



# POLİTEKNİK DERGİSİ

## JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://www.politeknik.gazi.edu.tr/index.php/PLT/index>

## AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin taguchi ve anova ile araştırılması

### *Investgation of effects of the aging methods applied on AA2024 aluminum alloys on machinability with taguchi ond anova*

Yazar(lar) (Author(s)): Necati YALÇIN, Yunus KAYIR, Sibel ERKAL

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Yalçın N., Kayır Y. ve Erkal S., "AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin taguchi ve anova ile araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 20(4): 743-751, (2017).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.368552

# AA2024 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Yaşlandırma Yöntemlerinin İşlenebilirliğe Etkisinin Taguchi ve Anova ile Araştırılması

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Necati YALÇIN<sup>1</sup>, Yunus KAYIR<sup>2\*</sup>, Sibel ERKAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü

(Geliş/Received : 12.06.2017 ; Kabul/Accepted : 26.07.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Deneylerde malzeme olarak, havacılık ve otomotiv sanayisinde kullanımı yaygın olan AA2024 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. AA2024 malzemesine uygulanan yaşlandırma ısıl işlemlerinin talaş kaldırarak şekillendirilmesine etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan T3 ve T6 yaşlandırılmış deney numuneleri farklı kesme parametreleri (V: 150 m/dak, 200 m/dak, 250 m/dak; f: 0.1 mm/diş, 0.2 mm/diş, 0.4 mm/diş) ile frezelenmiştir. Deneyler, Taguchi L18 karma modeli kullanılarak CNC Freze tezgâhında yapılmıştır. Kesme kuvvetleri (Fx, Fy, Fz) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüştür. Elde edilen deney sonuçları için Taguchi ve ANOVA analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne en etkili faktörlerin, ilerleme ve kesme hızı olduğunu göstermiştir. Yaşlandırma etkisinin ise çok az olduğu görülmüştür. T3 yaşlandırmanın kesme kuvvetleri açısından, T6 yaşlandırmanın ise yüzey pürüzlülüğü açısından, daha uygun olduğu belirlenmiştir. **Anahtar Kelimeler:** AA2024, ısıl işlem, yaşlandırma, işlenebilirlik, Taguchi, ANOVA.

# Investigation of Effects of The Aging Methods Applied on Aa2024 Aluminum Alloys on Machinability With Taguchi and Anova

## ABSTRACT

In this study, machinability tests were executed. AA2024 aluminum alloy that are used in field of automotive and aero industries widely was preferred material in the experimental works. Effects of aging methods that were applied to AA2024 aluminum alloy on machinability were investigated. Test specimens obtained from T3 and T6 that are used methods for aging of AA20024 aluminum alloy, were machined with various cutting parameters (V: 150 m/min, 200 m/min, 250 m/min; F: 0.1 mm/tooth, 0.2 mm/tooth, 0.4 mm/tooth). The test specimens were machined on a CNC milling machine by using the L18 mixed model of Taguchi. Cutting forces (Fx, Fy, Fz) and surface roughness (Ra) were measured. Analysis of Taguchi and ANOVA were done for the results of test. The results showed that main effect factors of the cutting forces and surface roughness were federate and cutting speed. In addition, it was seen that the aging types caused a little effect on the cutting forces and surface roughness. It was determined that the T3 for cutting forces and T6 for surface roughness were very well.

**Keywords :** AA2024, heat treatment, aging, machinability, Taguchi, ANOVA.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik alanında çelik ve dökme demirden sonra en fazla kullanılan malzemelerden biri de alüminyumdur. Özellikle de Al-Cu alaşımları, düşük yoğunluğu (2,7 gr/cm<sup>3</sup>), sebebiyle diğer Al alaşımlarına göre yüksek dayanımı (18-26 kg/mm<sup>2</sup>) ve ısıl işlem uygulanabilirliği nedeni ile uçak ve otomotiv sanayisinde kullanımı sürekli artan bir malzemedir [1-3].

Genelde metal malzemeler, doğadan elde edildiği gibi pek kullanılmaz. Saf alüminyum malzemesin de olduğu gibi düşük mekanik özelliklere (sertlik, kopma, aşınma, vb.) sahiptirler [4]. Malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için değişik yöntemler uygulanmaktadır.

Alaşımlama ve ısıl işlem, uygulanan yöntemlerden bazılarıdır. AA2024, normal alüminyum malzemesinin alaşım elementlerinin ilave edilmiş halidir.

Isıl işlem genelde, malzemelerin belirli sıcaklıklarda ve belirli sürelerde ısıtılması ve soğutulması şeklinde yapılmaktadır. Bu yöntemle, yumuşak olan bir alaşım malzeme, ısıtılıp hızlı bir şekilde soğutulduğunda sertleşebilmektedir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemleri (T3, T4, T5, T6, vb.), yaşlandırma ısıl işlemleri olarak da adlandırılmaktadır [4-6]. Yaşlandırma işlemi, uygulanış şekline göre doğal yaşlandırma ve suni yaşlandırma olarak ikiye ayrılmaktadır. Yaşlandırma işlemi tümüyle laboratuvar şartlarında gerçekleştirilirse (süreç daha hızlı gerçekleşmektedir) bu yöntem suni yaşlandırma, doğal şartlarda (oda sıcaklığında) yapılıyorsa doğal yaşlandırma adını almaktadır. Piyasada hazır

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta: ykayir@gazi.edu.tr

olarak satılan AA2024 alaşımları, genelde T3 doğal yaşlandırma ısıl işlemlerine tabi tutulmaktadır.

Malzemelerin değişen mekanik özelliklerinin olumlu yanları dışında olumsuz yanları da bulunmaktadır. Özellikle de, malzemenin şekillendirilmesinde (talaşlı imalat, kesme, bükme, vb.) mekanik özellikler doğrudan etkili olmaktadır [7-9]. Talaş kaldırılarak (tornalama, frezeleme, delik delme, vb.) malzemelerin şekillendirilmesi, imalat sanayisinde önemli bir paya sahiptir [10]. Malzemelerin işlenebilirliği, kesici takım, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından önemi büyüktür. Yapılan çalışmalarda malzemeler, işlenebilirliği kolay ve işlenebilirliği zor olanlar diye ikiye ayrılmıştır [11]. İşlenebilirliğinin kolay ve zor oluşu, malzemenin mekanik özelliklerine (akma, kopma, sertlik, vb.) ve kullanılan kesme parametrelerine doğrudan bağlıdır. Mekanik özellikleri (örneğin, sertlik) yüksek olan malzemelerin işlenebilirliği zor olurken, mekanik özellikleri düşük olan malzemelerin işlenebilirliği ise daha kolay olabilmektedir. Mekanik özellikleri yüksek olan malzemelerin işlenmesinde, daha yüksek kesme kuvvetleri ve buna bağlı

Bu çalışmada, T3 doğal yaşlandırılmış ve T6 suni yaşlandırılmış AA2024 alaşımına yönelik CNC freze tezgahında işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Deneylerde, kaplamalı karbür kesici uçlar, farklı kesme parametreleri ile kullanılmıştır. Deneylerde, yaşlandırma ısıl işlem tipinin işlenebilirliği etkisi araştırılmıştır. İşlenebilirlik sırasında kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Taguchi ve ANOVA analizleri ile değerlendirilmeye çalışılmıştır.

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

### 2.1. Malzeme (Material)

Deneylerde, haddelenmiş AA2024 alüminyum alaşımının T3 ve T6 yaşlandırılmış iki türü kullanılmıştır. Öncelikle, haddelenmiş ve T3 doğal yaşlandırılmış AA2024 alüminyum alaşımı, 350x220x50 mm boyutlarında piyasadan hazır olarak temin edilmiştir (T3'ün kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir). Piyasadan temin edilen AA2024 malzemesinin T3 doğal yaşlandırma şartları

**Çizelge 1.** AA2024-T3 Kimyasal bileşimi (Chemical composition of AA2024-T3 alloy)

Element	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Al
%Ağırlık	4.3	1.5	0.48	0.23	0.08	0.05	Kalanı

**Çizelge 2.** Numuneler için ısıl işlem şartları (Heat treatment conditions of the specimens)

Malzeme	Çözeltiye alma sıcaklığı (°C)	Çözeltiye alma süresi (saat)	Soğutma ortamı	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi
AA2024-T6	505	3	Su	190	8.5 saat
AA2024-T3	505	3	Su	Oda sıcaklığı	1 Ay

**Çizelge 3.** Numunelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of the specimens)

Yaşlandırma	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama %	Sertlik HV
T3	455.54	369.31	24.2	158
T6	403.78	263.21	25.9	132

olarak yüksek sıcaklıklar da ortaya çıkabilmektedir [12]. Mekanik özellikleri düşük olan malzemelerinin işlenmesi, kesme kuvvetleri ve kesici açısından problemsiz gibi görünse de bazı malzemelerde, kesici üzerinde talaş yapışmaları (BUE), yüzeyin kötüleşmesi (pürüzlülüğü) gibi olumsuzlukları da beraberinde getirebilmektedir. Özellikle alüminyum alaşımlarının kuru kesme şartlarında işlenmesinde, BUE oluşumlarına bağlı işlenen yüzeyin kötüleşmesi, kesme kuvvetlerinin artması gibi olumsuzluklar çok fazla görülmektedir [13]. Malzemelerin mekanik özellikleri dışında, uygun seçilmeyen kesme parametreleri de (kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, vb.), kesme kuvvetlerinin artmasına, düşük takım ömrü, kötü yüzey pürüzlülüğü, gibi olumsuzluklara da sebep olabilmektedir [14-15].

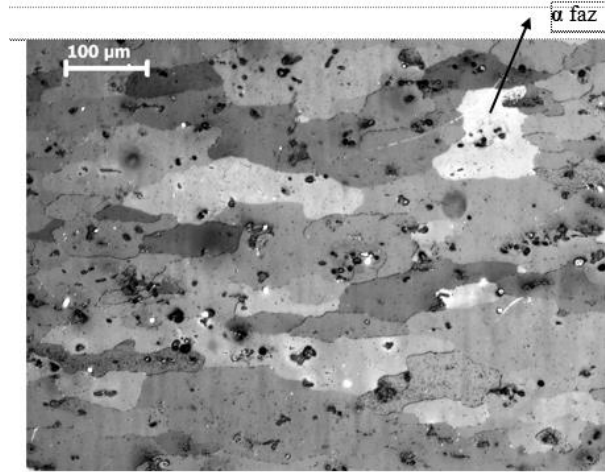
(firma tarafından verilen malzeme sertifikasyonundan alınmıştır) Çizelge 2'de verilmiştir.

Piyasadan hazır alınan AA2024 malzemelerinin bir kısmına (numunelerin yaklaşık yarısı) laboratuvar şartlarında T6 suni yaşlandırma yapılmıştır. (T6 yaşlandırma şartları Çizelge 2'de verilmiştir). Geri kalan numunelere ise (Piyasadan hazır alınan T3 numuneleri) hiçbir işleme tabii tutulmamıştır.

Elde edilen numuneler üzerinde sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde Vickers yöntemi kullanılmıştır. Çekme testleri için, TS 138 EN 10002-1 standardına uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Suni yaşlandırılmış T6 numuneleri ile doğal yaşlandırılmış T3 numunelerinden elde edilen çekme, akma dayanımı ve % uzama değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. T6 suni yaşlandırma sonucu malzemenin

sertliği, çekme ve akma dayanımı gibi mekanik özellikleri düşmüştür.

Yapılan mikro yapı incelemelerinde (Şekil 1’de T3 için mikro yapı görüntüsü verilmiştir), T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde malzeme yapısında bulunan Cu atomlarının dağınık (homojen olmayan) ve daha iri taneli  $CuAl_2$  çökeltileri meydana getirmiştir. AA2024’ün  $\alpha$  fazı içerisinde çökelen  $CuAl_2$  bileşiğinin, malzemenin sertlik, akma ve çekme dayanımını düşürdüğü, küçük boyutlu ve homojen dağılımlı  $CuAl_2$  bileşiklerin ise malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı, bilinmektedir [4-7].



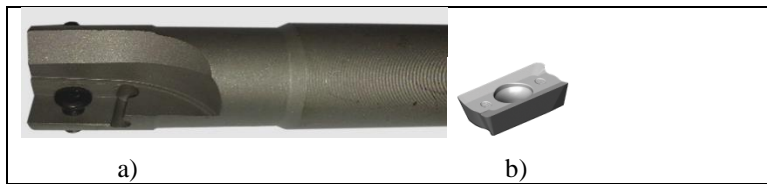
Şekil 1. A224-T3 numunenin mikro yapısı (View of microstructure of the A224-T3)

## 2.2. İşlenebilirlik (Machinability)

İşlenebilirlik deneyleri, CNC freze tezgâhında Çizelge 4’te verilen kesme parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin işlenmesinde kaplamalı ( $Al_2O_3$ ) karbür uçlar ve uçlara uygun bir takım tutucu kullanılmıştır (Şekil 2). Deneyler için  $20 \times 50 \times 50$  mm ebatlarında numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3). Her bir numunenin üzerinde elde edilen iki adet yüzeyi üzerinde, iki farklı deneyin yapılabilmesi sağlanmıştır. Deneylerde

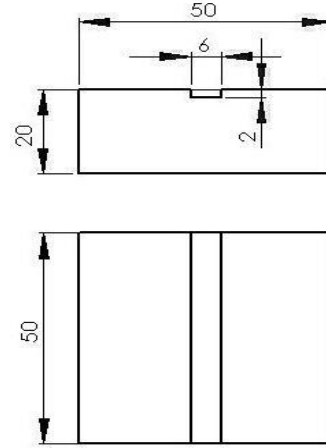
Çizelge 4. Kesme şartları ve kesici (Cutting condition and tools in the experimental works)

Deney Şartları				Kesici takım		
Kesme Hızı (V:m/dak)	İlerleme (F:mm/diş)	Talaş derinliği (ap:mm)	Kesme Şartı	Ağız sayısı	Uç tipi	Ø (mm)
150	0.1	1	Kuru kesme	2	$Al_2O_3$ Kaplmalı Karbür	25
200	0.2					
250	0.3					

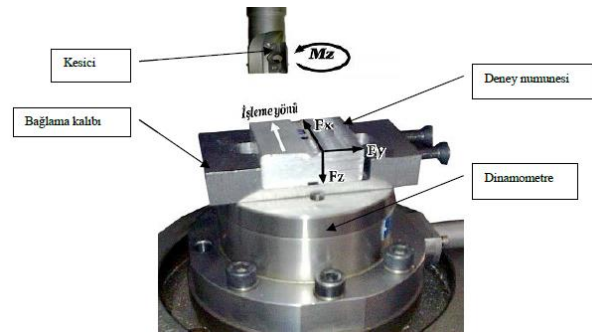


Şekil 2. Kesici takım: a) Takım tutucu, b) Kesici uç (a)Tool holder, b) Cutting tool)

kesme kuvvetleri ( $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$ ) ve yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) ölçülmüştür. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde standart bir dinamometre (Kistler 9272) kullanılmıştır (Şekil 4’te kullanılan deney seti üzerinde işleme yönüne göre kesme kuvvetleri verilmiştir).



Şekil 3. Deney numunesi ölçüleri (Machining the test specimen dimensions)



## 2.3. Taguchi Metodu ve ANOVA Analizi (Taguchi and ANOVA Method)

İşlenebilirlik alanında yapılan çalışmalarda, kullanılan kesme parametrelerinin (ilerleme, kesme hızı, kesme

derinliği, vb.), elde edilen sonuçlara olan etkisinin belirlenmesi ve optimize edilmesi edilmesinde değişik

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

**Çizelge 6.** Taguchi L18 için deney sonuçları (Experimental results for L18 model of Taguchi)

Deney No	Malzeme	Kesme Hızı V(m/min)	İlerleme F(mm/dış)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Ra (µm)
1	T3	150	0.1	61	36	28	0.82
2	T3	150	0.2	99	45	38	1.25
3	T3	150	0.3	124	57	49	1.95
4	T3	200	0.1	50	32	24	0.52
5	T3	200	0.2	88	43	34	0.66
6	T3	200	0.3	122	53	48	1.45
7	T3	250	0.1	44	14	23	0.41
8	T3	250	0.2	76	40	26	0.52
9	T3	250	0.3	118	44	46	0.81
10	T6	150	0.1	63	42	30	0.87
11	T6	150	0.2	107	58	45	0.79
12	T6	150	0.3	164	86	76	1.10
13	T6	200	0.1	51	29	21	0.51
14	T6	200	0.2	95	44	41	0.66
15	T6	200	0.3	132	58	47	1.45
16	T6	250	0.1	48	28	20	0.50
17	T6	250	0.2	87	42	31	0.83
18	T6	250	0.3	115	47	38	0.97

istatistiki analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları ise Taguchi ve ANOVA analizleridir [16-20]. Taguchi, deneysel çalışmalarda, oldukça kolaylık sağlamaktadır. Kullanılacak olan parametreler ile deneylerin planlanması, elde edilen deney sonuçlarına deney parametrelerinin etki düzeylerinin tespiti ve optimum deney parametrelerinin belirlenmesi Taguchi metodu ile yapılabilmektedir. ANOVA (Analysis of Variance), girdiler ile çıktılar arasında olası ilişkilerin ve ilişki şiddetinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Özellikle deneysel çalışmalarda, kullanılan deney parametreleri ile elde edilen deney sonuçları arasında bir ilişkinin olup olmadığının belirlenmesi, deney sonuçlarının yorumlanmasında oldukça önemlidir. Bu çalışmada, T3 ve T6 yaşlandırılmış AA2024 alaşımının farklı kesme parametreleri (Çizelge 4) ile frezelenmesinde Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Deneyler, Taguchi L18 karma (mixed) modeli ile planlanmıştır. L18 karma deney tasarımı, 3 faktör (faktörler için M, V ve F sembolleri tercih edilmiştir) ve seviyelerden (1,2 ve 3) oluşmaktadır. İki değeri (seviye 1 ve 2) olan bir adet (M) faktör (2<sup>1</sup>) ve üç değeri (seviye 1, 2 ve 3) olan iki adet (V ve F) faktörlerinden (2\*2<sup>3</sup>) oluşmaktadır (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** Taguchi L18 karma modeli ( L18 mixed model of Taguchi)

Faktör	Sembol	Birim	Seviye		
			1	2	3
Malzeme	M		T3	T6	-
Kesme Hızı	V	m/dak	150	200	250
İlerleme	F	mm/dış	0.1	0.2	0.3

Kesme kuvvetlerin ve yüzey pürüzlülüklerinin minimum düzeyde olması imalat için önemi büyüktür. Normal şartlarda, kullanılan deney parametrelerinin kesme kuvvetleri ve elde edilen yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde ise çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Burada, Taguchi yöntemi tercih edilerek deney sayısı azaltılmıştır. Taguchi L18 karma modeline göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 6’da verilmiştir

Elde edilen deney sonuçlarının Taguchi ile değerlendirilmesinde belli başlı teknikler bulunmaktadır. Bu tekniklerden biri olan “Smaller is better” (en küçük daha iyidir) bu çalışma için tercih edilmiştir. Çünkü talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetlerinin düşük, yüzey pürüzlülüğünün küçük elde edilmesi, yapılan işlenebilirlik çalışmalarında olduğu gibi bu çalışma için de önemli bir kriter olarak belirlenmiştir. Taguchi metodunda “Smaller is better” için aşağıda verilen Eş. 1 kullanılmaktadır [16-20].

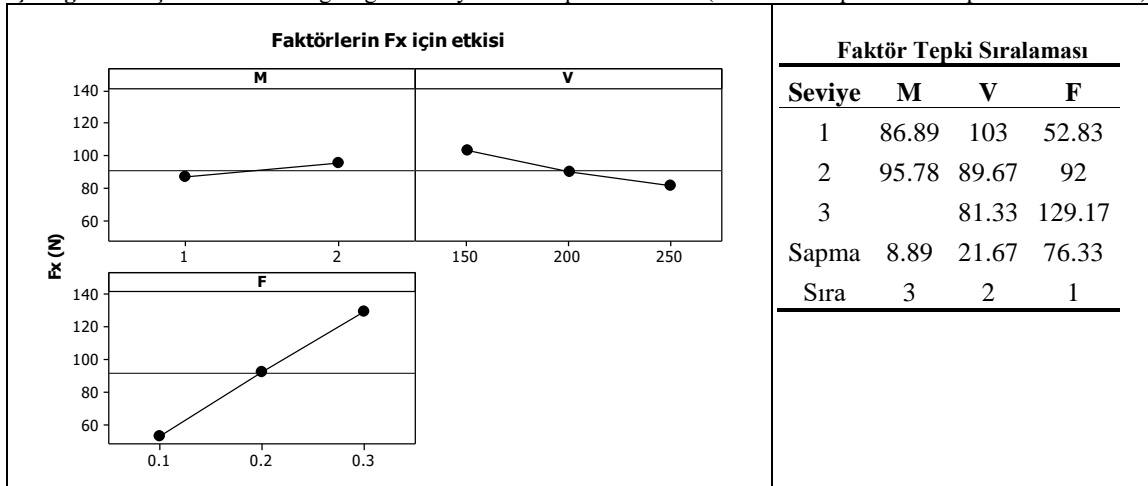
$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{R_{ij}^2} \right) \quad (1)$$

Deneylerde ölçülen, Fx, Fy ve Fz kuvvetlerine yönelik elde edilen Taguchi analiz sonuçları Çizelge 7-9 arasında verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi analiz sonuçları ise Çizelge 10’ da verilmiştir. Verilen Çizelgelarda: faktörün etki grafikleri (Main Effects plot) ve bu faktöre ait tepki sıralaması (Response Table) birlikte verilmiştir.

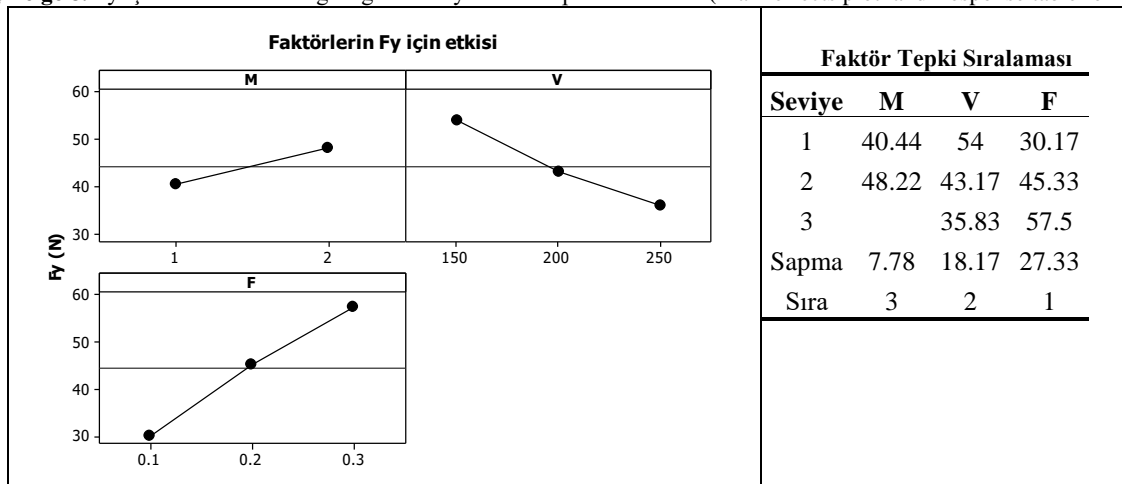
Çizelge 7-9 arasında verilen grafiklerde (Main Effects graph), Fx, Fy ve Fz kesme kuvvetlerinin minimum oluşmasında en etkili faktörlerin sırası ile F (ilerleme), V (kesme hızı) ve M (yaşlandırma tipi) olduğu

görülmektedir. Bu durum, Çizelgelarda verilen önem sırası (1-2-3): F-V-M şeklinde olduğu kesin olarak “Faktörlerin Tepki Sıralaması” (Response Table) ortaya çıkmaktadır.

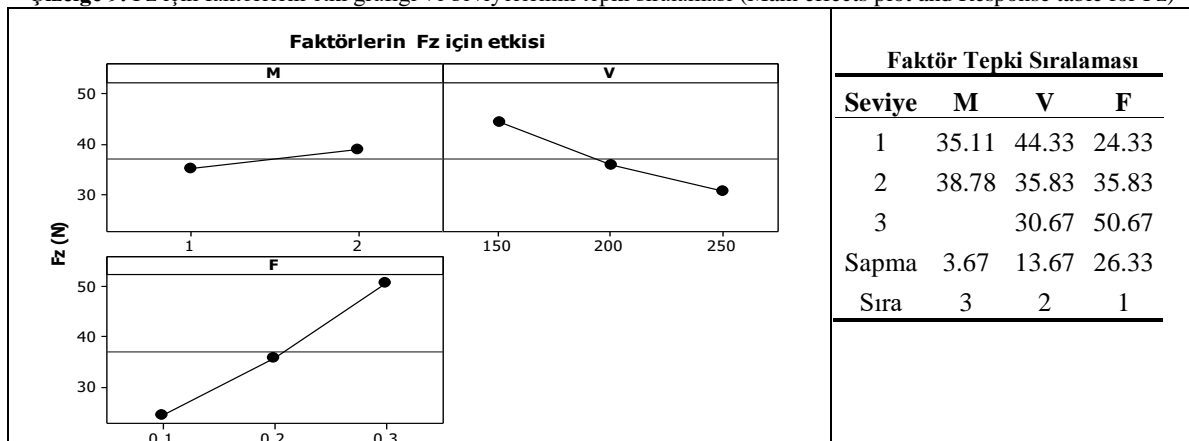
Çizelge 7. Fx için faktörün etki grafiği ve seviyelerinin tepki sıralaması (Main effects plot and Response table for Fx)



Çizelge 8. Fy için faktörlerin etki grafiği ve seviyelerinin tepki sıralaması (Main effects plot and Response table for Fy)



Çizelge 9. Fz için faktörlerin etki grafiği ve seviyelerinin tepki sıralaması (Main effects plot and Response table for Fz)



değerleri ile de kesinleşmektedir. “Sıra” (Rank) için verilen değerler bu sıralamayı ortaya koymaktadır. Diğer bir deyişle “Sıra” değerleri faktörlerin önem sıralamasını belirtmektedir. Değerler, 1’den başlayarak 2,3,..n şeklinde devam etmektedir. Taguchi analizinde, sıralama değerleri, faktör seviyeleri arasındaki en büyük “Sapma” (Delta) değerleri ile belirlenmektedir. Sonuç olarak, Fx, Fy ve Fz kesme kuvvetleri için kullanılan faktörlerin,

Deneylerde kesme kuvvetlerinin en düşük kalmasında kullanılan 3 faktöre (F, V, M) ait her bir seviyenin (Level) etkisi de yine verilen grafiklerden belirlenebilmektedir. Çizelge 7-9 arasında verilen grafiklerden en düşük kesme kuvveti değerleri: F faktörü için 1. Seviye (0.1 mm/diş), V için 3. Seviye (250 m/dak) ve M faktörü için 1. Seviye (T3) olmaktadır. Dolayısı ile kesme kuvvetlerinin (Fx, Fy, Fz) düşürülmesi için,

öncelikle ilerlemenin azaltılması (F1), kesme hızının artırılması (V3) ve yaşlandırma olarak da T3'ün (M1) kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

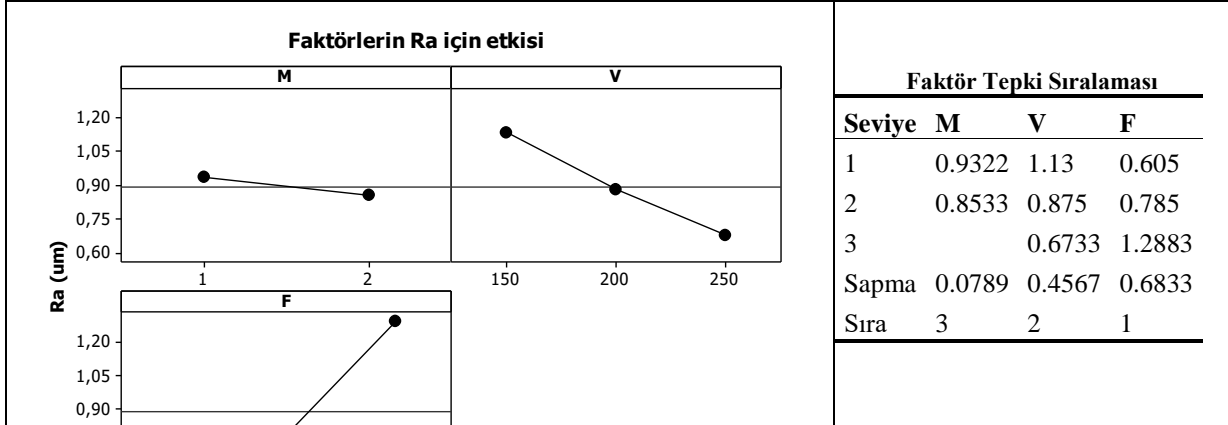
Yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerine yönelik yapılan Taguchi analizi sonuçlarında ise, en etkili faktörlerin sırası ile F, V ve M olduğu Çizelge 10'da verilen grafikte görülmektedir. Faktörlerin önem sıralaması için "Faktör Tepki sıralaması" değerleri incelendiğinde "Sıra" için: 3-2-1 (soldan sağa) rakamları görülmektedir. Bu sıralama, yüzey pürüzlülüğünün minimum düzeyde kalabilmesinde faktörlerin önem sıralamasını göstermektedir. 1: F faktörü, 2: V faktörü ve 3: M faktörünü ifade etmektedir.

Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi Ra değerlerinin de en düşük kalmasında kullanılan 3 faktöre (F, V, M) ait her bir seviyenin etkisi de yine verilen grafiklerden belirlenebilmektedir. Çizelge 10'da verilen grafikte en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri: F faktörü için 1. Seviye (0.1 mm/diş), V faktörü için 3. Seviye (250 m/dak) ve M faktörü için 2. Seviye (T6) olmaktadır. Dolayısı ile Ra düşürülmesi için, öncelikle ilerlemenin düşürülmesi (F1), kesme hızının artırılması (V3) ve yaşlandırma olarak da T6'ün (M2) kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Taguchi analizleri sonucunda: kesme kuvvetlerini minimum yapan en etkili faktörler ve seviyelerinin: F1, V3 ve M1 olduğu, yüzey pürüzlülüğünde ise: F1, V3 ve M2 olduğu kesinleşmiştir. Fakat bu bilgi tek başına yeterli değildir. Buna ilaveten her bir Faktörün kendi başına veya birlikte deney sonuçlarına olan katkılarının (%) bilinmesi de gerekmektedir. Bu nedenle de, faktörlerin kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne % olarak katkıları için ANOVA analizleri yapılmıştır. Kesme kuvvetlerine faktör katkıları, Çizelge 11- 13 arasında ve yüzey pürüzlülüğüne olan katkısı ise Çizelge 14'te verilmiştir.

Elde edilen Çizelgeler incelendiğinde, Fx kuvvetine yönelik olarak ilerlemenin katkısı %87.54 çıkarken kesme hızının katkısı %7,18 düzeyinde kalmıştır (Çizelge 11). Fy kuvvetine ilerlemenin katkısı %55.87 ve kesme hızının katkısı %24.88 olduğu belirlenmiştir (Çizelge 12). Fz kuvvetinde ise, ilerleme katkısı %64.25, kesme hızının katkısı da %17.56 olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 13). Kesme kuvvetlerine yaşlandırma yönteminin (T3 ve T6) katkısına bakıldığında ise, Fy kuvvetine yaşlandırmanın katkısı %6.76 olurken Fx ve

Çizelge 10. Ra için faktörlerin etki grafiği ve seviyelerinin tepki sıralaması (Main effects plot and Response table for Ra)



Çizelge 11. Fx için ANOVA sonuçları (Analysis of Variance for Fx)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı (%)
M	1	355.6	355.6	355.6	4.02	0.115	1.78
V	2	1433.3	1433.3	716.7	8.1	0.039	7.18
F	2	17484.3	17484.3	8742.2	98.81	0	87.54
M*V	2	139.1	139.1	69.6	0.79	0.515	0.70
V*F	4	72.3	72.3	18.1	0.2	0.923	0.36
M*F	2	133.4	133.4	66.7	0.75	0.527	0.67
Hata	4	353.9	353.9	88.5			1.77
Toplam	17	19972					100.00

$$S = 9.40597 \quad R\text{-Sq} = 98.23\% \quad R\text{-Sq(Adj)} = 92.47\%$$

Fz kuvvetlerine olan katkısı yaklaşık aynı olup %1.80 düzeylerinde kalmıştır.

Genel olarak, Taguchi ve ANOVA analizlerinden anlaşıldığı gibi kesme kuvvetlerinin düşürülmesi ve yüzey pürüzlülüğünün iyileştirmesi için kesme hızının

**Çizelge 12.** Fy için ANOVA sonuçları (Analysis of Variance for Fy)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı (%)
M	1	272.22	272.22	272.22	7.14	0.056	6.76
V	2	1002.33	1002.33	501.17	13.14	0.017	24.88
F	2	2250.33	2250.33	1125.17	29.5	0.004	55.87
M*V	2	173.44	173.44	86.72	2.27	0.219	4.31
V*F	4	130.33	130.33	32.58	0.85	0.559	3.24
M*F	2	46.78	46.78	23.39	0.61	0.586	1.16
Hata	4	152.56	152.56	38.14			3.79
Toplam	17	4028					100.00

S = 6.17567 R-Sq = 96.21% R-Sq(adj) = 83.90%

**Çizelge 13.** Fz için ANOVA sonuçları (Analysis of Variance for Fz)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı (%)
M	1	60.5	60.5	60.5	1.28	0.322	1.86
V	2	571.44	571.44	285.72	6.03	0.062	17.56
F	2	2091.44	2091.44	1045.72	22.05	0.007	64.25
M*V	2	163	163	81.5	1.72	0.289	5.01
V*F	4	122.56	122.56	30.64	0.65	0.659	3.77
M*F	2	56.33	56.33	28.17	0.59	0.594	1.73
Error	4	189.67	189.67	47.42			5.83
Total	17	3254.94					100.00

S = 6.88598 R-Sq = 94.17% R-Sq(adj) = 75.24%

Çizelge 14'te verilen Ra için ise: F faktörünün katkısı: %52.59, V faktörünün katkısı: %21.96 ve M faktörünün katkısı ise %0.98 olduğu ortaya çıkmıştır. Ra için yaşlandırmanın katkısı çok düşük olurken, yaşlandırma ve kesme hızının birlikte (M\*V) katkısı: %10'a çıkmaktadır. Bu durum, yüzey pürüzlülüğü için, malzemenin kesme hızı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

arttırılması ve ilerlemenin düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Uygulanan T6 ısıl işlemi ile malzeme sertliğinin düşmesine karşılık, talaş kaldırma (frezeleme) sırasında kesme kuvvetlerinde T3'e nazaran küçük artışlar meydana gelmiştir. Kesme kuvvetlerindeki artış, takım yüzeyinde oluşan talaş yapışmasından (BUE) kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü kullanılan kesici takıma yönelik yapılan incelemelerde (SEM), BUE

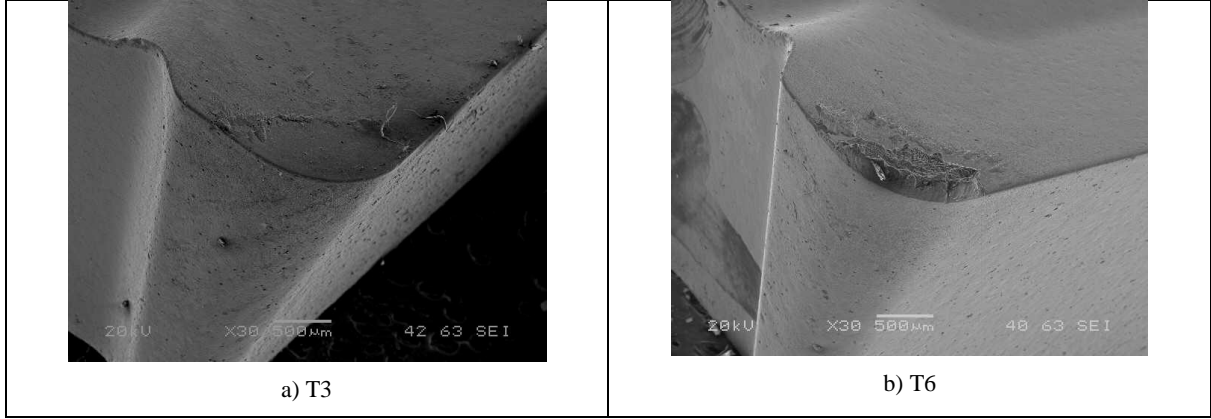
**Çizelge 14.** Ra için ANOVA sonuçları (Analysis of Variance for Ra)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı (%)
M	1	0.02801	0.02801	0.02801	0.71	0.448	0.98
V	2	0.62848	0.62848	0.31424	7.93	0.041	21.96
F	2	1.50538	1.50538	0.75269	19	0.009	52.59
M*V	2	0.28888	0.28888	0.14444	3.65	0.125	10.09
V*F	4	0.19546	0.19546	0.04886	1.23	0.422	6.83
M*F	2	0.05791	0.05791	0.02896	0.73	0.536	2.02
Error	4	0.15846	0.15846	0.03961			5.54
Total	17	2.86256					100.00

S = 0.199032 R-Sq = 94.46% R-Sq(adj) = 76.47%



talaşlarına rastlamıştır (Şekil 5). Kesici takım yüzeyinde meydana gelen talaş yapışması artan sertlikle (T3) azalmaktadır (Şekil 5.a). Bu azalma kesme kuvvetlerinde düşüşü beraberinde getirmiştir. T3 ve T6 numunelerin frezeleme işleminde artan kesme hızlarıyla kesme kuvvetlerinde meydana gelen azalmada sıcaklığın etkin bir rol oynadığı düşünülmektedir. Çünkü artan kesme hızıyla birlikte artan sıcaklığın malzemenin talaş kaldırılan bölgesindeki akma dayanımını düşürdüğü ve böylece kesme kuvvetlerini azalttığı, artan ilerleme ile artan talaş kesitinin de kesme kuvvetlerini artırdığı bilinmektedir [8-10].



Şekil 5. 200 m/dak ve 0.2 mm/dev ile kullanılan kesicinin SEM görüntüleri a) T3 ve b) T6 (SEM images of cutter used for milling at 200 m/min and 0.2 mm/rev: a) T3 ve b) T6)

Düşük kesme hızlarında ve özellikle de T6 yaşlandırılmış AA2024 malzemesinin işlenmesinde kesici uçta BUE meydana geldiği görülmüştür. Düşük kesme hızlarında meydana gelen BUE'nin yüzey kalitesinin kötüleşmesine neden olduğu bilinmektedir [10]. İşlenebilirlik sırasında meydana gelen BUE, kesici kenar gibi davranarak yüzeyden düzensiz talaş kaldırılmasına sebep olmakta ve yüzey pürüzlülüğünü artmaktadır [13]. T3 ve T6 aşlandırılmış AA2024 numunelerinin işlenmesinde ölçülen Ra değerleri birbirine çok yakındır (Çizelge 4). Bununla birlikte Taguchi ve ANOVA analiz sonuçlarında, T6'nın en düşük yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesinde daha uygun olduğu belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

AA2024 alüminyum alaşımının T3 ve T6 yaşlandırma ısıl işlemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimin işlenebilirlik üzerindeki etkisinin belirlenmesine yönelik elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

AA2024 malzemesinin işlenebilirliğine etkisinin diğer faktörlere göre oldukça düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Yaşlandırmanın katkısı, kesme kuvvetlerine yaklaşık %1.78 - 7 arasında ve yüzey pürüzlülüğüne ise yaklaşık %1 olmuştur. Bununla birlikte, T3 yaşlandırılmış malzemenin T6'ya oranla daha rahat işlenebildiği, kesici takım üzerinde talaş yapışmalarının (BUE) meydana gelmediği görülmüştür. Yapılan analizlerde, en düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesinde T3 (M1) doğal yaşlandırmanın, yüzey pürüzlülüğü açısından ise T6

(M2)'nin daha uygun olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapılan deneylerin genelinde ölçülen kesme kuvvetleri, artan ilerleme ile artmış, kesme hızının artması ile de azalmıştır.

Kesme kuvvetlerini en çok etkileyen faktörlerin: ilerleme (yaklaşık katkı: %55-88) ve kesme hızı (yaklaşık katkı: %7-25) olduğu belirlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin azaltılmasında faktörlerin en etkili seviyeleri ise: 0.1 mm/dev ilerleme (F1) ve 250 m/min kesme hızı (V3) olduğu tespit edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü açısından elde edilen sonuçlara bakıldığında, en etkili faktörler sırası ile ilerleme (yaklaşık katkı: %53) ve kesme hızı (yaklaşık katkı: %22) olmuştur. Yüzey pürüzlülüğünün düşürülmesinde faktörlerin en etkili seviyeleri ise, kesme kuvvetlerinde olduğu gibi ilerleme 1 (F1) ve kesme hızı 3 (V3) olmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sanchez M., Sanchez-Sola J.M., Gonzalez J.M., Contreras J.P. and Macros M., "Cutting forces compatibility based on plastic model: Application to the oblique cutting of the AA2024", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 559-565, (2002).
2. List G., Nouari M., Gehin D., Gomez S., Manaud J.P., Girot F., "Wear behavior of cemented carbide tools in dry machining aluminum alloy", *Journal of Wear*, 259: 1177-1189, (2005).
3. Rubio EM., Camacho AM., Sanches-Sola J.M. and Marcos M., "Chip arrangement in the dry cutting of aluminum alloys", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16: 164-170 (2006).
4. Doğan M., "Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemi", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1989).
5. Kaya I., "Al7075 alaşımının şekillenme ve ısıl işleme özelliklerinin iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2005).
6. Meyveci A., "Yaşlandırılmış 2XXX ve 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarının

- incelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi**, Karabük, (2007).
7. Özgürler M., Sönmez N., “Alüminyum alaşımlarının talaşlı işlenebilirliği”, **Mühendis ve Makine**, İstanbul, 30: 12-45, (1989).
  8. Aydın B., “AA2014 Alaşımında yaşlandırma ısı işlemleri ile değiştirilen işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2002).
  9. Özçatalbaş Y. ve Aydın B., “Mekanik özellik ve kesme geometrisinin AA2014 Alaşımının işlenebilirlik özelliklerine etkileri”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.** 21: 21-27, (2006).
  10. Kurt M., Kaynak Y. ve Bağcı E., “Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy”, **International journal of Advance Manufacturing Technology**, 37: 1051-1060, (2008).
  11. Shokroni A., Dhokia V. and Newman S.T., “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 57: 83-101, (2012).
  12. Suna S., Brand M. and Dargusch M.S., “Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials-A review”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 50: 663-680, (2010).
  13. Carrilero M.S., Bienvenido R., Sanchez M., Alveraz A., and Macros M., “A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning process of AA2024 AL-Cu alloy”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 42: 215-220, (2002).
  14. Puertas, I. and Luis Perez, C.J., “Surface roughness prediction by factorial desing of experiments in turning processes”, **Journal of Materials Processing Technology** 143: 390-396, (2003).
  15. Nouari M., List G., Girot F. and Gehin D., “Effect of machining and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminum alloys”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 45: 14436-1442, (2005).
  16. Nian C.Y., Yang W.H., Tang Y.S., “Optimization of turning operations with multiple performance characteristics”, **Journal of Materials processing Technology**, 95: 90-96, (1999).
  17. Davim J. Paule, “Study of drilling metal-matrix compsites based on the Taguchi techincues”, **Journal of Materials processing Technology**, 132: 250-254, 2003.
  18. Savaşkan M., Taptık Y. ve Ürgen M., “Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarının performans optimizasyonu”, **İ.T.Ü. Dergisi**, 3: 117-128, (2004).
  19. Manna A. and Salodkar S., “Optimization of machining conditions for effective turning of E0300 alloy steel”, **Journal of Materials processing Technology**, 203: 147-153, (2008).
  20. Gologlu C. and Sakarya N., “The effect of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method”, **Journal of .material processing Technology**, 206: 7-15, (2008).