmak üzere 2 adet Aircrew Labor In-Cockpit Automation System (ALIAS) programı modernizasyon anlaşması imzalanmıştır [10]. Bu modernizasyon sayesinde daha az kabin ekibi ile operasyon

performansının artırılması planlanmaktadır. Örneğin uçağın uzaktan kumanda edilebilmesi ile pilot yükü azaltılabilmekte, görev performansı ve uçuş emniyeti artırılabilir.

Ayrıca, United Technologies'e bağlı Hamilton Sundstrand firmasının ürettiği DESSC (Digital Engine Start System Controller), gömülü sistemlerin, modernizasyon uygulamaları için güzel bir örnektir. ESSC motorun çalışması için birçok kontrol valfini, anahtarı, sensörü, pompayı ve bujiyi kontrol eden, işlem sırasına göre bahsi geçen ünitelerin çalışmasını sağlayan bir cihazdır. Eski ESSC'a, gömülü sistemin eklenmesiyle ortaya çıkan DESSC, sistemin çalışma silsilesi içinde arızanın nereden kaynaklandığını ve düzeltici işlemi rapor etmektedir. Ayrıca uzmanlık gerektiren, zaman alan ölçüm & testlere olan gerekliliği ortadan kaldırmaktadır. Bu özellik doğal olarak bu testler için gerekli yüksek nitelikli işgücü gerekliliğini de azaltmaktadır. DESSC'nin olmadığı durumlarda, birden fazla teknisyenin uzun ölçümler yapması, belki belirli parçaların sökülmesi ve bu işlemlerden sonra kontrol amaçlı "Follow On Maintenance" denilen söküm/takım sonrası kontrol testleri yapılması zorunludur. Bahsi geçen gömülü sistemleri kullanmak için uygulanan modernizasyonda, analog cihazın dijital çevrilmesi maliyetli bir süreçtir. Çünkü hem mevcut, faal, kullanılabilir analog cihaz boşa çıkmakta hem de yeni gömülü sistemli bir cihaz satın alınmaktadır.

3.3 Yer Destek Ekipmanı

Gömülü sistemli yer destek test ekipmanları ile sayısız uçak ve analog sistem testini gerçekleştirmek mümkündür. Diğer uygulamalarda gömülü sistem içeren bir LRU, bir uçakta kullanılabilir. Ayrıca bu türlü uygulamalar için uçak uçuştan kesilmez ve uçak üzerinde herhangi bir modifikasyon gerekmez. Örnek vermek gerekirse; dışarıdan bir gömülü sistemli test ekipmanı ile uçağa bağlanıp ESSC'nin emri ile çalışan tüm üniteleri test ekipmanı ile çalıştırarak kontrol etmek mümkündür. Bu şekilde uçağa dışarıdan bağlanarak, analog sistemi test eden çeşitli gömülü sistem içeren yer destek test ekipmanı mevcuttur. Bu tip test ekipmanları TAI'de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

4. GÖMÜLÜ SİSTEM TEST EKİPMANLARININ OLASI KAZANIMLARI

Mevcut durumda uçuş hatlarında yapılan testler, teknik emrin gerektirdiği kadar üretim bölümü teknisyeni ve bir kalite gözetmeni ile beraber yapılmaktadır. Adım adım uygulanan teknik emirler sonucu herhangi bir problem ile karşılaşılmadığı durumlarda testin başarı ile geçtiği

sonucuna varılmaktadır. Bütün sistem testlerinde izlenen prosedür aynıdır. Bu prosedürü "akıllı" hale getirmek için gömülü sistemler önemli bir avantaj sağlayabilmektedir. İçerisinde güç - sinyal jeneratörü ve gömülü sistem içeren test ekipmanları çeşitli adaptörler ile sisteme bağlanabilmekte bu sayede o sistemin tüm iletim ve fonksiyon testleri tasarlanarak, tüm işlemler daha kısa zamanda ve daha az personel ile yapılabilmektedir. Bununla birlikte; testi yapacak mevcut personelde yüksek bilgi birikimine olan ihtiyaç minimuma indirilebilmektedir. Elbette bu demek değildir ki; akıllı test ekipmanları ile uzman personel ihtiyacı ortadan kalkacaktır. Fakat yetersiz sayıda uzman personel olan durumlarda, yer ekiplerinin işi hem kolaylaşacak, hem de hızlanacaktır. Uygulamanın diğer kazanımları alt başlıklarda ele alınmıştır.

4.1 İnsan faktörünün ve uzman gereksiniminin azaltılması:

Yer destek cihazları ile yapılan testler, mikroişlemci ve yazılım ile insan faktörünü azaltarak kişi kaynaklı yanlış ölçüm ve arızaları ortadan kaldırabilmekte, arıza arama işlemlerinde ve ölçümlerde çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Test esnasında dikkat eksikliğinden veya hata ile yapılan adım atılmalarından kaynaklanabilecek olan yanlış ölçümler, gerçekte olmayan arızaların tespit edilmesine yol açabilir. Test & doğrulama ve bakım hizmetlerinde aslında var olmayan bir arızanın nedeninin aranması, giderilmeye çalışılması tahmin edilebileceği gibi ciddi zaman kayıplarına neden olmaktadır.

Ayrıca çoğu zaman birkaç yıl süren zorlu bir süreç olan uzman teknisyen yetiştirmenin ciddi bir maliyeti olduğu açıktır. Fakat gömülü sistemlerin kullanılması ile kısa bir eğitim gören personel bile test ekipmanını uçağa bağlayıp gerekli sistem testlerini yapabilecek yetkinliğe erişebilmektedir. Şu da unutulmamalıdır ki; arıza durumunda gömülü sistemin verdiği bilgileri yorumlamak için tabii ki yine ileri seviyede uzmanlık gerektirir. Fakat bu yorumun alınması için uzmanın uçak başında olmasına gerek yoktur. Gömülü sistemlerin test aşamasında kullanılması ile ileri seviyede uzmanlık sahibi bir uzman personel, birkaç farklı projeden elde edilmiş akıllı test ekipmanının çıktılarını yorumlayıp arızayı hiç uçak başına gelmeden çözebilmektedir. Bu durumda önemli ölçüde bir insan kaynağı optimizasyonu sağlanmış olmaktadır.

4.2 Hata riskinin düşürülmesi ve test hızının artırımı:

Arıza aranırken en çok yapılan hatalardan biri de yanlış soketlere (pin) girmektir. Teker teker konnektör üzerindeki girişleri saymak ve kontrol

etmek, hem zaman alıcı hem de yüksek dikkat gerektirir. Akıllı yer test cihazları ile ölçümlerin doğruluğu çok yüksektir ve saniyeler içinde komple bir konnektördeki tüm soketlerden data okuyarak gerekli ölçümler yapılabilmektedir.

4.3 Yazılıma Tanımlı İşlevsellik:

Gömülü sistemler sayesinde güncelleme ve prosedür değişikliklerine hızlı adaptasyon düşük maliyetle sağlanabilmektedir. Military Aerospace dergisinden, John Keller'in 2 Ağustos 2011 tarihinde yayımlanan makalesinde fonksiyonların yazılımla tanımlanmasının, test ekipmanını daha esnek ve konfigürasyon değişikliklerine daha kolay uyumlu hale getirdiği bilgisi mevcuttur [11]. Bu da farklı test rutinleri için ekstra test ekipman ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve maliyet kazancı sağlamaktadır. Bu şekildeki genel kapsamlı test cihazları bağlayıcı/adaptör değişiklikleri ile farklı uçaklarda kullanılabilir, test düzeneklerinde üretim esnekliği elde edilmektedir. Örneğin, BAE firması F-16 uçakları için ince ayar (bore sighting) test ekipmanı üretmektedir. Ancak aynı ekipman farklı kablolar ile F-15 uçaklarında da kullanılabilir. Bir başka deyişle; sabit test ekipmanında kullanılacak uçağa göre farklı konfigürasyon seçimi yapılabilmekte ve uygun bağlantılarla aynı cihaz farklı uçaklarda kullanılabilir.

4.4 Test raporlarının tarih, saat ve personel bazında hafızada saklanabilmesi ve veri tabanına gönderilebilmesi:

Sivil ve askeri havacılık sektöründeki test bölümleri, hastanelerdeki tahlil laboratuvarlarına veya röntgen bölümlerine benzerlik arz etmektedir. Nasal ki tedavi sonrası testin ne zaman, kim tarafından yapıldığı bilgileri ve test sonuçlarının saklanması ve takip edilmesi ile doktorun performansı ölçülebilmektedir, aynı şekilde örneğin yakıt atölyesinin performansı da bakımdan çıkan harici yakıt tanklarının uçuş hattında uçağa takılmadan test edilmesi ile ortaya çıkar. Bu tür kontroller, hem atölyenin bakım kalitesini arttırmakta hem de bir sorun varsa tespit edilip giderilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, kronolojik olarak arıza yapan ünitelerin kaydının tutulması, dönemsel olarak depoda tutulması gereken malzeme ve miktarlarının öngörülmesini sağlamakta, ambardaki minimum stok miktarının tespit edilmesi için de önemli bir girdi oluşturmaktadır.

4.5 Test raporlarının yazıcıdan çıktı alınıp saklanabilmesi:

Test raporlarının çıktı olarak alınıp saklanabilmesi, dokümantasyon ve sonuçların

taşınabilmesi açısından bazı durumlarda avantajlıdır. Sistem destek uzmanlarının sonuçları tartışması ve başka uçaklardaki sonuçlarla karşılaştırabilmeleri açısından test ekipmanını ya da bilgisayarı bir noktadan bir noktaya taşımaktansa, yazılı raporların taşınması doğal olarak daha kolaydır.

4.6 Test esnasında kalite personeline ihtiyaç duyulmaması ve aynı testlerin çok daha az personel ile yapılabilmesi:

Bir ölçüm testi için sistemin iki ucunda iki personel ve testi izlemesi / dökümanete etmesi için bir kalite personeli olmak üzere en az üç personel gereklidir. Fakat akıllı bir test ekipmanı ile sadece bir personel, ekipmanı uçağa bağlayabilmekte ve tek tuşla testi icra edebilmektedir. Cihaz yapılan testin tarih/data/sonuç bilgilerini kayıt altına almakta, istenildiği durumlarda gerekli çıktıları almaktadır. Bu avantajlar sayesinde testin icrası esnasında ekstra bir kalite kontrol personeline gerek duymaksızın, test sonuçları direkt olarak (dijital veya çıktı halinde) kalite onayına sunulur. Böylece testi izlemek için kalite personeline ve ölçüm için ikinci personele ihtiyaç kalmamaktadır.

4.7 Ergonomik avantaj:

Akıllı sistemler ve dokunmatik ekran ile yer destek test ekipmanlarının boyutu ve ağırlığı küçülmekte ve saklama kolaylığı elde edilmektedir. Ayrıca birçok farklı okuma için sayısız gösterge yerine tek bir ekrandan tüm testi ve sonuçlarını takip edebilme imkânı sağlanmaktadır.

5. SONUÇ

Gömülü sistemlerin, sivil ve askeri havacılık endüstrisinde kullanılmasının uçuş emniyetinin artırılması, görev performansının artırılması, insan hatası faktörünü azaltılması, gerekli dokümantasyon işlemleri için kolaylıklar sağlanması gibi birçok faydaları vardır. Uçuş öncesi testlerde gömülü sistemlerin kullanılması bu sistemleri içeren yer destek test ekipmanları ile mümkündür ve tahmin edileceği üzere en düşük maliyetli uygulama da budur. Bu uygulama ile aynı test cihazı ile sayısız uçakta test yapılabilmektedir. Fakat modernizasyon ile gömülü sistemli LRU kullanımında her uçak için ayrı ayrı dijital LRU gerekmektedir. Üzerinde bilimsel araştırmaların devam ettiği gömülü sistemler ve mikroişlemciler alanında elde edilecek iyileştirmelerin, havacılık sanayiinde yakın gelecekte daha büyük avantajlar sağlaması mümkündür. Ayrıca gömülü sistemler, askeri uygulamalar da çok özel bir yeri olan bilgi güvenliği için kriptoloji bazlı uygulamalara için de uygun bir altyapı sağlamaktadır.

THE ADVANTAGES OF EMBEDDED SYSTEMS IN TEST & VERIFICATION STUDIES OF AVIATION INDUSTRY

The use of embedded systems especially in flight line test operations has increased continuously by the needs of aviation industry which is growing at a very high rate. Embedded systems are used in test & verification operations at aviation industry. Applications of embedded systems provide various engineering improvements and create a powerful modernization potential. As a matter of fact, analog aircraft systems can be modernized into digital systems at special conditions. Embedded systems based modernization works create significant developments for aviation industry. Also, it is observed that increasing rate of need for the professional technicians and developments in information technologies accelerate the usage of embedded systems at flight line test operations.

In this study, embedded systems' solution potential has been analyzed as a response of the problems which will likely be caused by increasing need for pilot and professional technician at aviation industry in short term. The advantages of embedded systems have also been explained as an answer to the sector's increasing manpower and test necessity.

Keywords: Embedded systems, Flight line test operations, Modernization

KAYNAKÇA

1. <http://www.iata.org/whatwedo/Documents/economics/IATA-Economic-Performance-of-the-Industry-mid-year-2014-report.pdf>
2. <http://www.researchandmarkets.com/reports/3146857/the-global-military-aircraft-market-2015-2025>
3. Deloitte, "2015 Global Aerospace and Defense Industry Outlook", <http://www2.deloitte.com/tr/tr/pages/manufacturing/articles/2015-global-aerospace-defense-outlook.html>
4. AS 9100 Quality Systems Manual
5. <http://www.boeing.com/commercial/market/long-term-market/pilot-and-technician-outlook/>
6. Bader, M.F., "Position Control System of Hydraulic Cylinder Based on Microcontroller", Journal of Engineering and Development, Vol. 12, No. 3, 2008, 25-39
7. Henriksson, R., "Scheduling Garbage Collection in Embedded Systems", Dissertation, Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark, 1998
8. <http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88133mainH-1477.pdf>
9. GAO report number GAO-09-711T entitled 'Joint Strike Fighter: Strong Risk Management Essential as Program Enters Most Challenging Phase
10. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2015/08/aurora-aircraft-automation.html>
11. <http://www.militaryaerospace.com/articles/2011/08/trends-in-flight-line.html>