

Ti-6Al-4V SÜPER ALAŞIMININ YÜKSEK BASINÇLI SOĞUTMA KULLANILARAK FREZELENMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

İ. Burcu TOPRAK*, M. Fatih ÇAĞLAR, Oğuz ÇOLAK, Kadir KIRAN,
Mustafa BAYHAN

ÖZET

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V süper alaşımının yüksek basınçlı soğutma kullanılarak frezelenmesi esnasında, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış ve optimum frezeleme şartları tespit edilmiştir. Kesme hızı, ilerleme oranı, soğutma sıvısı basınç değeri dört farklı seviyede tanımlanmış ve Taguchi L16 ortogonal dizisi ile deney tasarımı yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri için varyans analizi (ANOVA) yapılarak deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca Taguchi optimizasyon yöntemi ile sinyal/gürültü (S/G) oranı esas alınarak minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme şartları belirlenmiştir. Son olarak optimum deney şartlarında doğrulama deneyi yapılarak optimizasyonun başarıyla uygulandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, yüksek basınçlı soğutma, ANOVA, Taguchi yöntemi, yüzey pürüzlülüğü.

OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS BY USING TAGUCHI METHOD IN MILLING OF TI-6AL-4V SUPER-ALLOY AT HIGH-PRESSURE COOLING CONDITIONS

ABSTRACT

In this study, effects of cutting parameters on surface roughness during the milling of the super alloy, Ti-6Al-4V, using highly-pressurized cooling have been investigated and the optimum processing conditions have been detected. Cutting speed, feeding rate, cooling fluid pressure value have been expressed at four different levels and the experimental design has been achieved by Taguchi L16 orthogonal sequence. At the end of the experiments, variance analysis (ANOVA) was performed for the surface roughness values obtained based on the cutting parameters and the effect of experimental parameters on surface roughness has been investigated. Moreover, optimum cutting conditions have been defined for minimum surface roughness, depending on signal/noise (S/N) ration, using the Taguchi optimization method. Finally, it was detected that the optimization was applied successfully, by performing verification experiment under optimum experimental conditions.

Keywords: Milling, highly-pressurized cooling, Variance Analysis (ANOVA), the method of Taguchi, surface roughness.

* Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Kontrol ve Otomasyon Teknolojisi Programı, Antalya. Eposta: ibmutlu@akdeniz.edu.tr

1. Giriş

Frezeleme, endüstride yaygın olarak kullanılan önemli bir talaş kaldırma işlemidir. Talaş kaldırmada ana hedef, az maliyetle, iyi kalitede yüksek üretim miktarını maksimum takım ömrü ile elde etmektir. Yüzey pürüzlülüğü, imalat verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerdendir (Özçelik vd., 2011). Kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği, soğutma sıvısı, iş parçasının özellikleri, kesici takımın özellikleri yüzey pürüzlülüğünü belirleyen değişkenlerdir (Routara vd., 2009). Bu değişkenlerin her birinin tek tek yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri bilinmekte ancak birbirleri ile kombinasyonu sonucunda ortaya hangi neticelerin çıkacağı tahmin edilememektedir. Genellikle bu parametreler işleme esnasında katalog verilerine ya da operatörün deneyimine göre seçilmektedir (Sakarya vd., 2006). En uygun kombinasyonun bulunması ve kesme parametreleri arasındaki etkileşimin tespit edilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Endüstriyel şartlar göz önüne alındığında deneyleri ekonomik ve zaman kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak verimli şekilde gerçekleştirebilmek, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirmek için deney tasarım yöntemlerinin uygulanması son derece verimli bir yaklaşımdır (Meral vd., 2011a).

Taguchi Yöntemi literatürde bilim insanları tarafından en çok kullanılan deney tasarım yöntemlerinden biridir (Gökçe vd., 2009). Farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasında optimum kombinasyonu bulmak için yararlıdır. Bu metot en iyi sonuçları minimum sayıda deney ile elde etmek için istatistiki olarak tasarlanmış ortogonal dizinleri kullanır. Bu sayede deney sayısını azaltarak zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı Taguchi yöntemi birçok çalışmada kullanılmıştır (Zhang vd., 2007; Hasçalık vd., 2008; Yang vd., 2009; Ding vd., 2010; Fratila vd., 2011).

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, takım- iş parçası arasında oluşan yüksek sıcaklıkları azaltmak, titanyumun kesici takıma yapışmasını engellemek için kesme sıvısı kullanımı önerilmektedir (Çakır, 2003; Çaydaş, 2008). Ayrıca yapılan çalışmalarda, kesme sıvısı basıncının artırılmasıyla malzemenin işlenebilirliğinde iyileşmeler görüldüğü, yüzey pürüzlülüğünün ve takım aşınmasının azaldığı belirtilmiştir (Güngör, 2011; Courbon vd., 2009).

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V süper alaşımının yüksek basınçlı soğutma ile aynı yönlü frezelenmesi esnasında, yüzey pürüzlülüğü minimize edilmeye çalışılmış ve optimum kesme şartlarını belirlemek için Taguchi yönteminden yararlanılmıştır. Kesme parametrelerinin faktör ve seviyelerine uygun L16 ortogonal dizi seçilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi ve Taguchi sonuçları yorumlanmıştır. Bulunan optimum parametrelere göre doğrulama deneyi yapılmış, sonucun analiz ile tutarlı olduğu görülmüştür.

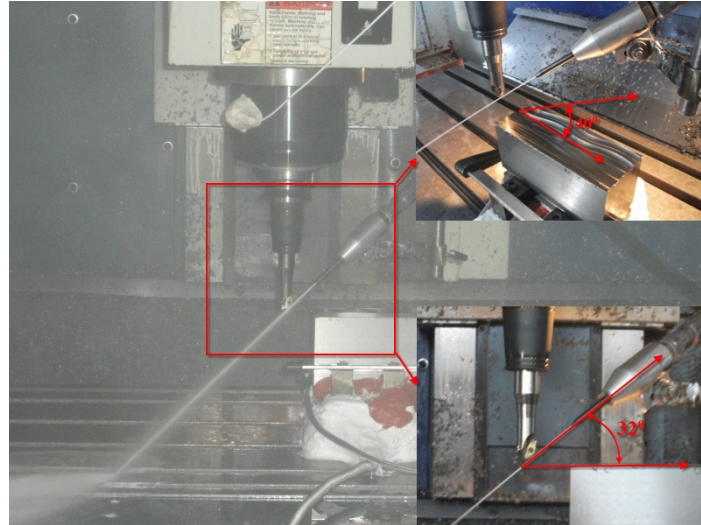
2. Materyal ve Metot

Frezeleme deneylerinde kullanılan 100x130x50 mm boyutlarındaki Ti-6Al-4V' nin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Alaşım Tipi	Kimyasal Bileşim							Mekanik değerler		
	N	C	H	Fe	O	Al	V	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
Ti-6Al-4V	0.05	0.08	0.015	0.40	0.20	5.50	3.50	900-1100	830	10

Deneyler sırasında kesici takım olarak SecoF40M ((Ti, Al) N-TiN) kaplamalı 218.20-0.80ER-ME04 uç (her deneyde değiştirilmiştir) ve bu uca uygun Seco R218.20-2016.0-14.070 kopya frezeleme takımı kullanılmıştır. Kopyalama freze takımı, takım tutucuya Seco Easy Shrink 15 makinası ile bağlanmıştır. Deneyler, Hartford VMC 1020 CNC tezgâh ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan nozzle sistemi ile yüksek basınçlı kesme sıvısı takım-talaş ara yüzüne gelecek şekilde uygulanmıştır (Şekil 1). Deneylerde 1.3 mm çapında nozzle ve konsantrasyonu % 7 olarak ayarlanan Blaser Swisssube firmasına ait B-Cool 9665 kodlu kesme sıvısı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü (Ra), 0,01µm hassasiyetle ölçüm yapabilen elmas uçlu Hommel Werke firmasının T 500 test cihazı ile yapılmıştır. Her bir deneyden sonra işlenen yüzeyde 6 farklı noktadan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiş ve analiz için ortalama değerler kullanılmıştır.



Şekil 1. Yüksek basınçta kesme sıvısının kesme bölgesine tatbiki

Deneyler, radyal ve aksenal kesme derinliği sırasıyla 10 mm ve 2 mm olarak sabit tutulup 4 adet kesme hızı, ilerleme oranı ve soğutma sıvısı basınç değerinde gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 2' de verilmiştir. Bu parametrelere ait seviye değerlerinin oluşturduğu kombinasyonların, en iyi yüzey durumunu oluşturan birleşimini bulmak için $4^3=64$ adet deney yapmak gerekmektedir. Bu deneylerin yapılması için harcanan zaman ve malzeme maliyetleri değerlendirildiğinde Taguchi' nin geliştirdiği, deney sayısında azalma sağlayan yöntem ihtiyaca cevap vermektedir (Taguchi vd., 1987).

Tablo 2. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye	4.Seviye
Kesme hızı V_c [m/dk]	50	70	90	110
İlerleme oranı [mm/diş]	0.05	0.1	0.15	0.2
Basınç P [bar]	6	100	200	300

Tablo 2’ deki kesme parametreleri ile Taguchi L_{16} ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Minitab 16 yazılımı ile hazırlanan Taguchi L_{16} deney tasarımı Tablo 3’ te gösterilmektedir.

Tablo 3. Taguchi L_{16} ortogonal deney tasarımı

V_c [m/dak]	f [mm/diş]	P [bar]
1	3	3
1	4	4
1	1	1
1	2	2
2	2	1
2	1	2
2	4	3
2	3	4
3	2	4
3	1	3
3	3	1
3	4	2
4	2	3
4	1	4
4	4	1
4	3	2

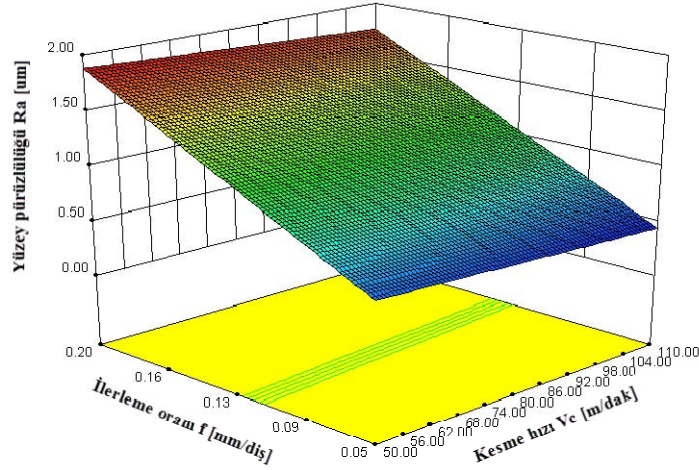
3. Bulgular ve Tartışma

Yüksek basınçlı soğutma sistemi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama R_a yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4’ te verilmiştir.

Tablo 4. Deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları

V_c [m/dak]	f [mm/diş]	P [bar]	R_a [μ m]
50	0,15	200	1,57
50	0,2	300	1,72
50	0,05	6	0,63
50	0,1	100	1,17
70	0,1	6	0,85
70	0,05	100	0,41
70	0,2	200	1,87
70	0,15	300	1,59
90	0,1	300	0,71
90	0,05	200	0,50
90	0,15	6	1,08
90	0,2	100	1,74
110	0,1	200	1,09
110	0,05	300	0,42
110	0,2	6	1,85
110	0,15	100	1,41

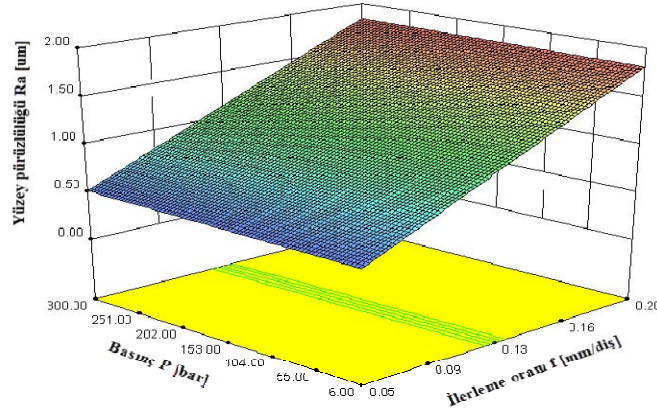
Şekil 2’de yüzey pürüzlülüğünün R_a [μ m] kesme hızına V_c [m/dk] ve ilerleme oranına f [mm/diş] göre değişimi verilmiştir. Bilindiği üzere yüzey pürüzlülüğü teorik olarak ilerleme hızı ve takım uç yarıçapının bir fonksiyonudur. Genel olarak ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır (Benardos vd., 2002; Acır, 2003; Çelik vd., 2007; Demirayak vd., 2007; Kuram vd., 2010).



Şekil 2. Yüzey pürüzlülüğünün R_a [μ m] kesme hızına V_c [m/dk] ve ilerleme oranına f [mm/diş] göre değişimi

Şekil 2’de de görüldüğü gibi ilerleme oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artış göstermektedir. Bunun yanı sıra kesme hızının artışı ile de bir miktar azalma görülmektedir. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme, beklenen bir özellik olup yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için kesme hızının artırılması, literatürde önerilen en yaygın yöntemdir [Kopac vd., 2002; Özses, 2002; Davim vd., 2006; İşbilir, 2006; Çelik vd., 2007].

Şekil 3’de ise yüzey pürüzlülüğünün (R_a [μm]), basınca P [bar] ve ilerleme oranına f [mm/diş] göre değişimi görülmektedir. Burada basınç değişiminin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğünün (R_a [μm]), soğutma sıvısı basıncına (P [bar]) ve ilerleme oranına (f [mm/diş]) göre değişimi

Deney çıktılarının grafiksel sonuçlarından yola çıkılarak yapılan yorumlar Design Expert programı kullanılarak yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları ile örtüşmektedir.

3.1. Deney sonuçları için ANOVA (Analysis of variance: Varyans analizi) bulguları

Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ortaya koyabilmektir (Çetin, 2010). Tablo 5’te deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA bulguları verilmiştir. ANOVA sonucunda ilerleme oranı (f) için hesaplanan p değeri 0.05’den küçük olduğu için bu faktörün yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel ve fiziksel öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer parametreler için hesaplanan p değeri 0.05’den büyük olduğu için, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA bulguları

R_a					
	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	P
Model	3,85947	3	1,28649	47,8437	0.0001
P	0,00169	1	0,001688	0,06277	0.8064
V_c	0,03403	1	0,034031	1,2656	0.2826
f	3,82375	1	3,823751	142,203	0.0001
Hata	0,32267	12	0,026889		
Toplam	4,18214	15			

3.2. Taguchi optimizasyonu bulguları

Taguchi deney tasarım yönteminde kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt S/N oranıdır. S (Sinyal), sistemin verdiği ve ölçülmek

istenen gerçek değeri, N (Gürültü) ise ölçülen değer içerisindeki kontrol edilemeyen, istenmeyen faktörlerin payını gösterir. 3 tip S/N oranı vardır.

Tip N: Hedef değer en iyi, hedef nominal bir değere ulaşmak.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{r^2}{s} \right) \quad (1)$$

Tip S: En küçük en iyi, hedef en düşük değere ulaşmak.

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

Tip B: En büyük en iyi, hedef en yüksek değere ulaşmak

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (3)$$

Y: Y değerlerinin (performans karakteristiklerinin değerlerinin) ortalaması

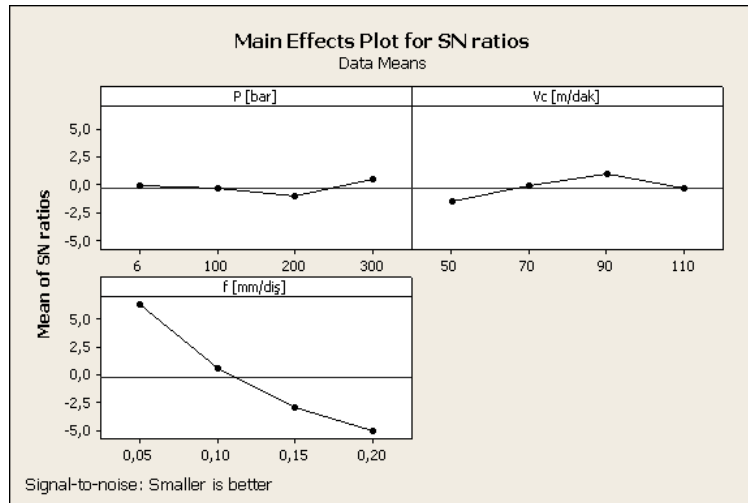
S: Y değerlerinin standart sapması

n: Y değerlerinin sayısı

Üç durumda da amaç S/N oranını maksimize etmektir. Bu oranların maksimize edilmesi, sinyali arttırırken, varyansı azaltmaktadır (Çetin, 2010).

Bu çalışmada deney sonucu olarak yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünden, deneylerin analizinde en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır.

Şekil 4, frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin S/N oranları

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer, en iyi deney sonucunu (yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu deney sonucunu) göstermektedir. Kesme parametrelerinin eğimlerinden de hangi parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğunu analiz edebiliriz. Grafikteki eğimi fazla olan parametre, çıkış parametresi üzerinde

daha fazla etkiye sahiptir. Şekil 4'e göre ilerleme oranı (f) yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı ve soğutma sıvısı basıncından daha fazla etkiye sahiptir.

Deney parametrelerinin S/N oranlarının maksimum olduğu koşullarda, yani $V_c = 90$ m/dk, $f = 0.05$ mm/diş ve $P = 300$ bar deney şartlarında minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmektedir. Bu minimum yüzey pürüzlülüğü değeri Taguchi tahmini ile $0.28 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen minimum yüzey pürüzlülüğü değerini doğrulamak için belirlen optimum deney şartlarında bir adet doğrulama testi yapılmıştır. Yapılan doğrulama testi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri $0.32 \mu\text{m}$ ' dir. Görüldüğü gibi minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum deney şartlarında teorik olarak hesaplanan yüzey pürüzlülüğü değeri doğrulama testi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerine oldukça yakındır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde mevcut olan çalışmalar (Sakarya vd., 2006; Meral vd., 2011a; Meral vd., 2011b; Fratila vd., 2011) değerlendirilerek, optimal değere daha kısa zamanda ulaşım zamandan ve malzeme maliyetlerinden tasarruf sağlamak adına Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi L_{16} ortogonal deney tasarımı ile 64 deney yerine 16 deney yapılarak kısa sürede deney sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi optimizasyonu ile minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum deney parametrelerine ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra ANOVA ile deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olup olmadıkları araştırılmıştır. ANOVA sonucunda sadece ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Taguchi optimizasyonu ile minimum yüzey pürüzlülüğü için elde edilen optimum deney parametreleri ile yapılan deney sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Doğrulama deneyi, Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığını göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2215-D-10 proje numarasıyla desteklenmektedir. Süleyman Demirel Üniversitesi CAD/CAM Araştırma ve Uygulama Merkezine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Acır A., (2003). Talaş kaldırma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin incelenmesi. II. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, 209-216, Konya.
- Benardos, P.G., Vosniakos, G.C., (2002). Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural Networks and Taguchi's design of experiments. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 18, 343-354.
- Courbon C., Kramar D., (2009). Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 1114-1125.
- Çakır, O., Kıyak, M., Altan, E., (2003). Titanyum ve alaşımlarının talaşlı şekillendirilmesi. II. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, 21-30, Konya.
- Çaydaş, U. (2008). Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s., Elazığ.

- Çelik, İ., Karakoç, F., (2007). Yüzey pürüzlülüğünün işlenen yüzey boyunca değişkenliği. IV. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, 155-166, Konya.
- Çetin, M.H. (2010). Bitkisel esaslı kesme sıvılarının tornalamadaki performansının araştırılması. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 190 s., Gebze.
- Davim, J.P., Figueira, L. (2006). Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 1186-1191.
- Demirayak, İ., Çakır, M.C., (2007). Kesme parametreleri ve kaplama tabakasının iş parçası yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. IV. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, 263-272, Konya.
- Ding, T., Zhang, S., Wang, Y., Zhu, X. (2010). Empirical models and optimal cutting parameters for cutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 45-55.
- Fratila, D., Caizar, C. (2011). Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *Journal of Cleaner Production*, 19, 640-645.
- Gökçe, B., Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt: 6, No:1, 71-83.
- Güngör, O. (2011). Kesici takım titreşimlerinin gerçek zamanlı izlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88 s., Isparta.
- Hascalik, A., Caydas, U. (2008). Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 896-903.
- İşbilir, F. (2006). Takım ömrünün sebep-sonuç diyagramları ile açıklanması, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrüne etkili faktörlerin analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s., Ankara.
- Kopac, J., Bahor, M., Sokovic, M. (2002). Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 707-716.
- Kuram, E., Özçelik B., Demirbaş E., Şık E., (2010). Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force. *The World Congress on Engineering*, London, U.K.
- Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011a). Delik delme uygulamalarında delik kalitesinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu. *Mühendis ve Makina Dergisi*, cilt: 52, sayı: 619, 42-49.
- Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011b). Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt:27, sayı:4, 332-338.
- Özçelik, B., Kuram, E., Sert, A. (2011). Düzlem yüzey frezelemede takım tutucuları ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt: 8, No:1, 1-13.
- Özses, B. (2002). Bilgisayar sayısal denetimli takım tezgahlarında değişik işleme koşullarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s., Ankara.
- Routara, B.C., Bandyopadhyay, A., Sahoo, P. (2009). Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 1166-1180.

- Sakarya, N., Göloğlu, C. (2006). Taguchi yöntemi ile cep işlemede kullanılan takım yolu hareketlerinin ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin belirlenmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 21, No.4, 603-611.
- Savaskan, M., Taptık Y., Ürgen M. (2004). Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu. İTÜ Dergisi/d Mühendislik, 3 (6), 117-128.
- Şirvancı, M. (1997). Kalite için deney tasarımı. Literatür yayınları.
- Taguchi, G., Konishi, S. (1987). Orthogonal Arrays and Linear Graphs. American Supplier Institute.
- Yang, Y.K., Chuang, M.T., Lin, S.S. (2009). Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods. Journal of Materials Processing Technology, 209, 4395-4400.
- Zhang, J.Z., Chen, J.C., Kirby, E.D. (2007). Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. Journal of Materials Processing Technology, 184, 233-239.