KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(2), 2023
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 26(2), 2023
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 27.08.2022
Kabul Tarihi :31.03.2023

Received Date : 27.08.2022
Accepted Date : 31.03.2023

NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN DELİNMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE TAGUCHI İLE OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS IN DRILLING OF NICKEL BASED SUPERALLOYS WITH GRAY RELATIONAL ANALYSIS AND TAGUCHI

Harun YAKA[1*] (ORCID: 0000-0003-4859-9609)
Ramazan ATILKAN[2] (ORCID: 0000-0002-4197-3314)

[1] Amasya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye
[2] Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Harun YAKA, harun.yaka@amasya.edu.tr

ÖZET

Artan maliyetler ve istenen ürünün kalitesi dikkate alındığında talaşlı imalatta verimli işleme yapmanın önemi artmaktadır. Verimli bir işleme yapabilmek için kesme parametreleri uygun seçilmelidir. Bu çalışmada, nikel esaslı süper alaşımlı malzemelerde delme işlemi yapılmıştır. Delme işleminde farklı kesme parametreleri ve seviyeleri kullanılmıştır. Ayrıca delme işleminde kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere iki ayrı matkap ucu seçilmiştir. Taguchi yöntemi ile deney listesi oluşturulmuş ve deneyler sonunda elde dilen yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Sonuçlar, Taguchi ve GİA (Gri İlişkisel Analiz) yöntemleri kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonlar, ortalama yüzey pürüzlülüğünün en küçük değeri istendiği için en küçük en iyi sinyal-gürültü oranı seçilerek yapılmıştır. Deneyler sonunda en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünü elde ettiğimiz kesme parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Optimum parametre seviyelerinin dizilimi A2B3C1D3 çıkmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre belirlenmiş ve çalışmanın güven düzeyi Varyans analizi kullanılarak bulunmuştur. En etkin parametre kesme hızı, çalışmanın güven düzeyi %84,23 olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Süper alaşım, Taguchi, gri ilişkisel analiz, optimizasyon, ortalama yüzey pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Considering the increasing costs and the quality of the desired product, the importance of efficient machining in manufacturing is increasing. In order to perform an efficient machining, the cutting parameters should be selected appropriately. In this study, drilling was performed in nickel-based superalloy materials. Different cutting parameters and levels were used in the drilling process. In addition, two different drill bits, coated and uncoated, were selected in the drilling process. The test list was created with the Taguchi method and the surface roughness of the surfaces obtained at the end of the experiments was measured. The results were optimized using Taguchi and GIA (Gray Relational Analysis) methods. Optimizations were made by choosing the smallest best signal-to-noise ratio since the smallest value of the average surface roughness was desired. At the end of the experiments, the cutting parameters and levels at which we obtained the lowest average surface roughness were determined. The sequence of optimum parameter levels was A2B3C1D3. The parameter affecting the average surface roughness the most was determined and the confidence level of the study was found by using analysis of variance. The most effective parameter was the cutting speed, the confidence level of the study was 84,23%.

ToCite: YAKA, H., & ATILKAN, R., (2023). NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN DELİNMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE TAGUCHI İLE OPTİMİZASYONU. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 26(2), 363-378.

Keywords: Superalloy, Taguchi, gray relational analysis, optimization, average surface roughness.

GİRİŞ

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, güçlü korozyon direnci, mükemmel termal yorulma özellikleri ve termal stabiliteye sahip olduğu için havacılık sektöründe özellikle motor parçalarının imalatında kullanılmaktadır. Uçak motorlarının kompresör diskleri, türbin diski, yatak halkası, kasa, bıçaklar ve çalışan diğer parçalarında yaygın olarak uygulanmaktadır (Zhu vd., 2013).

Son zamanlarda orta ve düşük sıcaklıklarda çalışabilen bazı süper alaşımların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu özelliklere sahip olarak geliştirilen süper alaşımlardan birisi de Inconel 718 alaşımıdır. Düşük ve orta sıcaklıktaki (-250 ile 700°C) mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda uzay, petrol ve nükleer enerji endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu malzemeler işleme sırasında yüksek sertliğinden dolayı talaş oluşumunda güçlüklerle karşılaşılmaktadır (Besterfield vd., 1995). Malzemenin üretim maliyeti yüksek olduğu için işlenmesi esnasındaki hatalar ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır.

Inconel 718 alaşımları düşük ve orta sıcaklıklarda mekanik özellikleri iyi olduğu için son zamanlarda havacılık alanında yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle jet motoru parçalarının üretiminde önemli bir alaşım olarak kullanılmaktadır (Khanafer vd., 2020). Bu alanlarda kullanılan malzemelerin hassas yüzey toleransları gerektirdiği için işleme yöntemleri ve işleme hassasiyeti büyük önem arz etmektedir. Inconel süper alaşımlarının talaşlı imalat neticesinde iş parçası yüzeyinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Jafarian vd., 2016; Ozcelik vd., 2005; Kumar vd., 2017; Akgün ve Demir, 2021). Yapılan çalışmalar incelendiğinde, Inconel 718 süper alaşımı birçok talaşlı imalat yöntemi kullanılarak işlenmiş ve malzemenin işlenebilirliği incelenmiştir. En yaygın olarak da frezeleme ve tornalama işlemleri uygulanmıştır. Delik delme işleminin fazla uygulanmadığı görülmüştür (Besterfield vd., 1995; Montgomery, 2017). Havacılık sanayisinde süper alaşımların delinmesi önemli bir talaşlı imalat uygulaması olarak bilinmektedir. Farid vd. (2009), Inconel 718'in yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini araştırmak için farklı devirlerde, farklı ilerleme hızlarında, farklı matkaplarda ve matkap uç açılarında delme testleri yapmışlardır. Çalışmada, işlenmiş deliklerin kalitesi, geometrik doğruluk ve çapak oluşumu açısından değerlendirilmiştir. Genel olarak, kaplamasız karbür matkap ile Inconel 718 delerken kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varmışlardır (Farid vd., 2009). Khanna vd. (2020), Inconel 718 süper alaşımının delinmesi için sürdürülebilir bir üretim süreci olarak işlemenin delmeye etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, deliğin daireselliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Sonuç olarak, kuru delme ile karşılaştırıldığında kriyojenik delmede delik daireselliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinde azalma olmuştur. Khanna vd. (2020) başka bir çalışmalarında Inconel 718 alaşımına tornalama işlemi uygulamışlar ve takım aşınması, enerji tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir (Khanna vd., 2020b, 2020a). Sahoo vd. (2022), aynı malzemeyi kriyojenik yöntemle delmişler ve oluşan yüzey pürüzlülüğü ile itme kuvvetlerini incelemişlerdir. Deney tasarımını Taguchi yöntemi ile, kesme parametrelerinin optimizasyonu ise Balina (Whale) optimizasyonunu kullanarak yapmışlardır. Parametrelerin etki oranlarını belirlemek için ANOVA kullanmışlardır. Yüksek ilerleme hızlarında itme kuvveti yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre ise matkap ucu (kriyojenik işlem uygulanan tek temperli ve çift temperli takım) olmuştur (Sahoo vd., 2022). Chen ve Liao (2003), Inconel 718 süper alaşımın delinmesinde TiAlN kaplı karbür takımın aşınma mekanizmaları ve takım ömrü üzerine çalışma yapmışlardır. Düşük sürtünmeli yüzey değiştirici içeren kesme sıvısının kullanımı ile delme deneyleri yapmışlar ve matkabın ömrünün önemli ölçüde uzadığı ve dolayısıyla işleme maliyetinin büyük ölçüde azaltılabileceğini belirtmişlerdir (Chen ve Liao, 2003). Khanafer vd. (2020), jet motorlarında yaygın olarak kullanılan Inconel 718 alaşımının delinmesinde meydana gelen yüzey kalitesini ve matkap ömrünü incelemişlerdir. Delme esnasında sıcaklığı azaltmak ve minimum miktarda soğutma sıvısı kullanmak için MQL yöntemi ile soğutma yapmışlardır. Normal soğutma sıvısı kullanımı ve MQL ile soğutma arasındaki farkları incelemişler ve MQL ile işlemede sürdürülebilirlik açısından umut verici sonuçlara ulaşmışlardır (Khanafer vd., 2020). Lotfi vd. (2022), delme parametrelerinin Inconel 718'in yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemektedir. Deneysel çalışmada mikro sertlik, mikro yapı değişiklikleri ve yüzey pürüzlülüğününü incelemişlerdir. Aynı kesme parametrelerini sonlu elemanlar analizinde de uygulamışlar ve elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Yüksek devirlerde ortalama tane boyutunun azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca ilerleme hızının artmasıyla yüzey kalitesinin bozulduğunu gözlemlemişlerdir (Lotfi vd., 2022).

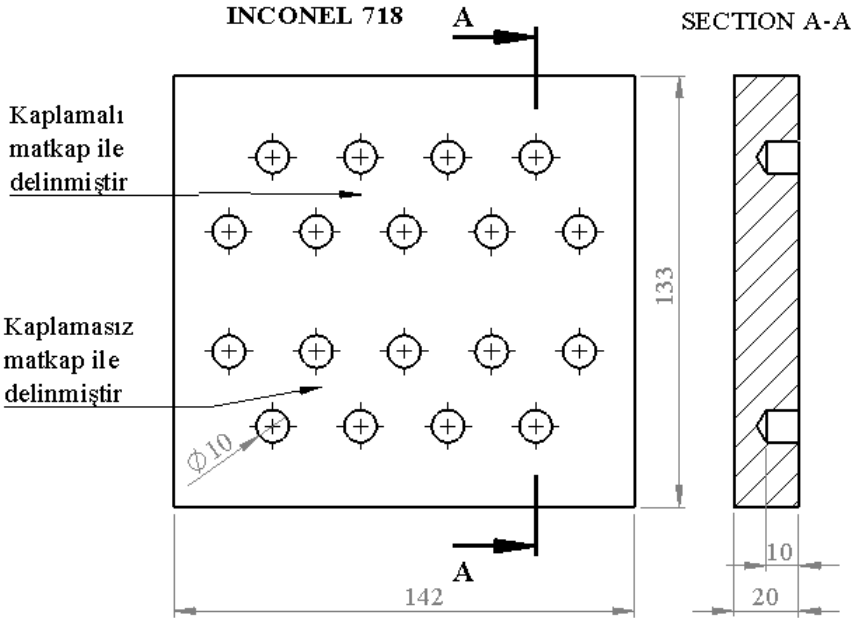
İstatistiksel yöntemler, başta mühendislik alanları olmak üzere farklı çalışmalarda kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir (Benardos ve Vosniakos, 2003). İstatistiksel yöntemlerden olan Taguchi ve gri ilişkisel analiz yöntemi proses parametrelerini optimize etmek ve ürünü geliştirmek için geniş çapta kullanılır (Mohamed ve Lenin, 2020). Bir diğer istatistiksel sonuç değerlendirmede kullanılan ANOVA testi de bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın var olup olmadığını ölçer (Akkuş, 2022). Regresyon analizi ise deneysel çalışmalarda kontrol ve deneysel faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda analiz edilecek değişkene göre daha kolay veya daha erken tespit edilebilen değişkenlere dayalı olarak istenilen değişkeni tahmin eden bir modelin oluşturulmasıdır (Shah vd., 2022). Deneysel çalışmaların doğruluğunu daha iyi belirlemek için genellikle birden fazla istatistiksel yöntem kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, deney sonuçlarının istatsitiksel yöntemler arasında karşılaştırılması için aynı çalışma içerisinde birden fazla istatistiksel yöntem kullanıldığı görülmektedir (Alsoruji vd., 2022; Selvan vd., 2022; Sheheryar vd., 2022).

Çalışmalar incelendiğinde, Inconel 718 alaşımın delinmesinde kaplamalı ve kaplamsız matkapların ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin farklı istatistiksel metotlarla incelendiği görülmektedir. Ancak çalışmalarda, üç farklı uç açısının kulllanıldığı ve deneysel sonuçların doğruluğunu ve işleme parametrelerin tam olarak optimizasyonu için Taguchi ve gri ilişkisel analiz yönteminin aynı anda kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım farklı kesme hızı, ilerleme ve üç farklı uç açılarındaki kaplamasız ve Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı matkaplarla delinerek ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir ve en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Optimum parametrelerin belirlenebilmesi ve deneysel sonuçların doğruluğunun tam olarak ispatı için Taguchi ve gri ilişkisel analiz yömtemleri birlikte kullanılmıştır.

MATERYAL VE METOT

İş Parçası

Deneylerde, Şekil 1'de boyutları verilen 43 HRc sertliğinde Inconel 718 süper alaşımı kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal bileşim ve fiziksel özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de sırayla verilmiştir. Delik delme işleminde deliğin daireselliği üzerine yapılan çalışmalarda delik genellikle boydan boya delinmekte ve civatalı bağlantı veya kılavuz delikleri olarak kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada delikler, işleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülükleri inceleneceği için 10 mm derinliğinde kör delik şeklinde delinmiştir.



Şekil 1. Inconel 718 Süper Alaşımının Boyutları

Tablo 1. Inconel 718 Süper Alaşımının Kimyasal Bileşimi

Element	Ni	Cr	Fe	Nb +Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu
Ağırlıkça %	53,45	18,55	17,64	5,18	5,17	2,92	0,98	0,56	0,23	0,22

Tablo 2. Inconel 718 Süper Alaşımının Fiziksel Özellikleri

Özellik	**Ölçü birimi**	**Değerler**
Yoğunluk	[g/cm^3]	8,20
Young Modülü	[GPa]	204
Özel ısı	[J/kg-K]	435
Lineer ısıl genişleme katsayısı	[10^{-6}/ºC]	13,0
Termik iletkenlik	[W/(m·K)]	11,3
Elektrik özdirenç	[Ω*m*10^{-9}]	1250
Bağıl mıknatıs geçirgenliği	-	1,010

Kesici Takım

Deneylerde Karcan Kesici Takımlar firmasından temin edilen 10 mm çapında uç açıları 95°, 118° ve 140° olan Karcan marka K3DF100089 kodlu kaplamasız karbür maktap ile M8DF100142 kodlu Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkapların özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Matkapların Teknik Özellikleri

K3DF100089 matkap			**M8DF100142 matkap**		
	Helis açısı	30°		Helis açısı	30°
	Kaplama	Kaplamasız		Kaplama	TiN
	Uç açıları	95°-118°-140°		Uç açıları	95°-118°-140°
				Kaplama kalınlığı	0.25-1.2 Mikron
				Kaplama yöntemi	PVD
				Kaplama ergime sıcaklığı	2950°C

Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

Deneyler, İvedik Organize Sanayi Bölgesi Makrotek Makina firmasında bulunan Hardford F1 1000 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın gücü 11 KW, 12000 devir ve 1000x500x600 ebatlarındadır. Deneyde kullanılan CNC dik işleme tezgâhı Şekil 2'de verilmiştir. Kesme esnasında soğutma sıvısı kullanılmamıştır.



Şekil 2. Hartford CNC Dikey İşleme Merkezi

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Delik delme deneyleri sonucu oluşan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerlerinin ölçümü için ISO 1997 standartlarında, 8 mm ölçme boyu ve 0.5 mm/sn ölçüm hızında Mitutoya SJ-310S marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler delik yüzeyin üç ayrı noktasından yapılmış ve bu üç ölçümün ortalamaları girilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve özellikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Mitutoya SJ-310S Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Kesme Parametreleri ve Deney Listesi

Kesme parametreleri, kesici takım firmasının önerileri doğrultusunda ve yapılan literatür araştırması neticesinde belirlenmiştir. Deneylerde, 3 farklı kesme hızı (15, 20, 25 m/dak.), 3 farklı ilerleme (26,32,38 mm/dak.) değerleri ile iş parçasına 10 mm kesme derinliğinde kör delikler açılmıştır. İş parçasına üç farklı uç açısı (95°-118°-140°) olan kaplamalı matkapla 9 kaplamasız matkapla 9 olmak üzere toplamda 18 delik delme işlemi yapılmıştır. Deneyler aynı şatlar altında 3 farklı plaka üzerinde gerçekleşmiştir. Ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamaları alınmış ve deneysel sonuç olarak kabul edilmiştir. Delik delme işleminde kullanılan kesme parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kesme Parametreleri ve Seviyeleri

Sembol	Kontrol faktörleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kesici takım		Kaplamasız	Kaplamalı	
B	Kesme hızı	m/dk	15	20	25
C	İlerleme	mm/dk	26	32	38
D	Matkap uç açısı	°	95	118	140

Taguchi Yöntemi

Tasarım problemlerini optimize etmek için kolay ve verimli bir yol öneren Taguchi yöntemi, hedef fonksiyon için farklı faktörlerin önem sırasını elde etmede en sık kullanılan istatistiksel yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem, deneysel, sayısal ve ayrıca teorik gibi her türlü çalışma için kullanılır (Bademlioglu vd., 2020)

Analizin başarısı, süreç parametrelerinin seçimine ve bunların amaç fonksiyonu ile olan ilişkilerine bağlıdır. Bu çalışmada detaylı literatür taraması yapılmış ve istatistiksel analiz için parametreler ve seviyeleri Tablo 3'te ki gibi belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Inconel 718 alaşımının delinmesi işleminde minimum yüzey pürülülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemi uygulanmıştır. İlk olarak, amaç fonksiyonun (Ra) sonuçları S/N oranına dönüştürülmüştür. S/N oranının hesaplanması için üç tip performans karakteristiği kullanılır. Bunlar: en küçük en iyisi, en büyük en iyisi ve nominal en iyisidir (Jena vd., 2021). Bu çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri minimize edilmek istendiğinden, performans karakteristiği en küçük en iyi seçilmiştir. S/N oranları en küçük en iyi durumuna göre Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Gri İlişkisel Analiz

Taguchi yöntemi tek bir yanıt karakteristiğini optimize etmek için tasarlanırken, Gri ilişkisel analizde birden çok sonucun optimizasyonuna izin verilir. Bu nedenle Gri İlişkisel Analiz diğer optimizasyon yöntemlerine göre biraz daha karmaşıktır (Gök, 2015). Bir sistemin hayati faktörlerine ve faktörler arasındaki ilişkiye karar vermek için kullanılır. Burada anahtar faktörler giriş ve çıkış sırası tarafından tanınır. Çalışmada ilk olarak, deneysel sonuçlar 0 ile 1 arasında normalleştirilmiştir. Daha sonra normalize edilen deneysel sonuçlardan gri ilişkisel katsayılar elde edilerek gri ilişkisel katsayılardan gri ilişkisel derece elde edilmiştir. Çoklu işlem yanıtları da gri ilişkisel dereceye göre değerlendirilir. Tepki parametreleri "en küçük en iyisidir" kriterine göre optimize edildiğinde orijinal sıralama Denklem 2'ye göre hesaplanır (Yessian ve Varthanan, 2020).

$$x_i(k) = \frac{max\, y_i(k) - y_i(k)}{max\, y_i(k) - min\, y_i(k)} \quad (2)$$

Burada $x_i(k)$, normalizasyon sonrasında i serisindeki ve k satırındaki değeri, $min\, y_i(k)$, i serisindeki minimum değeri, $max\ y_i(k)$, i serisindeki maksimum değeri ifade eder ve $y_i(k)$ da i serisi ve k satırındaki orijinal değeri ifade eder.

İkinci adımda, normalize edilmiş deneysel verilerden istenen ve ölçülen deneysel veriler arasındaki ilişkiyi ifade eden gri ilişki katsayısı hesaplanır. Gri ilişki katsayısı Denklem 3'e göre hesaplanır (Singh vd., 2004).

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta min + Y\Delta max}{\Delta 0_i(k) + Y\Delta max} \quad (3)$$

$$\Delta 0_i = \|X_0(k) - X_i(k)\| \quad (4)$$

$\Delta 0_i$, $X_0(k)$ ile $X_i(k)$ arasındaki mutlak değer farkıdır. $X_0(k)$, ideal dizi veya referans dizidir., Δmin, $\Delta 0i$'nin en küçük değeri, Δmax ise $\Delta 0i$'nin en büyük değeridirç Burada Y, 0 ile 1 arasında bir ayırıcı katsayıdır ve genellikle 0,5 olarak alınır (Durairaj vd., 2013; Jena vd., 2021).

Daha sonra gri ilişkisel derece y_o, gri ilişkisel katsayıların ortalaması alınarak hesaplanır. Daha yüksek bir gri ilişkisel katsayı değerinin, verilen $X_i(k)$ dizisi ile ideal $X_0(k)$ dizisi arasında daha güçlü bir ilişki olduğu kabul edilir. İdeal dizi $X_0(k)$ deneysel düzenlemede en iyi tepki olarak kabul edilmektedir (Jena vd., 2021).

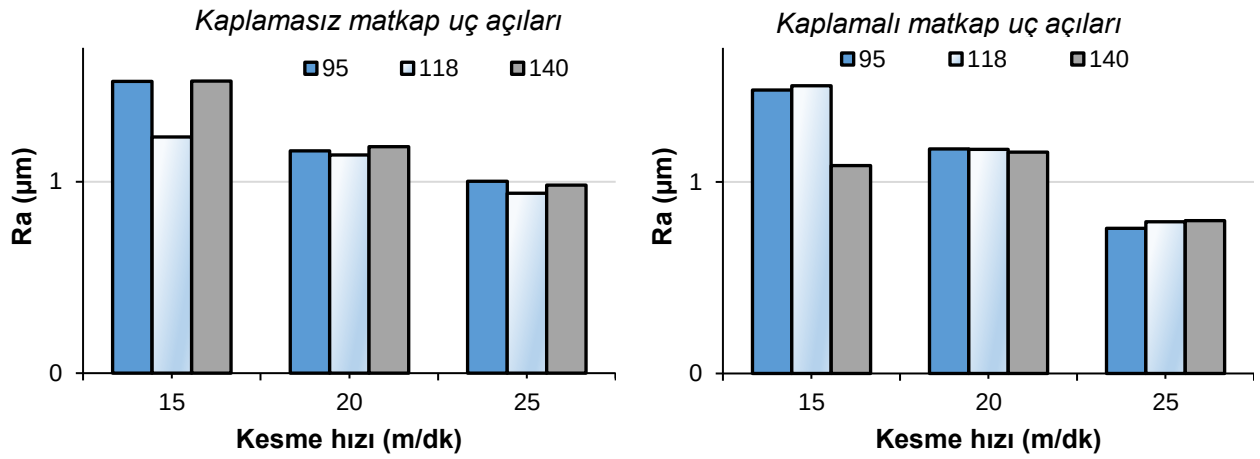
DENEYSEL SONUÇLAR

Derin deliklerde kullanım şartlarına göre sıcaklığın fazla olduğu durumlarda malzeme yüzeyinde oluşan yüksek pürüzlülük değerleri malzeme yüzeyinde kılcal çatlaklar, korozyon ve yüksek aşınma gibi istenmeyen hatalar meydana getirir. Bu hataları minimize etmek için delik yüzeylerinde delme esnasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü kesme parametrelerinin optimizasyonu ile kontrol altına alınabilir (Yaka vd., 2016). Bu amaçla, Taguchi L18 (2^1 3^3) ortogonal dizilim ile hazırlanan deney listesine göre yapılan delme işlemleri sonunda yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve Taguchi ile analiz yapılarak S/N (sinyal/gürültü) oranları çıkarılmıştır. Optimum parametreler ve seviyeler elde edilen S/N gürültü oranlarına göre belirlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve S/N oranları Tablo 5'te verilmiştir. Deneyler sonunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.779 µm ile 1.163 µm arasında gerçekleşmiştir. Süper alaşımlı çeliklerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin bu aralıklarda olduğu görülmektedir (Motorcu vd., 2014; Lotfi vd., 2022).

Tablo 5. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü ve S/N Oranları Değerleri

Deney No	A	B	C	D	Ra (µm)	S/N (dB)
1	Kaplamasız	15	26	95	1,162	-1,30412
2	Kaplamasız	15	32	118	1,017	-0,14642
3	Kaplamasız	15	38	140	1,163	-1,31159
4	Kaplamasız	20	26	95	0,981	0,16662
5	Kaplamasız	20	32	118	0,970	0,26457
6	Kaplamasız	20	38	140	0,992	0,06977
7	Kaplamasız	25	26	118	0,870	1,20961
8	Kaplamasız	25	32	140	0,891	1,00245
9	Kaplamasız	25	38	95	0,901	0,90550
10	Kaplamalı	15	26	140	0,943	0,50977
11	Kaplamalı	15	32	95	1,140	-1,13810
12	Kaplamalı	15	38	118	1,151	-1,22151
13	Kaplamalı	20	26	118	0,985	0,13128
14	Kaplamalı	20	32	140	0,978	0,19322
15	Kaplamalı	20	38	95	0,986	0,12246
16	Kaplamalı	25	26	140	0,799	1,94906
17	Kaplamalı	25	32	95	0,779	2,16925
18	Kaplamalı	25	38	118	0,796	1,98174

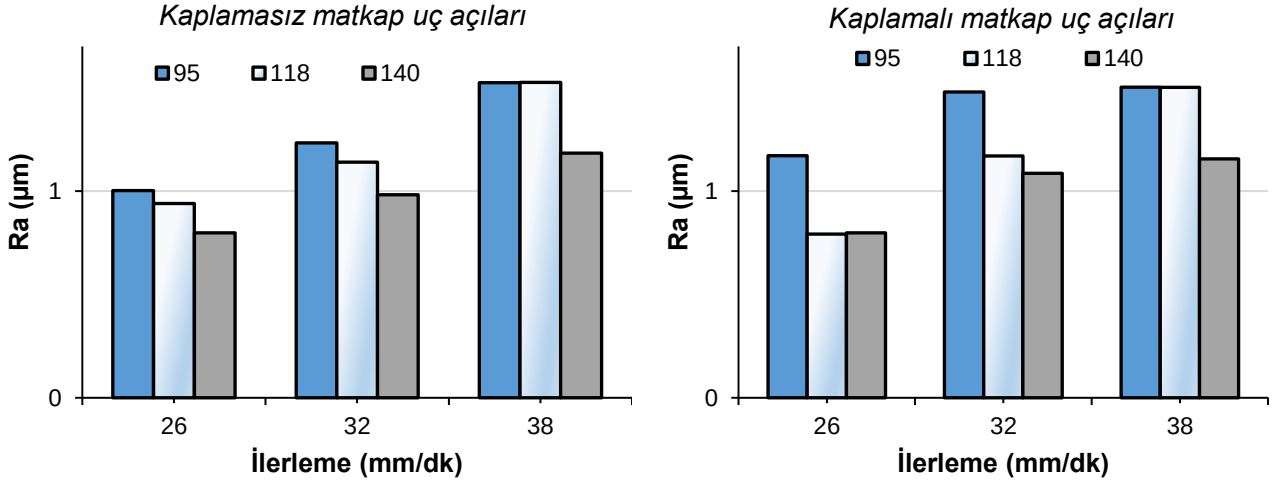
Deneysel faktörlerin Ra üzerinde etkisi ve faktörlerin birbirleriyle etkileşimi Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Parametreler arası etkileşimi daha iyi analiz edebilmek için kaplamalı ve kaplamasız matkapların uç açılarına göre kesme hızının ve ilerlemenin Ra'ya etkileri bar grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 4.a'da kaplamalı matkaplarda kesme hızı arttıkça Ra'nın azaldığı görülmüştür. Şekil 4.b'de kaplamasız matkaplarda da kesme hızı arttıkça Ra'nın azalmıştır. Normal olarak bütün talaşlı imalat işlemlerinde özellikle kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri düşer. Kesme hızlarındaki artış birim zamanda kaldırılan talaş miktarını azalttığı için kesme kuvvetleri de buna bağlı olarak azalır ve kesme işlemi kolaylaşır. Bu da yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkiler (Çiftçi ve Gökçe 2019; Gökçe vd., 2020; Yavuz vd., 2020; Yurtkuran vd., 2016). Kaplamasız matkaplarda, kesme hızı seviyelerinde 118° uç açısında Ra daha küçük çıkmıştır. Kaplamalı matkaplarda ise değişkenlik göstermiştir. 15 ve 20 m/dk kesme hızında 140° uç açılı matkap ideal çıkarken 25 m/dk kesme hızında 95° uç açılı matkap ideal çıkmıştır.



(a) (b)

Şekil 4. Kesme Hızının Uç Açılarına Göre Ra Üzerindeki Etkileşimini Gösteren Bar Grafiği

Şekil 5.a'da kaplamasız, Şekil 5.b'de kaplamalı matkaplarda ilermenin Ra'ya etkileri verilmiştir. Hem kaplamalı hem de kaplamasız matkaplarda ilerleme hızındaki artış Ra değerlerini de arttırdığı görülmüştür. Artan ilerleme oranlarına bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin de artması literatürde de karşılığı olan bir durumdur. İlerleme hızındaki artış birim zamanda kaldırılan talaş hacmini arttırır. Bu durum da kesme kuvvetlerini arttırarak kesmeyi zorlaştırır ve yüzey pürüzlülüklerini olumsuz etkiler (Özlü vd., 2019; Yaka vd., 2016; Zhu vd., 2018). Kaplamasız matkaplarda, kesme hızı seviyelerinde 118° uç açısında Ra daha küçük çıkmıştır. Kaplamasız matkaplar için üç ilerleme seviyesinde de en uygun matkap uç açısı 140°da olarak çıkmıştır. Kaplamalı matkaplarda da farklı ilerleme oranlarında 140° uç açılı matkapta Ra değerleri daha küçük çıkmıştır. Sadece 26 mm/dk ilerlemede en düşük Ra 118° uç açısında gerçekleşmiştir.



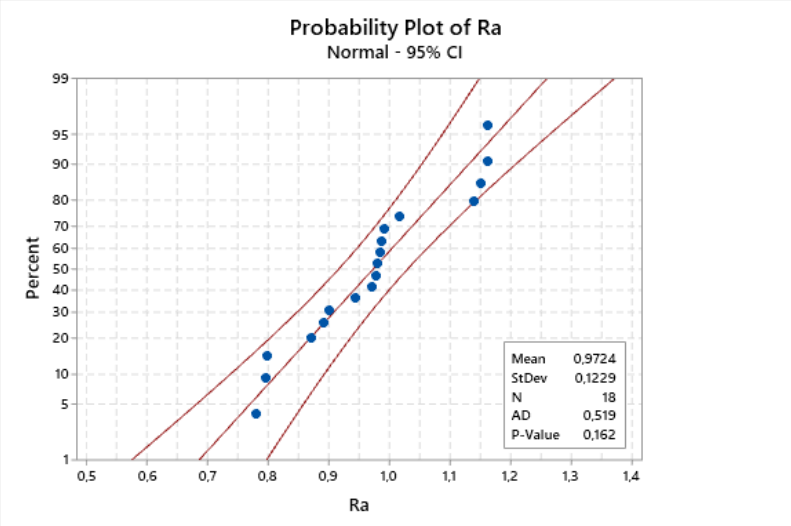
(a) (b)

Şekil 5. İlerlemenin Uç Açılarına Göre Ra Üzerindeki Etkileşimini Gösteren Bar Grafiği

Normallik Analizi

İstatistiksel yöntemlerin çoğu normallik varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle analize başlamadan önce veri setlerinin dağılımının normal olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. Minitab, normallik testi için Anderson-Darling, Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk'e benzer) ve Kolmogorov-Smirnov seçenekleri sunar. Sunulan bu normallik

testleri arasında Anderson-Darling seçeneğine göre testler gerçekleştirilmiştir. Ra, için elde edilen normallik testi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Ortalama, StDev (standart sapma), N (numune sayısı), AD (Anderson-Darling) ve p değerlerini şekillerde görebiliriz. Normallik testi sonucunda ideal P > 0.05 olmalıdır. P değeri Ra için 0.162 olarak elde edilmiştir. Test sonucunda elde ettiğimiz değerin ideal normallik dağılımının biraz üzerinde olduğu ancak kırmızı çizgi ile belirtilen sınırların dışında olmadığı için kabul edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır (Asiltürk ve Akkuş, 2011).



Şekil 6. Ra Sonuçları İçin Normallik Analizi Grafiği

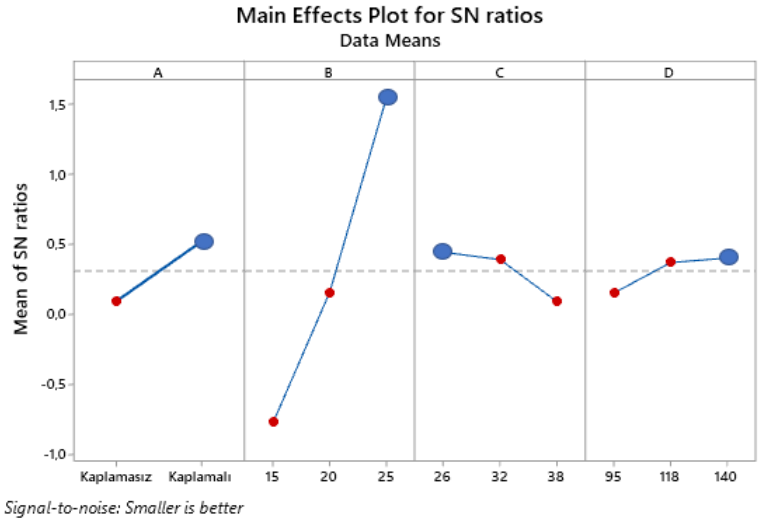
Taguchi Sonuçları

Deneyler sonunda elde edilen ortalama Ra değerleri ve sinyal-gürültü (S/N) oranları Tablo 5'te verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü küçük olması istendiği için S/N oranları en küçük en iyi yöntemi ile oluşturulmuştur. En küçük Ra için S/N oranı en belirgin yani en büyük olur (Erkan ve Yücel, 2018). Tablo 6 incelendiğinde en büyük S/N oranı 17. deneyde çıkmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü de 0.779 µm ile en küçük çıkmıştır.

Tablo 6. En Küçük En İyiye Göre Sinyal Gürültü Oranı Yanıt Tablosu

Seviye	A	B	C	D
1	0,09515	-0,76866	0,44370	0,15360
2	0,52191	0,15799	0,39083	0,36988
3		1,53627	0,09106	0,40211
Delta	0,42676	2,30493	0,35264	0,24851
Sıra	2	1	3	4

Tablo 6, en küçük en iyi sinyal-gürültü oranına göre yanıt tablosudur. Bu tabloda, Taguchi analizlerine göre parametrelerin etkinlik sırası verilmiştir. Sıra satırı, parametrelerin etkinlik sırasını vermektedir. B parametresi yani kesme hızı 1. sırada çıkarak en etkin parametre olmuştur. Daha sonra etkinlik sırası, A (kesici takım kaplamalı-kaplamasız), C (İlerleme) ve D (Matkap uç açısı) şeklinde gerçekleşmiştir.



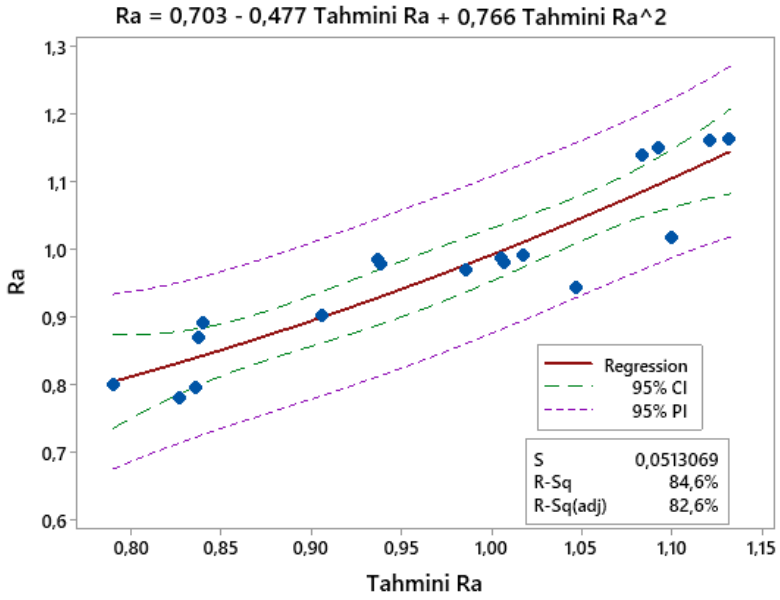
Şekil 7. Kesme Parametrelerinin İdeal Seviyeleri

Şekil 7, parametre seviyelerinin en ideal olanlarını göstermektedir. Taguchi analiz yöntemi ile elde edilen bu grafikte, A parametresinin en ideal seviyesi 2. seviye olan kaplamalı, B parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 25 m/dk., C parametresinin en ideal seviyesi 1. seviye olan 26 mm/dk ve D parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 140° olarak çıkmıştır. Bu sonuçlara göre optimum parametre seviyelerinin dizilimi için A2B3C1D3 dizinini yazabiliriz. Taguchi analizi neticesinde bulunan ideal parametre seviyeleri deney listesi içinde 16. deney (0.799 µm) çıkmıştır. En küçük Ra ölçümleri içinde ise en küçük değer 0.779 µm ile 17. deneyde olmuştur.

Ra için Tahmini Deney Sonuçları

Bu bölümde, deneysel sonuçlar için tahmin edilen değerlerin güven aralığı (CI: Confidence Interval) içinde olup olmadığı belirlenmiştir. Bunu belirlemek için kuadratik regresyon analizi uygulanarak tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 8'de R-Sq değerleri tahmin deneylerinin güven aralığını göstermektedir. Şekillerde bulunan mavi noktalar yapılan deneyleri ifade etmektedir, pembe renkli kesik çizigiler tahmini değerlerin sınırını (PI: Predict Interval) belirtmektedir. Güven aralığı (CI) ise yeşil kesikli çizgilerdir. Kırmızı düz çizgi ise regresyon eğrisidir. Yapılan deneyler (mavi noktalar) regresyon eğrisine ne kadar yakın olursa tahmin deneylerinin güven aralığı (R-Sq) o kadar yüksek çıkar (Gautam vd., 2022)

Taguchi yöntemi ile deneysel sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasındaki sonuçlar değerlendirildiğinde, Ra için tahmin edilen değerlerin güven aralığı (CI) limiti %84.6 çıkmıştır. Ra için tahmin edilen değerler ile deney sonuçları güven aralığı limitinin (%95) biraz altında çıkmıştır. Bu değer de kabul edilebilir bir değerdir (Gök, 2015).



Şekil 8. Ra İçin Tahmin Edilen Değerler ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

ANOVA Sonuçları

Bu bölümde Ra için ANOVA sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Varyans analizi %95 güven düzeyi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Tabloda bulunan % etki değerleri faktörlerin kesme faktörlerinin yüzde etki derecesini göstermektedir. En etkin faktör %77.29 ile B faktörü (kesme hızı) olmuştur. P değerinin %5'ten küçük olması ise bu model için faktörlerin anlamlı olup olmadığını gösterir. Tabloda sadece B faktörü (kesme hızı) 0.0001 P değeri ile anlamlı çıkmıştır. Diğer faktörler için P değeri %5'ten büyük olduğu için anlamlı çıkmamıştır. Taguchi analizlerinde de en etkin parametre B (kesme hızı) çıkmıştır. ANOVA sonuçları Taguchi sonuçlarını doğrulamaktadır. Elde edilen ANOVA sonuçları parametrelerin katkı oranları ve sıralarına göre literatüre paralel çıkmıştır. Ancak A,C ve D parametrelerinin P değerlerinin yüksek çıkması bu parametrelerin anlamlı olmadığını götermiştir. A değeri matkabın kaplama özelliği olduğundan ve sayısal olmayan kategorik olarak iki seviyeden (kaplamalı, kaplamasız) oluştuğu için ANOVA sonuçlarında P değeri %5'ten büyük çıkmıştır. Literatürde benzer sonuçların olduğu görülmüştür (Nas, 2021).

Tablo 7. Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	% Etki	Kareler ortalaması	F Değeri	P Değeri
A	1	0,008450	3,29%	0,008450	2,09	0,1791
B	2	0,198455	77,29%	0,099228	24,51	0,0001
C	2	0,006057	2,36%	0,003028	0,75	0,4980
D	2	0,003312	1,29%	0,001656	0,41	0,6749
Hata	10	0,040480	15,77%	0,004048		
Toplam	17	0,256754	100,00%			

Deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçların güvenilir olması gerekmektedir ve bunun ispatı için genellikle varyans anlizi uygulanmktadır. Varyans analizi yapılan çalışmalarda modelin güven düzeyi genellikle %95 olarak alınmaktadır. Deneysel çalışmanın güven düzeyi bu sınırda veya bu sınıra yakın sonuçlar olması beklenmektedir. Tablo 8, varyans analizinin özetini vermektedir. Tablo 7'de, R^2 değeri modelin güven düzeyini göstermektedir. Yapılan bu model %84.23 güven düzeyinde çıkmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çıkan bu değerin %95 seviyelerine yakın olduğu ve kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

Tablo 8. ANOVA Modelinin Özeti

S	R^2	R^2 ortalama	PRESS	R^2 ilk	AICc	BIC
0,0636242	84,23%	73,20%	0,131157	48,92%	-18,17	-32,66

Regresyon Analizi

Regresyon analizi, deneysel çalışmalarda kontrol ve deneysel faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda analiz edilecek değişkene göre daha kolay veya daha erken tespit edilebilen değişkenlere dayalı olarak istenilen değişkeni tahmin eden bir modelin oluşturulmasıdır (Akkuş, 2021). Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen matematiksel model Denklem 5 ve Denklem 6'da verilmiştir. Bu model ile farklı parametrelerle yapılacak deneylerde oluşacak yüzey pürüzlülükleri hakkında önceden bilgi sahibi olmamızı sağlayacaktır. Bu da şirketlerde zaman ve enerji kaybını önlemeye yardımcı olacaktır. Yapılan analiz, çok değişkenli regresyon sınıfına girmektedir. Üç nicel değişken arasındaki ilişki ölçülmüştür.

$$Kaplamasız\ Ra = 1.477 - 0.02567 * B + 0.00346 * C - 0.000681 * D \quad (5)$$

$$Kaplamalı\ Ra = 1.434 - 0.02567 * B + 0.00346 * C - 0.000681 * D \quad (6)$$

Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen kaplamalı ve kaplamasız matkapla yapılan delme işlemine ait matematiksel model Denklem 5 ve 6'da verilmiştir. Bu model ile farklı parametrelerle yapılacak deneylerde oluşacak yüzey pürüzlülükleri hakkında önceden bilgi sahibi olmamızı sağlayacaktır. Denklemler, benzer şartlarda yapılacak çalışmalar için kullanıldığında zaman ve enerji kaybını önlemeye yardımcı olacaktır.

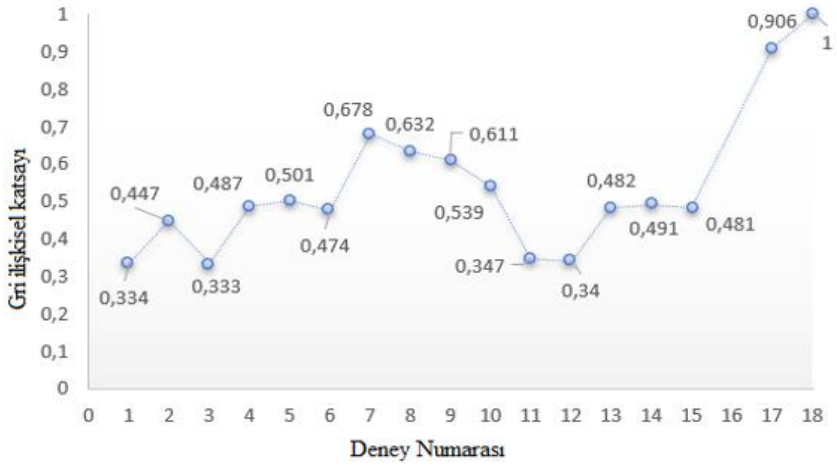
Gri İlişkisel Analiz Sonuçları

Öncelikle "en küçük en iyisidir" yaklaşımına göre normalizasyon yapılmış ve ardından referans serilerinden sapmalar hesaplanmıştır. İkinci olarak, her bir deneyin Gri ilişki katsayıları hesaplanmıştır. Son olarak, Tablo 9'da listelenen sıcaklık için Gri ilişkisel derecenin ortalama değerleri, sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 9. Gri İlişkisel Analiz ve Ölçülen Ra Değerleri

Deney No	A	B	C	D	Ra (µm)	Normalizasyon değeri	Gri ilişkisel katsayı	Gri ilişkisel derece
1	Kaplamasız	15	26	95	1,162	0,002	0,334	17
2	Kaplamasız	15	32	118	1,017	0,380	0,447	14
3	Kaplamasız	15	38	140	1,163	0,000	0,333	18
4	Kaplamasız	20	26	95	0,981	0,474	0,487	10
5	Kaplamasız	20	32	118	0,970	0,502	0,501	8
6	Kaplamasız	20	38	140	0,992	0,445	0,474	13
7	Kaplamasız	25	26	118	0,870	0,763	0,678	4
8	Kaplamasız	25	32	140	0,891	0,708	0,632	5
9	Kaplamasız	25	38	95	0,901	0,682	0,611	6
10	Kaplamalı	15	26	140	0,943	0,572	0,539	7
11	Kaplamalı	15	32	95	1,140	0,059	0,347	15
12	Kaplamalı	15	38	118	1,151	0,031	0,340	16
13	Kaplamalı	20	26	118	0,985	0,463	0,482	11
14	Kaplamalı	20	32	140	0,978	0,481	0,491	9
15	Kaplamalı	20	38	95	0,986	0,460	0,481	12
16	Kaplamalı	25	26	140	0,799	0,947	0,906	3
17	Kaplamalı	25	32	95	0,779	1,000	1,000	1
18	Kaplamalı	25	38	118	0,796	0,955	0,919	2

Gri ilişkisel derecede her zaman en yüksek değere sahip olan istenir. Tablo 8 ve Şekil 6 incelendiğinde, 17. deneyde Gri ilişkisel derece 1 olarak çıkmış ve en yüksek parametre derecesi olduğu bulunmuştur. Böylece, 17. deney, 18 deney arasında eş zamanlı olarak en iyi çoklu performans özelliklerini vermektedir (Tosun, 2006).



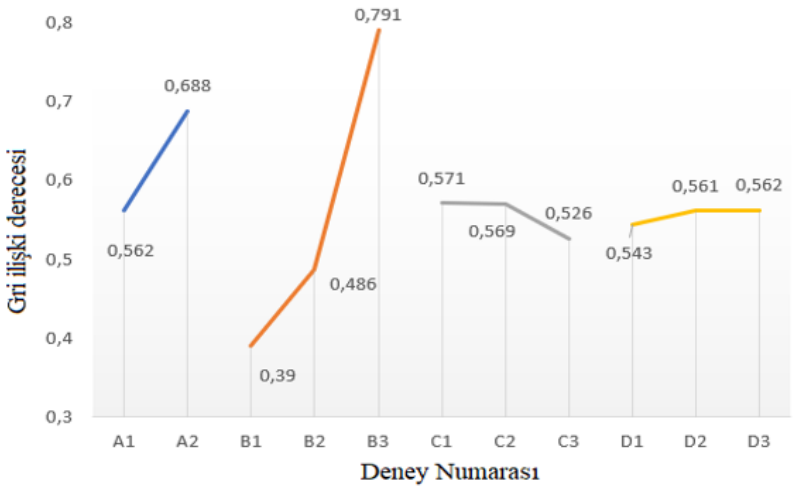
Şekil 6. Deney Numaralarına Göre Gri İlişkisel Katsayıları

Tablo 9'da gösterildiği gibi, her faktör seviyesinin ortalama Gri ilişkisel derecelerini hesaplamak için yanıt tablosu kullanılmıştır. Gri ilişkisel dereceler, referans ve karşılaştırılabilirlik dizileri arasındaki korelasyon seviyesini temsil ettiğinden, daha büyük Gri ilişkisel derece, referans dizisi ile daha güçlü bir korelasyon sergileyen karşılaştırılabilirlik dizisi anlamına gelir (Tosun, 2006).

Tablo 9. Faktör ve Seviyelerinin Gri İlişki Derecesi

Seviyeler	**Faktörler**			
	A	**B**	**C**	**D**
Seviye 1	0,562	0,390	0,571	0,543
Seviye 2	0,688	0,486	0,569	0,561
Seviye 3		0,791	0,526	0,562

Bu verilere dayanarak, en büyük ortalama yanıtı sağlayan seviyelerin bir kombinasyonu seçilebilir. Tablo 9'da, A2, B3, C1 ve D3 kombinasyonu, sırasıyla A, B, C ve D faktörleri için Gri ilişkisel derecenin en büyük değerini göstermektedir. Bu nedenle, A2B3C1D3 (Şekil 7) şeklinde yazılabilir. A'nın 2. seviyesi, B'nin 3. seviyesi, C'nin 1. seviyesi ve D'nin 3. seviyesi anlamına gelmektedir. Kaplamalı kesici takım, 25 m/dak kesme hızı, 26 mm/dak ilerleme hızı, 140° matkap ucu açısı, delme operasyonlarının en uygun parametre kombinasyonudur. Bu sonuçlar Taguchi analizinde bulunan optimum seviye kombinasyonunu doğrulamaktadır. Aynı zamanda faktör düzeylerinin Ra üzerindeki etkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Gri İlişkisel Analize Göre Faktör Düzeylerinin Ra Üzerindeki Etkisi

SONUÇLAR

Inconel 718 süper alaşımı mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı özellikle havacılık alanında yüksek sıcaklıklar altında çalışan kritik parçalarda kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan yüksek pürüzlülük değerleri malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar ve korozyona sebep olmaktadır. Bu nedenle işlenmiş yüzeylerde pürüzlülük değerlerinin minimum olması gerekir. Bu çalışmada da Inconel 718 alaşımının delinmesinde oluşan minium ortalama yüzey pürüzlülüğü için parametreler optimize edilmiştir. Taguchi L18 deney listesine göre deneyler yapılmış ve Ra sonuçlarına göre Taguchi ve gri ilişkisel analiz ile optimizasyon yapılmıştır. Optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Taguchi analizinde en küçük ortalama yüzey pürüzlülüğü 0.779 µm ile 17. deneyde çıkmıştır.
- Taguchi analizinde B parametresi yani kesme hızı ortalama yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre olmuştur.
- A parametresinin en ideal seviyesi 2. seviye olan kaplamalı, B parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 25 m/dk., C parametresinin en ideal seviyesi 1. seviye olan 26 mm/dk ve D parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 140° olarak çıkmıştır. Bu sonuçlara göre optimum parametre seviyelerinin dizilimi A2B3C1D3 olmuştur.
- Gri İlişkisel analizde de Taguchi' de olduğu gibi en etkin parametre kesme hızı çıkmıştır. Optimum parametre seviyeleri de A2B3C1D3 olarak Taguchi ile aynı çıkmıştır.
- ANOVA'da da en etkin faktör %77.29 ile B faktörü (kesme hızı) olmuştur.
- ANOVA'ya göre yapılan bu model %84.23 güven düzeyinde çıkmıştır.

Tartışma

Yapılan deneylerde Ra 0,779 µm ile 1,163 µm arasında gerçekleşmiştir. Süper alaşımlı çeliklerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda bu değer aralığının ideal seviyelerde olduğu görülmektedir (Motorcu vd., 2014). En düşük Ra 17. deneyde olurken Taguchi ve gri ilişkisel analizde en ideal deney şartları 16. deneyde gerçekleşmiştir. Her iki deneyin Ra değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır (deney 17: 0,779 µm-deney 16: 0,799 µm).

Ra'ya en etkin parametre kesme hızı olmuştur. Varyans analizinde kesme hızı %77,29 ile en çok katkı sağlayan parametre olmuştur. Kesme hızı arttıkça Ra değeri düşmüştür. Kesme hızları ideal seviyelerin altında veya üstünde olduğu durumlarda ortalama yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Ekmen, 2021). İlerleme değerlerindeki artış ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Yüksek ilerleme hızlarında Ra değerleri daha büyük çıkmıştır (Kıvak, 2010; Lotfi vd., 2022).

ANOVA'da Ra değerine en çok katkı yapan parametre %77,29 ile kesme hızı olmuştur. Ayrıca varyans analizinin güven aralığı %84,23 olmuştur. Literatüre göre bu değer kabul edilebilir seviyededir (Nas, 2021).

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi kapsamında yapılmıştır. Deneylerin yapılmasına yardımcı olan Makrotek Makina firmasına ve pürüzlülük ölçümlerinde laboratuvar imkanlarını kullanmamızı sağlayan Amasya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akgün, M., & Demir, H. (2021). Optimization of cutting parameters affecting surface roughness in turning of inconel 625 superalloy by cryogenically treated tungsten carbide inserts. *SN Applied Sciences*, 3(2), 1-12. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04303-2

Akkuş, H. (2021). AISI 1040 Çeliğinin İşlenebilirliği Sırasında Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Farklı Tahmin Modelleri ile Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 84-92. https://doi.org/10.17780/ksujes.845344

Akkuş, H. (2022). Experimental and statistical investigations of surface roughness, vibration, and energy consumption values of titanium alloy during machining using response surface method and grey relational analysis. *Scientia Iranica B*, 29(1), 109-119. https://doi.org/10.24200/SCI.2021.57548.5296

Alsoruji, G., Muthuramalingam, T., Moustafa, E. B., & Elsheikh, A. (2022). Investigation and TGRA based optimization of laser beam drilling process during machining of Nickel Inconel 718 alloy. Journal of Materials Research and Technology, 18, 720-730. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.112

Asiltürk, I., & Akkuş, H. (2011). Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 44(9), 1697-1704. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.003

Bademlioglu, A. H., Canbolat, A. S., & Kaynakli, O. (2020). Multi-objective optimization of parameters affecting Organic Rankine Cycle performance characteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 117, 109483. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109483

Benardos, P. G., Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2

Besterfield, D.H., Besterfield, C., Besterfield, G.H., Besterfield, M, (1995). Total quality management. Prentice Hall Inc., New Jersey.

Chen, Y. C., & Liao, Y. S. (2003). Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 269-273. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00792-1

Çiftçi, İ., Gökçe, H. (2019). Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Journal of Polytechnic,* 22(3), 627-631. https://doi.org/10.2339/politeknik.450289

Durairaj, M., Sudharsun, D., Swamynathan, N. (2013). Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel Using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade. *Procedia Engineering*, 64(0), 868-877. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.163

Ekmen, F. H. (2021). Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarında delik delme işlemlerinin araştırılması. *Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Erkan, Ö., & Yücel, E. (2018, November). AA 7075 malzeme üzerine delinen delik yüzeylerinin pürüzlülük optimizasyonu ve istatistiki analizi. In International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech) (pp. 789-795).

Farid, A. A., Sharif, S., & Namazi, H. (2009). Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity when drilling and hole making in Inconel 718. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 564-569. https://www.jstor.org/stable/26282790

Gautam, P. S., Vishnoi, P. K., Gupta, V. K. (2022). A single zone thermodynamic simulation model for predicting the combustion and performance characteristics of a CI engine and its validation using statistical analysis. *Fuel*, 315, 123285. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123285

Gökçe, H., Yavuz, M., Çiftçi, İ. (2020). An invertigation into the performance of HSS drills when drilling commercially pure molybdenum. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences,* 38(1), 61-70. https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/65119/1001557

Jafarian, F., Umbrello, D., Golpayegani, S., Darake, Z. (2016). Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(13), 1683-1691. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090592

Jena, S. P., Mahapatra, S., & Acharya, S. K. (2021). Optimization of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 41, 180-185. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.579

Khanafer, K., Eltaggaz, A., Deiab, I., Agarwal, H., & Abdul-Latif, A. (2020). Toward sustainable micro-drilling of Inconel 718 superalloy using MQL-Nanofluid. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7), 3459-3469. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05112-4

Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K., & Song, Q. (2020). Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy. *Tribology International*, 143, 106084. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106084

Khanna, N., Agrawal, C., Dogra, M., & Pruncu, C. I. (2020). Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of inconel 718 using sustainable machining technique. *Journal of materials research and technology,* 9(3), 5794-5804. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.104

Kıvak, T., Habalı, K., & Şeker, U. (2010). Inconel 718'in delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6684/88477

Kumar, S., Singh, D., Kalsi, N. S. (2017). Experimental investigations of surface roughness of Inconel 718 under different machining conditions. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1179-1185. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.135

Lotfi, M., Farid, A. A., Akbari, J., Sharif, S., & Mohruni, A. S. (2022). Evaluation of surface integrity when drilling Inconel 718 through experimental measurement and finite element analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 119(7), 4237-4248. https://doi.org/10.1007/s00170-021-08354-y

Mohamed, M. F., Lenin, K. (2020). Optimization of Wire EDM process parameters using Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings,* 21, 527-530. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.662

Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. *John wiley & sons.* Inc. Arizona.

Motorcu, A. R., Kuş, A., & Durgun, I. (2014). The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy. *Measurement*, 58, 394-408. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.012

Nas, E., Özbek, O., Bayraktar, F., & Kara, F. (2021). Experimental and statistical investigation of machinability of AISI D2 steel using electroerosion machining method in different machining parameters. *Advances in Materials Science and Engineering, 1-17*. https://doi.org/10.1155/2021/1241797

Ozcelik, B., Oktem, H., Kurtaran, H. (2005). Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(3), 234-241. https://doi.org/10.1007/s00170-004-2175-7

Özlü, B., Akgün, M., & Demir, H. (2019). AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 5(2), 151-158. https://dergipark.org.tr/en/pub/gmbd/issue/48368/548363

Sahoo, A. K., Jeet, S., Bagal, D. K., Barua, A., Pattanaik, A. K., & Behera, N. (2022). Parametric optimization of CNC-drilling of Inconel 718 with cryogenically treated drill-bit using Taguchi-Whale optimization algorithm. *Materials Today: Proceedings,* 50, 1591-1598. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.121

Selvan, T. A., Kotha, M. S., Chinamilli, N. S., Dattatreya, G. G., Rajesh, S., Akshey, P. B., & Madhankumar, S. (2022). Taguchi-based grey relational study for multiple criterion optimization on process variables for micro Electro-chemical Machining of Inconel Super-alloy. *Materials Today: Proceedings*, 62, 882-888. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.060

Shah, D. R., Pancholi, N., Gajera, H., Patel, B. (2022). Investigation of cutting temperature, cutting force and surface roughness using multi-objective optimization for turning of Ti-6Al-4 V (ELI). *Materials Today: Proceedings*, 50, 1379-1388. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.285

Sheheryar, M., Khan, M. A., Jaffery, S. H. I., Alruqi, M., Khan, R., Bashir, M. N., & Petru, J. (2022). Multi-Objective Optimization of Process Parameters during Micro-Milling of Nickel-Based Alloy Inconel 718 Using Taguchi-Grey Relation Integrated Approach. *Materials,* 15(23), 8296. https://doi.org/10.3390/ma15238296

Singh, P.N., Raghukandan, K., Pai, B.C. (2004). Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al–10%SiCP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156(0), 1658-1661. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.322

Tosun, N. (2006). Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 450-455. https://doi.org/10.1007/s00170-004-2386-y

Yaka, H., Uğur, L., & Akkuş, H. (2016). AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün çoklu regresyon ile incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 16(3), 770-775. https://doi.org/10.5578/fmbd.34280

Yavuz, M., Gökçe, H., Çiftçi, İ., Gökçe, H., Yavaş, Ç., Şeker, U. (2020). Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 106, 4623–4633. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04843-3

Yessian, S., & Varthanan, P. A. (2020). Optimization of performance and emission characteristics of catalytic coated ic engine with biodiesel using grey-taguchi method. *Scientific reports*, 10(1), 1-13. https://doi.org/10.1038/s41598-019-57129-9

Yurtkuran, H., Korkmaz, M.E., Günay, M. (2016). Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert. *Gazi University Journal of Science,* 29(4), 987-995. https://dergipark.org.tr/en/pub/gujs/issue/27537/289712

Zhu, D., Zhang, X., & Ding, H. (2013). Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 64, 60-77. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001

Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Zheng, Y., Chen, L. (2018). Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 259(April), 270–281. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.044