

Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu

Metin SAVAŞKAN*, Yılmaz TAPTIK, Mustafa ÜRGEN

İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

Özet

Deney tasarımı teknikleri mühendislik çalışmalarına önemli avantajlar getirmektedirler. Çalışmada bu yaklaşımın detayları, ince sert seramik kaplı (TiAlN ve TiN) matkap uçlarının performans optimizasyonu örneği ele alınarak incelenmiştir. Hedeflenen optimum noktaya ulaşabilmek için endüstriyel ortamda en önemli faktörler olan kaplama türü, kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri Taguchi Deney Tasarımı tekniği yardımı ile incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde varyans analizi ve sinyal/gürültü oranı kullanılmış, deneyler ise Taguchi L₉ dik düzenine göre yapılarak, Tam Faktöriyel Deney Tasarımında gereken deney sayısının sadece üçte biri ile (27 yerine 9 deney) hedeflenen sonuçların elde edilmesi mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deney tasarımı, ince sert seramik kaplamalar, Taguchi.

Performance optimization of drill bits using design of experiments

Abstract

In this paper advantages of design of experiment techniques in engineering applications were investigated by the example of the performance optimization problem of hard ceramic coatings on HSS drills. TiN and TiAlN coatings on HSS tools have shown significant improvements on tool life. To achieve the limits of the improvements, optimization of processing parameters is as important as the selection of proper coating type. Cutting speed and feeding rate have been chosen as the most important process parameter, which can be easily adjusted under industrial conditions. The work focused on the main effects of coating type, cutting speed and feeding rate on the overall performance by using design of experiment techniques. The statistical methods of signal-to-noise ratio and analysis of variance are applied for the analysis of the results and for the determination of the effects of each parameter on the drilling process. Design of the experiments is based on Taguchi L₉ orthogonal array, which provides a decrease of the necessary number of experiments to 1/3 of a conventional full factorial design. As a result, the analyses show that an optimum cutting force is provided in case of TiAlN coatings, when cutting speed is 25 m/min and feeding rate is 164 mm/min. The efficiency of the optimization by Taguchi technique under industrial conditions has been proved by the decrease of the number of necessary experiments from 27 to 9.

Keywords: Design of experiments, hard ceramic coatings, Taguchi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Metin SAVAŞKAN. msavaskan@yahoo.de; Tel: (535) 216 30 30.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Deney tasarımı yöntemlerinin karşılaştırmalı kullanımı ile ince sert seramik kaplamalı matkap uçlarının performans değerlendirilmesi ve optimizasyonu" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.07.2003 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 01.09.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunması için (kontrol edilemeyen faktörler de gözetilerek) deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek optimum şartlar tespit edilir. Bu yaklaşım çerçevesinde yapılan deneyler sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta ise doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasının gerekliliğidir (Scheffler, 2001).

Genelde yukarıda açıklanan durumlarda uygulanan soru sorma tekniği, her faktörü teker teker ele almak ve her faktörün sistem üzerindeki etkilerini ayrı ayrı tespit etmektir. Ancak böyle bir yaklaşımda faktörler arasındaki etkileşimler gözardı edilmiş olacaktır ve bir faktörün etkisinin değerlendirilmesi sırasında diğer faktörlerin buldukları seviyelerin sonuçlar üzerinde yarattığı etki yanıltıcı olacaktır. Bundan farklı bir yaklaşımla mümkün olan tüm kombinasyonların denenmesi ise yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacak, hatta çoğu kez uygulanması mümkün olmayan bir durumdur. Tüm bunların yanı sıra sadece gerekli deneyleri gerçekleştirmek ve sonuçları değerlendirmek değil, ayrıca sonuçların analizinde uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Çünkü doğal olarak gerçekleştirilecek her deney bir belirsizlik ve hata payı içerecektir (Scheffler, 1997).

Endüstriyel şartlar göz önüne alındığında hem bu deneyleri ekonomik şartlar ve zamansal kısıntıları gözeterek en verimli şekilde gerçekleştirebilmek, hem de sonuçları doğru yorumlayabilmek için (kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirebil-

mek için) deney tasarımı yöntemlerinin uygulanması son derece verimli bir yaklaşımdır. Ayrıca kalite ve verimliliği artırmak amacıyla uygulanan tüm diğer yöntem ve metotları destekleyici, yönlendirici rolü vardır.

Bu modern yaklaşım çerçevesinde Taguchi Deney Tasarımı metodu optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı bir metot olarak ortaya çıkmaktadır. Taguchi metodu, çözümün sadece en az sayıda deneyle elde edilmesini sağlamakla kalmaz, yüksek kalitede proses ve ürün geliştirilmesini her açıdan destekler. Buna, prosesin veya ürünün üretim şartlarına ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı minimum hassasiyeti göstermesi, gerekli toleransların en düşük maliyetle sağlanması ve Taguchi kayıp fonksiyonu sayesinde ürünün toplumda yol açtığı kaybı minimize ederek yeni bir kalite maliyeti anlayışı çerçevesinde değerlendirilmesi de dahildir.

Metal işleme sanayiinde delme işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Burada sağlanacak performans artışları (proses parametrelerinin optimizasyonu ve matkap uçlarının ömrünün artırılması) maliyetlere ve kaliteye kayda değer katkılarda bulunacaktır. Bu amaçla geliştirilen en verimli yöntem, taban malzeme olarak uzun yıllardır tercih edilen yüksek hız çeliklerinin özelliklerini ince sert seramik kaplamalarınki ile birleştirmektir (Taptık, 1996a). Özellikle TiN ve TiAlN kaplamalar bu alanda önemli ilerlemeler sağlamakla beraber, kaplamasız matkap uçlarına kıyasla bu avantajların somut olarak ortaya konmasında hala eksiklikler vardır. Uygun kaplama türünün doğru seçimi ile beraber optimum kesme ve ilerleme hızlarının belirlenmesi de endüstriyel işletmelerde verimliliğinin artmasına önemli katkıda bulunacaktır.

Yukarıda belirtilen durum mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ortaya çıkan tipik bir problem örneğidir. Matkap ucunu oluşturan malzemenin özelliklerinin geliştirilmesi ve kesme hızı ve ilerleme hızının performans üzerine etkilerinin incelenmesi için deneyler yapılması ve bunların sonuçlarının değerlendirilerek bu üç faktör için bir arada optimize edilmesi gerekmektedir.

TiN ve TiAlN kaplı matkap uçlarının kaplamasız uçlara kıyasla sağladığı önemli orandaki performans artışı ve bununla beraber matkap uçlarının her birinin maksimum performansı göstereceği kesme ve ilerleme hızlarının belirlenmesi, modern deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi Deney Tasarımı metodunun kullanılması ile minimum deney sayısı, dolayısıyla minimum maliyet ve en az zaman harcanarak sağlanmıştır.

Deney tasarımı

Deney tasarımı teknikleri sadece istatistiksel bir yaklaşım değil, tüm araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılabilecek, kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren, sonuçların güvenilirliğini sağlamlaştıran, tüm diğer kalite tekniklerini destekleyen ve tamamlayan tekniklerdir. Uygulamada getirdikleri avantajlar performans ve kalitenin artırılması, kaynakların verimli kullanılması, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması, ve ürünün ve/veya prosesin kalite özelliklerini belirleyen değerlerin kontrol edilemeyen veya edilmesi zor/maliyetli faktörlere karşı daha az duyarlı olması şeklinde sıralanabilir.

Taguchi metodu

Temel olarak deney tasarımı yöntemleri yüzyıl başında tarımsal araştırmalarda kullanılarak Fischer tarafından geliştirilmiştir (Montgomery, 2001; Yang vd., 1998). Ancak klasik deney tasarım yöntemleri kullanımları endüstriyel şartlar altında verimli ve sağlıklı olmayan yaklaşımlardır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı da çok hızlı şekilde artmaktadır.

Genichi Taguchi, kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesindeki verimliliği artıracak bir çözüm getirmiştir (Ross, 1989). Bu sayede deney öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olmuştur. Taguchi metodu bir deney tasarım tekniği olmanın ötesinde yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir tekniktir. Diğer taraftan deney sayısında elde edilen azalma, faktörler arasındaki

etkileşimlerin belirli ölçüde gözardı edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal/gürültü oranı değeri küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir.

Hangi S/N oranı değerlendirilmede kullanılırsa kullanılsın, sonuç olarak karşımıza çıkan değerlerde daha büyük olan S/N oranı daha iyi deney sonucunu ifade eder. Böylelikle deneylerde ele alınan faktörlerin seviyeleri içerisinde en yüksek S/N oranına sahip olan değerler en iyi performansı verecektir. Bunun yanı sıra varyans analizi (ANOVA) ile hangi proses üzerinde hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konulur (Yang vd., 1998). Hem S/N oranı, hem de varyans analizi yardımı ile de faktörlerin, prosesi optimum performansa ulaştıracak kombinasyonu tespit edilir.

Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlaması ve bunun için de tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur (Ross, 1989).

Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir (Yang vd., 1998):

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanılarak).
2. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi.
3. Doğru dengeli tasarımın seçimi.
4. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi.
5. Deneylerin daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi.
6. Sonuçların analizi.
7. Onama deneylerinin yapılması.

Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için optimum performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve optimum deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir.

Matkap uçları

Talaşlı imalat sektöründe delme işleminin ve matkap uçlarının oldukça önemli bir yeri vardır. Kullanılan matkap uçlarının %90'ından fazlası ise 13 mm'nin altındaki matkap uçlarından oluşmaktadır (Dröse, 1987; Hoff, 1986). Dolayısı ile söz konusu matkap uçlarının ömrünün artırılması sektörde önemli bir maliyet avantajı sağlayacaktır. Bu hedefe ulaşmak istenirken başlıca çıkış noktası aşınma ve korozyonun etkilerini azaltarak malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve performansını artırmaktır. Talaşlı imalatta istenilen bu etkiyi yakalamak için etkili yöntem olarak yüzey kaplamaları kendilerini göstermişlerdir. Kesici takımların ömrünün artırılmasında aşınmaya dayanıklı sert seramik kaplamalar sayesinde çok önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu gelişmelerle imalat hızının artırılması, kesici takım maliyetlerinin azaltılması (tüketim ve stok), işleme maliyetlerinin düşürülmesi ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır.

Bu iyileşmeden maksimum oranda faydalanabilmek için uygun kaplamanın seçilmesi, kaplama prosesinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi ve tüm bunların yanı sıra uygun proses şartlarının seçilmesi önemlidir. Bu proses şartlarından en önemlileri ise kesme hızı ve ilerleme hızıdır. Her ne kadar ince sert seramik kaplı matkap uçları son yirmi-otuz yıla yakın süredir ticari olarak kullanıma sunulmuş olsa da, bunların endüstriyel kullanım sırasındaki davranışları konusunda bilinmeyen noktalar vardır. Bunların seçimi genelde üreticilerin tavsiyeleri ve deneyime bağlı olarak yapılmaktadır. Bu durumda optimum proses şartlarının neresinde bulunduğu kesin olarak bilinmemektedir.

Matkap uçlarının kullanılacağı şartların optimizasyonunda Taguchi Deney Tasarımı tekniğinin

kullanılması ile maksimum takım ömrüne ve yüzey kalitesine ulaşabilmek en hızlı ve en ekonomik şekilde mümkün olacaktır.

TiN ve TiAlN kaplamalar

Kesici takımlarda kullanılan malzemelerden beklenen temel özellikler belirli bir tokluk değerine sahip olmanın yanı sıra özellikle yüksek sıcaklıklarda aşınma ve oksidasyona dayanıklılık göstermeleridir. Malzemelerin birbiri ile ters orantılı olan bu özellikleri göz önüne alındığında seramiklerin aşınma dayanımı ile metallerin tokluk özelliklerinin bir arada kullanımı bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla kesici takım malzemelerinde seramiklere doğru kayma gözlenirken, yüksek hız çelikleri üzerine yapılan ince sert seramik kaplamaların da gün geçtikçe önemi artmaktadır.

Bu avantajları hedeflerken geliştirilen yüzey kaplamalardan beklenen özellikler olarak yüksek sertlik, iş parçasına düşük ancak takım malzemesine yüksek yapışma, yüksek aşınma direnci, yüksek kimyasal kararlılık ve tokluk, düşük çözünürlük, yüksek yük taşıma kapasitesi, düşük kesme kuvvetleri, düşük ısıl yayınma katsayısı sıralanabilir. Bu özellikleri sağlamak için öncelikli olarak kullanılan başlıca kaplama türleri ise TiN, TiAlN, TiCN, CrN'dür (Tsao vd, 2002).

Bu ince sert seramik filmlerin malzeme üzerine kaplanması Kimyasal ve Fiziksel Buhar Biriktirme teknikleri kullanılmaktadır. Kimyasal Buhar Biriktirme tekniğinde kaplama sıcaklıklarının yüksek olması taban malzeme açısından problem teşkil ederken, Fiziksel Buhar Biriktirme tekniği düşük sıcaklıklarda da kaplamanın gerçekleştirilebilmesi nedeniyle daha üstün bir uygulama metodu oluşturmuştur.

Deneyel çalışmalar

Deney sistemi

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılmak üzere ülkemizde endüstriyel kullanım için TiAlN ve TiN kaplama gerçekleştiren firmalarda gerekli matkap uçları (DIN 338, 605 Profil HSS-E) kaplattırılmıştır. Kaplama kalınlığı olarak literatürde yer alan çalışmalar ve

kaplanmış takım üreten firmaların şartnameleri dikkate alınarak 2 µm seçilmiştir.

Deneylerin yapılması sırasında işlenen malzeme olarak ağırlıklı şekilde plastik kalıpların imalatında kullanılan 1.2312 malzeme nolu 40 CrMnMoS8-6 tipi kalıp çeliği kullanılmıştır. Deneyler DMG Deckel Maho Gildemeister GmbH firmasının DMU 50 V model CNC Freze tezgahında gerçekleştirilmiştir ve deney parçası uygun bir adaptör aracılığı ile tezgaha sabitlenmiştir.

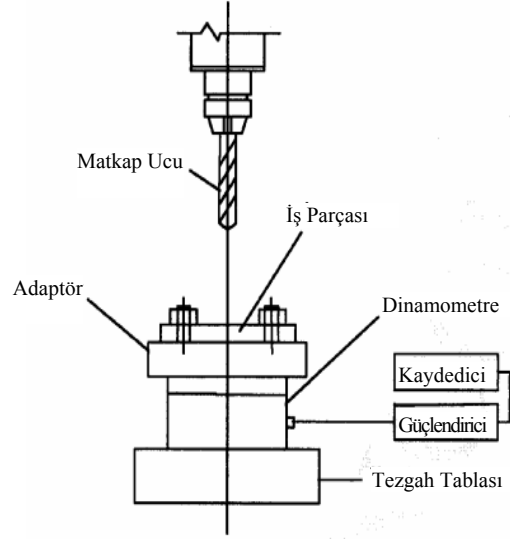
Kaplamalı ve kaplamasız matkap uçları ile yapılan delik delme işlemleri sırasında proses çıktısı olarak kesme kuvvetleri ve moment ölçülmüştür. Ölçme işlemi için 4 bileşenli Kistler marka dinamometre kullanılmış ve ölçülen kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi ile kullanılan matkap uçlarının değişik kesme ve ilerleme hızlarında birbirleri arasındaki performans farklılıkları ortaya konmuştur (Kalidas vd., 2001).

Dinamometre ile ölçülen değerler bir dizüstü bilgisayar ve gene özel olarak yazdırılan bir bilgisayar programı aracılığı ile kaydedilmiştir. Gene aynı program ölçülen değerleri grafiksel olarak da sunmaktadır. Her deney sırasında 18 mm derinliğinde 10 ayrı delik delinerek kesme kuvvetleri ölçülmüş ve deney sonuçlarının analizinde bu 10 değerın ortalaması alınmıştır. Deney düzeneği ve Şekil 1’de şematik olarak verildiği gibi Tsao’nun (2002) yaptığı çalışmadakine benzer şekilde kurulmuştur.

Sebepler sonuç diyagramı

Balık kılıcı diyagramı deneylerin tasarımında hazırlanan ilk çıktılardan biridir. Bu diyagram ürün veya prosesin kalitesini temsil eden ve çıktı olarak ölçülecek değeri ve değerlendirilecek olan bu değere etki edecek olan tüm faktörleri ortaya koyar. Balık kılıcı diyagramına dayanarak deneyler sırasında değişken olarak alınacak faktörlere ve sabitlenmesi gereken faktörlere karar verilmiştir. Şekil 2’de gösterildiği gibi kesme kuvvetine etki eden faktörler dört ana başlıkta toplanmışlardır. Bunlar içerisinde kaplama malzemesi, kesme hızı ve ilerleme hızı dışında tüm diğer faktörler sabit tutulacak ve

sadece bu üç faktörün etkisi incelenecektir (Keleş, 1996, Taptık, 1996a, Taptık 1996b).

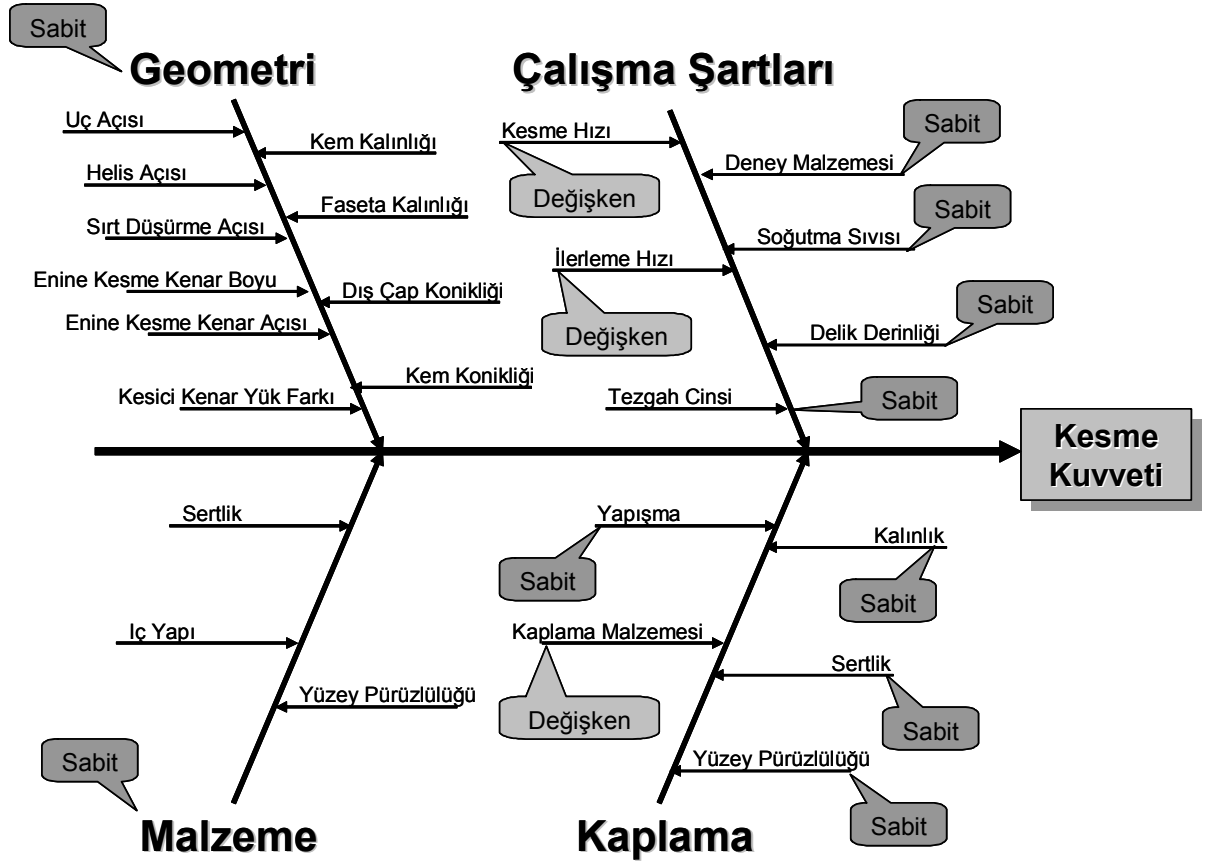


Şekil 1. Deneysel Sistemi (Tsao, 2002)

Faktörlerin seçimi

Çalışma sırasında öncelikle kaplamasız matkap uçları ile TiAlN ve TiN kaplamalı matkap uçlarının performans karşılaştırılmasının endüstriyel şartlar altında yapılması hedeflenmiştir. Bu sebeple deney tasarımında ele alınan ilk faktör kullanılan matkap uçunun kaplamalı olup olmadığı ve ne tür bir kaplamaya sahip olduğudur.

İşletme şartları altında prosesi etkileyen önemli işleme faktörleri ise kesme ve ilerleme hızlarıdır. Daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarının beraberlerinde getireceği önemli maliyet avantajlarını her işletme değerlendirmek isteyecektir. Ancak bu iki faktörle beraber kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarından her birinin maksimum performansı vereceği noktayı bulabilmek, deneylerin yapılmasındaki amaçtır. Bu sebeple işletme şartlarında kaplamalı veya kaplamasız matkap uçlarının kullanılması gereken optimum kesme ve ilerleme hızlarını belirlemek amacı ile ikinci ve üçüncü faktörler olarak bu değerler seçilmiştir. Kaplama türü Kaplamasız, TiAlN ve TiN olarak üç değişik kademeli bir değişken iken, ilerleme ve kesme hızları gene üçer kademeli sürekli değişkenlerdir. Kontrol edilecek faktörlerin belirlenmesinin ardından bu faktörlerin alacağı en yüksek ve en düşük değerlerin belirlenmesi ve hangi seviye aralıkları ile



Şekil 2. Sebep sonuç diyagramı

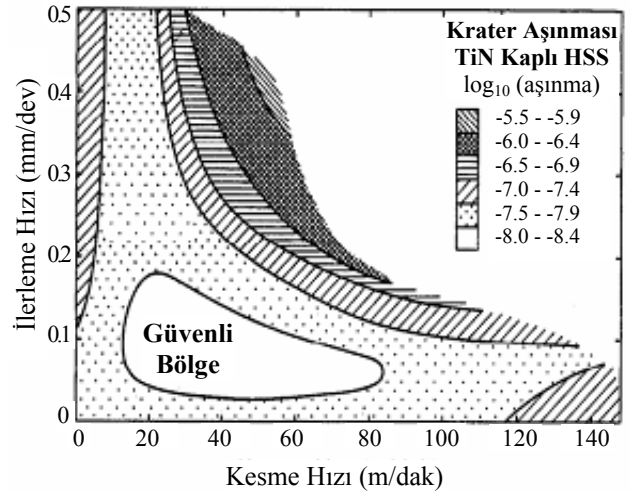
test edilmesi gerektiğine karar verilmesi gerekir. Bunun için gene şimdiye kadar yapılan çalışmalar ve üretici firmaların şartnamelerinde belirttikleri değerler göz önüne alınmış ve Şekil 3'te gösterilen güvenilir bölge içerisinde yer alan değerler seçilmiştir (Lim vd., 1999).

Üç değişik faktörden her biri en düşük, en yüksek ve orta değer olmak üzere eşit aralıklı 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Yapılacak deneylerde incelenilmesi düşünülen faktörler ve seviyeleri Tablo 1'deki gibi öngörülmüştür. Tüm bunların dışında deneylerin gerçekleştirildiği matkap uçlarının geometrik ölçüleri, kaplama kalınlıkları, deliklerin açıldığı taban malzeme ve benzeri kesme kuvveti üzerinde etkili olacak tüm diğer faktörler sabit tutulmuştur.

Performans ölçümü

Belirtilen üç değişkenin hangi seviyelerinin en verimli proses şartlarını vereceğini bulmakta ve her faktörün etkisini tespit etmekte, bu faktörler kadar performansın değerlendirilmesinde hangi

ölçünün kullanılacağı önemlidir. Şimdiye kadar yapılan bir çok çalışmada performansın değerlendirilmesinde aşınma değeri ölçü alınmıştır. İlgili standartlarda da kesici takımın kullanılmaz hale gelmiş olarak nitelendirildiği aşınma miktarı belirtilmiştir.



Şekil 3. TiN kaplı takım uçlarında aşınma haritası (Lim vd., 1999)

Tablo 1. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktörler		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	
1	Kaplama Türü	TiAlN	TiN	Kaplamasız	
2	Kesme Hızı v_c	m/dak	25	35	45
3	İlerleme Hızı v_f	mm/dak	134	164	194

Matkap ucunun performansının belirlenmesinde kullanılan bir başka değer ise kesme kuvveti olmuştur (Smith vd., 1997). Dinamometre yardımı ile ölçülen kesme kuvvetleri kullanılan matkap ucunun maruz kalacağı zorlanmayı ortaya koymaktadır. Dinamometre ile her delik açılması sırasında F_x , F_y ve F_z kuvvetleri ile M_z momenti ölçülmüştür. Bu değerler içerisinde F_z kuvveti, matkap ucunun performansını değerlendirmede kullanılacak bir ölçü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deney tasarımı

Deneyler sırasında incelenecek faktörlerin ve seviyelerinin belirlenmesinden sonra yapılacak deneylerin belirlenmesi aşaması gelmektedir. Taguchi Deney Tasarımı metoduna göre seçilecek dik düzenin belirlenmesi için tespit edilecek ilk veri, toplam serbestlik derecesidir. Serbestlik derecesi kısa tanımı ile hangi seviyenin optimum sonucu vereceğini belirlemek için tasarım parametreleri arasında yapılması gereken karşılaştırma sayısını gösterir.

Üç seviyeli bir faktör için serbestlik derecesinin iki olması dolayısı ile seçilecek tasarımın sağladığı serbestlik derecesi, üç faktör için ihtiyaç duyulan altı serbestlik derecesinden yüksek olmalıdır. Bu açıdan da değerlendirildiğinde çalışma için uygun tasarım olarak dokuz deneyli Taguchi L_9 dik düzeyi karşımıza çıkmaktadır (Tablo 2 ve 3). Bu tasarım dört adet üç seviyeli faktörün ana etkilerinin incelenmesine imkan sağlamaktadır (toplam dokuz deneyin imkan verdiği maksimum serbestlik derecesi sekizdir). Çalışma çerçevesinde gerek duyulan altı serbestlik derecesi dışında kalan serbestlik dereceleri ise hata değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Her faktör L_9 tasarımdaki kolonlara

yerleştirilmekte, faktör yerleştirilmeyen dördüncü kolona ise hata değeri yerleştirilmektedir. Tam Faktöriyel bir deney tasarımına göre gereken 27 deneye kıyasla Taguchi Deney Tasarımına göre yapılması gereken bu 9 deney Tablo 2’de koyu renk ile gösterilmişlerdir.

Sonuçlar

Tablo 2 ve Tablo 3’te belirtilen Taguchi L_9 dik düzeni çerçevesinde gerçekleştirilen deneylerde dinamometre aracılığı ile kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Her deliğin açılması sırasında elde edilen kesme kuvvetlerinin ortalaması alınarak, o delik için söz konusu olan kesme kuvveti belirlenmiştir. Delik delme işlemleri her deney şartı için on kere tekrarlanarak bunların ortalaması alınarak istatistiksel olarak sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.

Tüm deneyler sonucunda ölçülen kesme kuvvetlerinin ortalamaları ise Tablo 4’te verildiği gibidir. Bu sonuçlar analiz işlemlerinde sinyal/gürültü oranının hesaplanmasında ve varyans analizinde kullanılacaklardır.

Sinyal/Gürültü (S/N) oranı

Taguchi Deney Tasarımı metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder.

Sinyal/gürültü oranının hesaplanmasında deneyler sonucunda ulaşılmaya hedeflenen kalite değerinin özelliği de önemlidir. Burada temel üç önemli kategori söz konusudur:

Tablo 2. 3 seviyeli 3 faktör için Taguchi L₉ deney planı

Kaplama Türü		
TiAlN	TiN	Kaplamasız
Kesme Hızı V _c (m/dak.)	Kesme Hızı V _c (m/dak.)	Kesme Hızı V _c (m/dak.)
25	45	25
35	25	
134		

Tablo 3. Taguchi L₉ Deney Tasarımı

Faktörler ve Seviyeleri			
	A	B	C
	Kaplama Türü	Kesme Hızı V _c	İlerleme Hızı Vf
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

- **düşük değer iyi** (hedef en düşük değere ulaşmaktır)
- **yüksek değer iyi** (hedef en yüksek değere ulaşmaktır)
- **nominal değer iyi** (hedef nominal bir değere ulaşmaktır)

Yapılan araştırmaya söz konusu olan matkap uçlarında ölçülen karakteristik değer kesme kuvveti olduğu ve en düşük kesme kuvvetinin sağlanması istenildiği için deneylerin analizinde “düşük değer iyi” yaklaşımına göre hesaplanan sinyal/gürültü oranı kullanılacaktır (Ross, 1989; Taguchi, 1990).

Bu yaklaşıma göre S/N oranını hesaplamakta kullanılacak olan denklem:

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

şeklinde dir.

Tablo 4’te her deney için ölçülen kesme kuvveti değeri üzerinden denklem 1 yardımıyla hesaplanan sinyal/gürültü oranları verilmiştir. Denklemde y, o deney şartlarında ölçülen karakteristik değeri (kesme kuvvetini), n ise o deney şartlarında yapılan deney sayısını ifade etmektedir (Ross, 1989; Yang vd., 1998).

Bir sonraki aşamada ise her faktörün her seviyedeki etkisinin ayrıştırılması gerekir. Bunun için Tablo 4’te hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınır. Mesela kesme hızının 25 m/dak olduğu birinci seviyeye ait oranı belirlemek için 1, 4 ve 7 numaralı deneyler için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması alınır. Tablo 5’te tüm faktörler ve seviyeler için bu şekilde hesaplanmış ortalama sinyal/gürültü oranları verilmiştir. Bunların yanı sıra yapılan toplam dokuz deneyin toplam sinyal/gürültü oranı da hesaplanır. Toplam ortalama sinyal/gürültü oranı -33.35 dB olarak karşımıza çıkar (Denklem 2).

$$\eta_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i = -33.35 \text{ dB} \quad (2)$$

Tablo 4. Taguchi L_9 Deneysel Tasarımına göre deney sonuçları ve S/N oranları

Faktörler ve Seviyeleri						
	A	B	C			
Deneysel No	Kaplama Türü	Kesme Hızı V_c (m/dak.)	İlerleme Hızı V_f (mm/dak.)	Kesme Kuvveti F_z (N)	S/N Oranı (dB)	
1	TiAlN	25	134	41	-32.26	
2	TiAlN	35	164	34	-30.63	
3	TiAlN	45	194	44	-32.87	
4	TiN	25	164	35	-30.88	
5	TiN	35	194	41	-32.26	
6	TiN	45	134	68	-36.65	
7	Kaplamasız	25	194	41	-32.26	
8	Kaplamasız	35	134	74	-37.38	
9	Kaplamasız	45	164	56	-34.96	

Tablo 5. Taguchi L_9 deneysel tasarımına göre ANOVA tablosu

	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Oranları (dB)			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)	F
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye				
A Kaplama Türü	2	-31.92	-33.26	-34.87	13.06	6.53	27.78	934.5
B Kesme Hızı v_c	2	-31.80	-33.42	-34.83	13.77	6.89	29.29	986.0
C İlerleme Hızı v_f	2	-35.43	-32.16	-32.46	19.61	9.81	41.71	1403.8
D Hata	83				0.58	0.006988	1.23	
Toplam	89				47.02		100.00	

Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek sinyal/gürültü oranı en iyi deney sonucuna, yani kesme kuvvetinin en düşük olduğu deney sonucuna işaret eder. Şekil 4'te hesaplanan bu değerler her faktör için ayrı ayrı grafik halinde de gösterilmiştir. Optimizasyon aşamasını sonuçlandırmak için ise hesaplanan sinyal/gürültü oranlarından yola çıkarak varyans analizi gerçekleştirilecektir.

Varyans analizi (ANOVA)

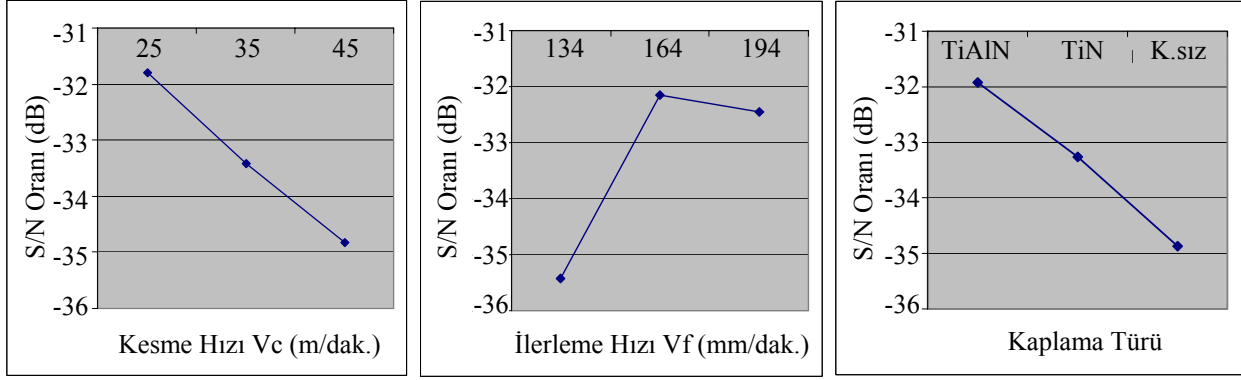
Varyans analizinde hedeflenen, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerini (kesme kuvvetini) ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını ortaya koyabilmektir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği de test edilir. Bu amaçla öncelikle denklem 3'e göre sinyal/gürültü oranının toplam

değişkenliğini belirten SS_T değeri (toplam karelerin toplamı) hesaplanır.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (3)$$

η_i = ölçülen kesme kuvvetleri üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranı,
 η_m = ölçülen kesme kuvvetleri üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması,
 n = toplam deney sayısı)

SS_T değeri üç faktörün ayrı ayrı her faktörün karelerinin toplamı değerleri (SS_A , SS_B ve SS_C) ile hata payının karelerinin toplamı olan SS_e değerinin toplamından oluşmaktadır. Her faktörün karelerinin toplamının denklem 4 yardımıyla ayrı ayrı hesaplanması sonucu ortaya çıkan değerler Tablo 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kaplama türü, kesme hızı ve ilerleme hızı için S/N oranları

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} [n_{A_i} * (\eta_{A_i} - \eta_m)^2] \quad (4)$$

k_A = A faktörünün seviye sayısı,
 n_{A_i} = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı,
 η_A = A faktörünün i seviyesindeki S/N oranı,
 η_m = ortalama S/N oranı)

Bir sonraki adımda ise her deney faktörünün deney sonuçlarını ne ölçüde etkilediğini gösterebilmek için F-Testi adı verilen hesaplama yapılır. F-Testinde toplam karelerin toplamındaki her bileşen için karelerin toplamı değeri o faktörün serbestlik derecesine bölünür ve ortalama karelerin toplamı değeri belirlenir. F değeri ortalama karelerin toplamı değerinin hata değerinin ortalama karelerin toplamına bölünmesi ile bulunur (mesela A faktörü için 6.53 değerinin 0.006988 değerine bölünmesi ile). Hesaplanan F-değerlerinin, %95 güvenilirlik seviyesi her faktör için 2, hata terimi için ise 83 olan serbestlik dereceleri için ilgili tablodan alınan kritik $F_{0.05;2;83}$ değeri ile karşılaştırılması, hedeflenen %95'lik güvenilirlik seviyesini sağlanıp sağlanmadığını ortaya koymaktadır.

Yaklaşık 3.10 civarında olan bu kritik değer her faktör için hesaplanan ve Tablo 5'te verilen F-değerleri ile karşılaştırılması göstermektedir ki, elde edilen sonuçlar oldukça yüksek bir güvenilirlik seviyesi sağlamaktadır. Yani incelenen faktörlerin etkisinin hata faktörden ayrıştırılması oldukça kolaydır ve hedeflenen %95'lik güvenilirlik seviyesi kolayca yakalanılabilmektedir.

Değerlendirmede kullanılan diğer bir değer olan her faktörün yüzde olarak toplam değişkenlik üzerindeki etkisi ise her faktörün karelerin toplamı değerinin toplam karelerin toplamı değerine bölünmesi ile bulunur ve o faktörün deney sonuçlarına katkısının tüm faktörler içerisindeki oranını gösterir (Ross, 1989; Yang vd., 1998).

Optimizasyon

Şekil 4'teki grafiklerde de görüldüğü gibi her bir faktör için sinyal/gürültü oranının en yüksek olduğu seviyeler kaplama türünde TiAlN, kesme hızında 25 m/dak, ilerleme hızında ise 164 mm/dak'dır. Optimum nokta olarak tavsiye edilen kombinasyon böylelikle TiAlN kaplamalı matkap uçları ile 25 m/dak kesme hızı ve 164 mm/dak ilerleme hızı olmaktadır. Sinyal/gürültü oranları kullanılarak belirlenen bu optimum nokta için beklenen kesme kuvvetini hesaplamak mümkündür. Her faktör için belirlenen optimum seviye için hesaplanan ortalama sinyal/gürültü oranı değeri ve toplam ortalama sinyal/gürültü oranı değeri kullanılarak denklem 5 yardımı ile hesaplama yapıldığında bu deney şartları altında oluşması beklenen sinyal/gürültü oranı -29.18 dB'dir. Bu hesaplama yapılırken sadece sistem üzerinde önemli etkisi bulunan faktörlerin kullanılması gerekirken, incelenen sistemde her üç faktörün de çıktı değeri olan kesme kuvveti üzerinde önemli etkisi olduğu için her üçü de hesaplama dahil edilmiştir. Tahmin edilen sinyal/gürültü oranı üzerinden yapılan hesaplama ile karşımıza çıkan optimum deney kombinasyonu için tahmin edilen kesme kuvveti değeri 28.78 N'dur (Tablo 6).

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (5)$$

Tablo 6. Taguchi Deney Tasarımı metoduyla optimizasyon ve onama deneyleri sonucunda elde edilen değerler

Optimum Seviyeler		
	Seviye	Değer
Kaplama Türü	1	TiAlN
Kesme Hızı v_c (m/dak.)	1	25.00
İlerleme Hızı v_f (mm/dak.)	2	164.00
Optimum S/N Oranı		-29.18 dB
Optimum Kesme Kuvveti		28.78 N

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve tartışma

Şimdiye kadar yapılan birçok araştırmada seramik kaplamaların gerek HSS gerekse diğer malzemelerden üretilen takım uçların performanslarını artırmadaki etkileri incelenmiştir. Ancak kaplama türü ile sağlanan performans artışı endüstriyel kullanımda tek önemli faktör değildir. İşleme şartları altında maksimum performansla ulaşılabilecek olan proses değerlerini de bulabilmek, tüm proses bir sistem olarak ele alındığında en az bunun kadar önemlidir. Proses şartlarının optimizasyonu çeşitli çalışmalarda incelenen bir konu olmakla beraber bu üç parametreyi bir arada gözetmek ve bunların optimizasyonunda deney tasarımından faydalanmak verimli bir yaklaşım olarak kendini göstermektedir.

Özellikle son dönemlerde ince sert seramik kaplamalar üzerine yapılan çalışmalarda deney tasarımı yöntemleri de kullanılarak deney sayısının azaltılması sağlanmıştır. Bu değerlendirmeler genelde aşınma değerlerinin ölçülmesi ve kıyaslanması ile yapılmıştır. Bu çalışmalara bakıldığında kesme kuvvetinin kıyaslama değeri olarak alınması az sayıda araştırmada kullanılan bir yöntem olmuştur. Gerek yapılan diğer sayılı araştırmalarda (Subramanian vd., 1993, Tsao, 2002), gerekse yapılan bu çalışmada kesme kuvvetinin değerlendirmede kullanılabilir bir

kriter olduğu ortaya konmuştur. Böylece hem deney tasarımının kullanılması ile, hem de değerlendirmenin kesme kuvvetleri üzerinden yapılması ile sonuçlara ulaşmak ve optimizasyonu gerçekleştirebilmek için gerekli süre ve maliyetler son derece azalmıştır.

Taguchi Deney Tasarımı ile hesaplanan bu değerleri değerlendirirken unutulmaması gereken bazı noktalar vardır. Bunlardan en önemlileri bu deney tasarımı ile faktörler arasındaki etkileşimlerin (mesela kesme hızı ve ilerleme hızı arasında söz konusu olabilecek etkileşimin) göz ardı ediliyor olması ve faktörlerin planlama aşamasında belirlenen seviyeleri dışında bir optimum değer seçilmesinin söz konusu olamamasıdır. Bu tür sınırlamaların deney tasarımı kullanılacak çalışmaların en ön safhalarında göz önüne alınması gerekir.

Ayrıca sinyal/gürültü oranları ilerleme hızı için en uygun değeri 164 mm/dak'da göstermekle birlikte, 194 mm/dak seviyesindeki değerle arasındaki fark çok büyük değildir. Muhtemelen proses için gerçek optimum ilerleme hızı seviyesi 164 ila 194 mm/dak arasında bir seviyede yer almaktadır (Şekil 4). Bu sebepten dolayı her ne kadar Taguchi metodu ile 164 mm/dak değeri optimum seviye olarak gözükse de, pratikte daha yüksek değer olan 194 mm/dak veya bu iki seviyenin arasındaki muhtemel optimum noktanın denenecek seçilmesi daha doğru olacaktır.

Teşekkür

Çalışmalar sırasında verdiği destek dolayısı ile değerli hocamız Sayın Prof. Dr. Ali Fuat Çakır'a teşekkür ederiz. Ayrıca deneylerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Yük. Müh. Hayati Çağlar'a ve Makina Takım Endüstrisi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Davim J. P., (2001). A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, **116**, 305-308.

- Di Mascio, R., Barton, G. W., (2001). The economic assessment of process control quality using a Taguchi-based method, *Journal of Process Control*, **11**, 81-88.
- Dowey, S. J., Raehle, B., Matthews, A., (1998). Performance Analysis of Coated Tools in Real-life Industrial Experiments Using Statistical Techniques, *Surface & Coatings Technology*, **99**, 213-221.
- Dröse, J., (1987). Titannitrid-beschichtete HSS-Spiralbohrer Leistungsfähigkeit und Verschleissmechanismen, *Doktora Tezi*, RWTH Aachen, 1-26.
- Hoff, M., (1986). Analyse und Optimierung des Bohrprozesses, *Doktora Tezi*, RWTH Aachen, 1-3.
- Kalidas S., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., (2001). Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions, *Surface and Coatings Technology*, **148**, 117-128.
- Keleş Ö., (1996). Matkap Uçlarının Ark PVD ile TiN Kaplanması Proses Parametrelerinin Taguchi Metotları ile Optimizasyonu, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 186-229.
- Lim, C. Y. H., Lim, S. C., Lee, K. S., (1999). The performance of TiN-coated high speed steel tool inserts in turning, *Tribology International*, **32**, 393-398.
- Montgomery, D. C., (2001). *Design and analysis of experiments*, 5th Edition, John Wiley, Wiley & Sons, New York, 1-19.
- Ross, P. J., (1989). *Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*, McGraw-Hill International Book Company, ISBN 0-07-053866-2, 1-66, 167-202.
- Scheffler, E., (1997). *Statistische Versuchsplanung und -auswertung, Eine Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, ISBN 3-342-00366-9, 1-50.
- Smith, I. J., Gillibrand, D., Brooks, J. S., Münz, W.-D., Harvey, S., Goodwin, R., (1997). Dry cutting performance of HSS twist drills coated with improves TiAlN, *Surface and Coatings Technology*, **90**, 164-171.
- Subramanian, C., Strafford, K. N., Wilks, T. P., Ward, I. P., Mephee, M. A., (1993). Performance evaluation of TiN-coated twist drills using force measurement and microscopy, *Surface and Coatings Technology*, **62**, 641-648
- Taguchi, G., (1990). *Introduction to quality engineering*, Asian Productivity Organisation, Japan, ISBN 92-833-1083-7, 97-132.
- Taptık, Y., (1996). Qualitaet und Qualitaetssicherung Ark-PVD-TiN Beschichteter Werkzeuge, Teil 1: Feststellung der Kundenanforderungen und Beschreibung der Qualität, *Metall*, **50 6/96**, 424-432.
- Taptık, Y., (1996). Qualitaet und Qualitaetssicherung Ark-PVD-TiN Beschichteter Werkzeuge, Teil 2: Erzeugung TiN beschichteter Bohrwerkzeuge mit angeforderter Qualität, *Metall*, **50 11/96**, 727-735.
- Tsao, C.-C., (2002). Prediction of flank wear of different coated drills for JIS SUS 304 stainless steel using neural network, *Journal of Material Processing Technology*, **5618**, 1-7.
- Yang W. H., Tarn Y. S., (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, **84**, 122-129.