



## Ultrasonik Atomizasyon Esasına Dayalı Minimum Miktar Yağlama (UMMY) Sistemi İle Tornalamada UMMY Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkisi

Ramazan MERGEN<sup>1,\*</sup> , Fırat KAFKAS<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 26.10.2023

**Kabul:** 26.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Ultrasonik atomizasyon  
esaslı minimum miktar  
yağlama (UMMY)  
Kesme kuvveti  
Talaş büzüşme katsayısı  
Gri ilişki analizi  
AISI 1050

### ÖZET

Ultrasonik atomizasyon esasına dayalı minimum miktar yağlama (UMMY) sistemi, takım-talaş ara yüzüne etkili bir şekilde nüfuz ederek kesme bölgesini soğutmada ve işleme performansının artmasında etkinlik kazanmıştır. UMMY sisteminin performansını, kesme sıvısı konsantrasyon oranı (A), nozul orifis çapı (B), yatay nozul açısı (C), dikey nozul açısı (D), nozul mesafesi (E), hava basıncı (F), kesme sıvısı atomizasyon oranı (G) ve nozul tipi (H) gibi UMMY işleme parametreleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmanın amacı, UMMY işleme parametrelerinin ortalama kesme kuvveti (Fc) ve talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkilerini araştırmak ve optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemektir. Bu amaçla UMMY sistemi ile AISI 1050 çeliğin tornalanması, Taguchi L27 ortogonal deney tasarımına göre CNC torna tezgâhında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tekniklerine göre UMMY işleme parametrelerinin Fc ve  $\zeta$  üzerine etkisi varyans analizi kullanılarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, en düşük Fc ve  $\zeta$  değerleri kısa nozulla (K) yapılan işlemede elde edilmiştir. Fc üzerine en fazla %29.20 değeriyle kesme sıvısı konsantrasyon oranı katkı sağlamıştır. Nozul orifis çapı, yatay nozul açısı ve dikey nozul açısı değerlerinin artmasıyla  $\zeta$  değerinin arttığı tespit edilmiştir. Çoklu yanıt yöntemi kullanılarak yapılan gri ilişki analizinde optimum UMMY işleme parametrelerinin seviyeleri A2B1C2D3E2F3G1H2 şeklindedir.

## Effect of UMQL Parameters on Cutting Force and Chip Compression Coefficient in Turning with Minimum Quantity Lubrication Based on Ultrasonic Atomization System (UMQL)

### ARTICLE INFO

**Received:** 26.10.2023

**Accepted:** 26.11.2023

#### Keywords:

Ultrasonic atomization  
based minimum quantity  
lubrication (UMQL)  
Cutting force  
Chip compression  
coefficient  
Grey relational analysis  
AISI 1050

### ABSTRACT

Minimum quantity lubrication system based on ultrasonic atomization (UMQL) has gained effectiveness in cooling the cutting zone and increasing machining performance by effectively penetrating the tool-chip interface. UMQL machining parameters such as cutting fluid concentration ratio (A), nozzle orifice diameter (B), horizontal nozzle angle (C), vertical nozzle angle (D), nozzle distance (E), air pressure (F), cutting fluid atomization ratio (G) and nozzle type (H) significantly affect the performance of the UMQL system. The aim of this study is to investigate the effects of UMQL machining parameters on average cutting force (Fc) and chip compression coefficient ( $\zeta$ ) and to determine the optimum UMQL machining parameters. For this purpose, the turning of AISI 1050 steel with the UMQL system was carried out according to the Taguchi L27 orthogonal experimental design on a CNC lathe. The effect of UMQL machining parameters on Fc and  $\zeta$  was determined using analysis of variance according to Taguchi experimental techniques. As a result of the study, the lowest Fc and  $\zeta$  values were obtained in the machining performed with a short nozzle (K). Cutting fluid concentration ratio contributed the most to Fc with a value of 29.20 %. It was determined that the  $\zeta$  value increased as the nozzle orifice diameter, horizontal nozzle angle and vertical nozzle angle values increased. In the grey relational analysis using the multiple response method, the optimum UMMY machining parameters levels were A2B1C2D3E2F3G1H2.

\*Sorumlu yazar, e-posta: ramazan.mergen@gazi.edu.tr

To cite this article: R. Mergen, F. Kafkas, Ultrasonik Atomizasyon Esasına Dayalı Minimum Miktar Yağlama (UMMY) Sistemi İle Tornalamada UMMY Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkisi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 137-154, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1381848>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal işlemede, kesme sıvılarının atomize edilerek takım-talaş ara yüzüne etkili bir şekilde nüfuz etmesi oldukça önemlidir [1]. Takım-talaş ara yüzünün soğutulması ve yağlanması açısından da daha çok fayda sağlamaktadır [2-4]. İşleme sırasında meydana gelen yüksek kesme sıcaklıkları, takım aşınmasının artmasına ve ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Oluşan olumsuzlukların giderilmesi ve kesmede oluşan sıcaklıkların düşürülmesi için kesme sıvıları kullanılmaktadır [5]. Geleneksel sulu soğutma, yüksek basınç soğutma, kriyojenik soğutma, minimum miktarda yağlama (MMY) ve yakın zamanda önerilen ultrasonik atomizasyon esaslı kesme sıvısı püskürtme sistemleri gibi çeşitli soğutma sistemleri, işleme sırasında meydana gelen sıcaklık sorunlarını gidermek için uygulanmıştır [6,7]. Fazla miktarda kullanılan kesme sıvısının, insan sağlığı ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri vardır [8,9]. Kesme sıvılarıyla ilgili bu tür olumsuzlukları gidermek ya da en aza indirmek için araştırmacılar, çeşitli alternatifler üzerinde sürekli olarak çalışmaktadırlar. Bunun yanında kesici takım malzemelerindeki gelişmelerle birlikte kuru işlemeye olan ilgiyi de artırmıştır [8,10]. Fakat ağır kesme koşullarında yüksek işleme verimliliği ve ürün kalite özellikleri isteniyorsa, bu durumda kuru işlemenin etkinliği azalmaktadır. Bunun yerine takım-talaş temas alanına yüksek basınçla birlikte çok az miktarda kesme sıvısının iletildiği minimum miktarda yağlama (MMY) uygun bir alternatif olarak kullanılmaktadır [11,12]. Talaşlı imalatla, MMY sisteminin etkinliğini ve verimliliğini artırmak ve bu sistemde kullanılan kesme sıvısının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için daha çok hibrit MMY sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı üzerine çalışmalar artmıştır [13,14]. Özellikle ultrasonik atomizasyon esaslı minimum miktarda yağlama (UMMY) ile soğutma, yüksek kesme sıcaklıklarının meydana geldiği işlemlerde yüksek ısı transfer kapasitesi, düşük miktarda soğutucu kullanımı gibi avantajları olan etkili bir soğutma-yağlama yöntemidir [6,15-17]. Çok az miktarda kesme sıvısı kullanılan UMMY sisteminde, işleme performansı artmaktadır. Geleneksel soğutmada kesme sıvısının kesme bölgesine yeterince nüfuz edememesi nedeniyle işleme etkisiz olmakta ve yeterince ekonomik ve çevre dostu da olamamaktadır [18,19]. UMMY sistemleri verimli ve güçlü bir soğutma sistemi olarak kabul görmüştür. Geleneksel sulu işleme, kuru işleme ve basınçlı hava ile işlemeye göre en düşük yüzey pürüzlülüğünün olduğu [20], kesme kuvvetini ve kesme sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğü bir sistem olarak kullanılmaktadır [21]. UMMY sisteminin verimliliğini arttırmak, daha iyi soğutma-yağlama sağlamak ve daha az sıvı tüketimi için UMMY işleme parametreleri üzerinde de çalışmalar yapılmıştır [15,17,22]. Kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tipi şeklinde sıralanabilecek UMMY işleme parametreleri, sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Uygun kesme sıvısı konsantrasyon oranının kullanılması, kesme sıcaklığını ve kesme kuvvetlerini düşürmekte, ayrıca takım ömrünün arttırılmasında da oldukça etkili olmaktadır [23]. Nozul orifis çapı, püskürtme açısını etkilemekte olup, nozul çapı büyüdükçe püskürtme açısı da büyümektedir [24]. Püskürtme açısındaki artış, daha iyi bir atomizasyon sağlamak ve soğutma-yağlama alanını arttırmaktadır [25]. Nozulun hem yatay hem de dikey düzlemde 45°'lik açısının kesici takım-iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve kesme sıcaklığını düşürmek için en iyi seçim olduğu belirtilmiştir [26, 27]. Ancak bazı çalışmalarda yatay nozul açısının talaş akış yönüne bağlı olarak performansı etkileyebileceği, bu nedenle uygun eğim açısını belirlemek için değiştirilebileceği de ifade edilmiştir [28, 29]. Nozul mesafesinin, talaş hareketini engellemeyecek şekilde seçilmesi ve yağ sisinin güçlü bir şekilde kesme bölgesine ulaştırarak şekilde konumlanması gerekmektedir [30, 31]. Atomizasyon sırasında oluşan çok küçük damlacıkların boyutu, esas olarak hava basıncına bağlı olarak değişmektedir. Hava basıncındaki artış, damlacık çapının azalmasına neden olmakta ve bu, takım-talaş temas bölgesine yağ sisinin etkili bir şekilde nüfuz etmesini kolaylaştırmaktadır [32]. Kesme sıvısı atomizasyon oranındaki artış, kesme bölgesine daha fazla yağlayıcı sağladığı için takım-talaş ara yüzündeki sürtünmeyi azaltmakta ve talaşın takım-talaş yüzeyine ve işlenmiş yüzeye yapışması azaltılmaktadır. Bunun sonucunda kesme işlemi kolaylaşmaktadır [33]. Soğutma sıvısı damlacık çapının mümkün olduğunca küçük, damlacık hızının mümkün olduğunca yüksek olduğu ve bu çok küçük

damlacıkların kesme bölgesine etkili bir şekilde nüfuzunu sağlayacak nozulların seçilmesi oldukça önem arz etmektedir [34].

Talaşlı imalat işleminde  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemek için yapılan tornalama deneyleri, silindirik AISI 1050 sade karbonlu çelik malzeme kullanılarak, sabit kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinde, her bir UMMY işleme parametresi ise üçer seviyede alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Kafkas [35] tarafından tasarlanıp geliştirilen ve daha önce farklı soğutma koşulları ile karşılaştırılması yapılan UMMY sistemi esas alınmıştır. Taguchi L27 ortogonal deney tasarım metoduna göre planlanan tornalama deneyleri, CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına etki eden her bir UMMY işleme parametresinin etki oranını tespit etmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemek için ise, gri ilişki analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada, kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tipi gibi UMMY işleme parametrelerinin, kesme kuvveti ( $F_c$ ) ile talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkisi araştırılmış ve en iyi kalite gereksinimlerini, hedeflerini karşılayacak optimum UMMY işleme parametrelerinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Araştırma sonucunda bulunacak optimum UMMY işleme parametreleri sayesinde, işlenen malzemeler için azami oranda kalite ve verimin elde edilebilmesi için yol gösterici olması, ayrıca daha ekonomik, kullanımı kolay, insan ve çevre sağlığına duyarlı basit bir UMMY sisteminin kullanılabilirliğini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bunun yanında, mevcut çalışmalarda çok sayıda UMMY işleme parametresinin aynı anda etkisini değerlendirecek bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu alanda yapılacak çalışmalara da katkı sağlamak amaçlanmıştır.

## 2. İŞLEME PARAMETRELERİ VE TAGUCHI ANALİZİ (MACHINING PARAMETERS AND TAGUCHI ANALYSIS)

Taguchi L<sub>27</sub> deney tasarımı, UMMY işleme parametrelerinin en uygun seviyelerini tespit etmek için yapılmıştır. Ayrıca, en önemli değişkenleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA: Analysis of Variance) yapılmıştır. Varyans analizi ile UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkileri ve farklı seviyedeki değerlerin nasıl bir değişikliğe sebep olduğunun anlaşılması amaçlanmıştır.

Kesme parametrelerinden; kesme hızı ( $V_c=100$  m/dak), ilerleme ( $f=0.15$  mm/dev) ve kesme derinliği ( $a_p=1$  mm) sabit olarak alınmıştır. Bu değerler, takım üreticilerinin tavsiyeleri temel alınarak seçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan UMMY işleme parametreleri ve bu parametrelerin her seviyedeki değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan UMMY işleme parametreleri ve değerleri (UMQL machining parameters and values used in the experimental study)

UMMY işleme parametreleri	Kod	Seviye		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Kesme sıvısı konsantrasyon oranı (%)	A	5	10	15
Nozul orifis çapı (mm)	B	0.8	1	1.2
Yatay nozul açısı ( $^{\circ}$ )	C	15	30	45
Dikey nozul açısı ( $^{\circ}$ )	D	15	30	45
Nozul mesafesi (mm)	E	15	20	30
Hava basıncı (bar)	F	4	5	6
Kesme sıvısı atomizasyon oranı (ml/dk)	G	0.5	1	1.5
Nozul tipi*	H	U	K	V

\*U:Uzun nozul, K: Kısa nozul V: Vakum nozul

Taguchi analiz yöntemi, mühendislik analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Test sayısının azaltıldığı bu analiz yönteminde, aynı zamanda kontrol dışı faktörlerin etkileri de azaltılır. Ayrıca, işleme sürecinde basit, etkili çözümler sunarak [36], verimli ve sistematik bir yaklaşım sağlar [37, 38]. Taguchi analiz yöntemi, kayıp fonksiyon kullanarak deneysel ve istenen değerler arasındaki sapmayı hesaplayabilir. Bu kayıp fonksiyonu ayrıca bir sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür

[38, 39]. Normal olarak, S/N oranının analizinde en düşük en iyi, en yüksek en iyi ve nominal en iyi olmak üzere üç çeşit kalite özelliği vardır [40]. Bu çalışmada ortalama değerler dikkate alınmış olup en düşük en iyi kalite özelliği kullanılmıştır. En düşük en iyi S/N için;

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

formülü kullanılmaktadır. Burada;  $y_i$ , i. deneyde gözlemlenen veri, n, deneyin gözlem sayısıdır. Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri kullanılarak, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkisini ve optimum işleme parametrelerini belirlemek için Taguchi metodu ile analiz yapılmıştır. Tablo 1’de verilen UMMY işleme parametrelerine göre oluşturulan Taguchi  $L_{27}$  deney planı Tablo 2’de verilmiştir.

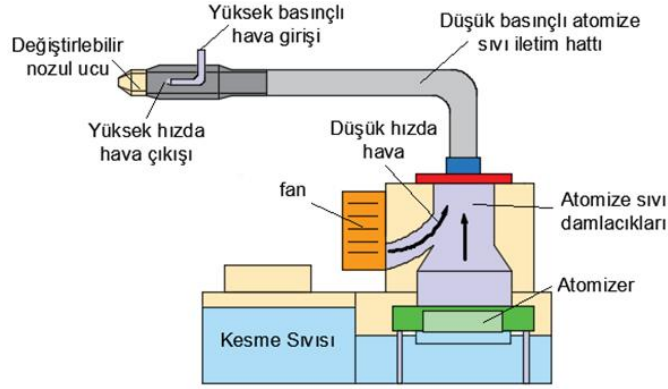
Tablo 2. Taguchi  $L_{27}$  deney düzenine göre oluşturulan deney planı (Experimental plan created according to Taguchi  $L_{27}$  experimental setup)

Deney No	Faktörler							
	A (%)	B (mm)	C (°)	D (°)	E (mm)	F (Bar)	G (ml/dk)	H
1	5	0.8	15	15	15	4	0.5	U
2	5	0.8	15	15	20	5	1	K
3	5	0.8	15	15	30	6	1.5	V
4	5	1	30	30	15	4	0.5	K
5	5	1	30	30	20	5	1	V
6	5	1	30	30	30	6	1.5	U
7	5	1.2	45	45	15	4	0.5	V
8	5	1.2	45	45	20	5	1	U
9	5	1.2	45	45	30	6	1.5	K
10	10	0.8	30	45	15	5	1.5	U
11	10	0.8	30	45	20	6	0.5	K
12	10	0.8	30	45	30	4	1	V
13	10	1	45	15	15	5	1.5	K
14	10	1	45	15	20	6	0.5	V
15	10	1	45	15	30	4	1	U
16	10	1.2	15	30	15	5	1.5	V
17	10	1.2	15	30	20	6	0.5	U
18	10	1.2	15	30	30	4	1	K
19	15	0.8	45	30	15	6	1	U
20	15	0.8	45	30	20	4	1.5	K
21	15	0.8	45	30	30	5	0.5	V
22	15	1	15	45	15	6	1	K
23	15	1	15	45	20	4	1.5	V
24	15	1	15	45	30	5	0.5	U
25	15	1.2	30	15	15	6	1	V
26	15	1.2	30	15	20	4	1.5	U
27	15	1.2	30	15	30	5	0.5	K

### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

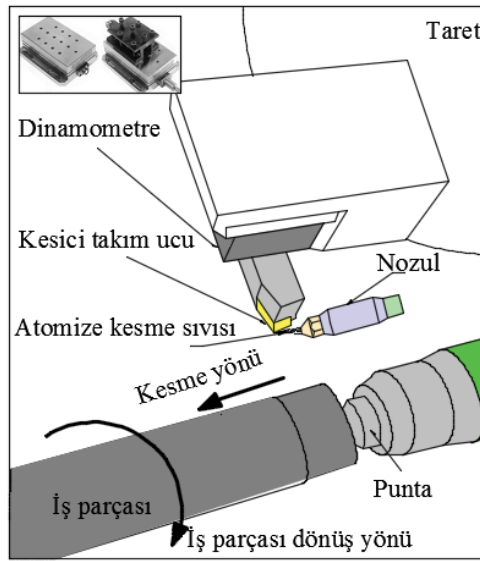
#### 3.1. UMMY Kesme Sıvısı Uygulama Sistemi (UMQL Cutting Fluid Application System)

Kafkas [35] tarafından tasarlanan ve geliştirilen UMMY uygulama sistemi şeması Şekil 1’de gösterilmektedir. Soğutma sıvısının atomizasyonu piezoseramik transdüserler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir fan tarafından oluşturulan düşük hızlı hava akışı, çok küçük sıvı damlacıklarını esnek iletim borusu aracılığıyla nozula ulaştırır. Nozulun merkezinde küçük çaplı bir borudan yüksek hızda hava jetinin uygulandığı bir meme bulunur. Sıvı damlacıklar nozula ulaştığında, yüksek hızlı hava jetine doğru çekilir ve daha sonra kesme bölgesine doğru püskürtülürler. Sistemde kullanılan nozullar değiştirilebilir olduğundan püskürtme modellerinin de farklı nozul geometrileri kullanılarak değiştirilebilir olması sağlanmıştır.



Şekil 1. UMMY uygulama sisteminin şematik görünümü (Schematic view of the UMQL application system)

İş parçasının UMMY sistemi ile işlenebilmesi için Kafkas [35] tarafından tasarlanan ve geliştirilen UMMY uygulaması sistemi deney düzeneği Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. UMMY deney düzeneği (UMQL experimental setup)

### 3.2. Malzeme (Material)

Tornalama deneylerinde iş parçası malzemesi olarak, 135 HB sertliğe sahip AISI 1050 çelik malzeme kullanılmıştır. İşlenmemiş iş parçası Ø100x500 mm boyutlarındadır. İş parçasının bir tarafına punta deliği açılmış ve iş parçası ayna-punta arasında işlenecek şekilde hazır hale getirilmiştir. 50 mm kesme işlemi yapılarak tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. AISI 1050 iş parçasının kimyasal bileşimi Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. AISI 1050 iş parçasının kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 1050 workpiece)

% C	% Mn	% Cr	% Ni	% Si	% Cu	% S
0.43	0.73	0.07	0.09	0.21	0.29	0.04

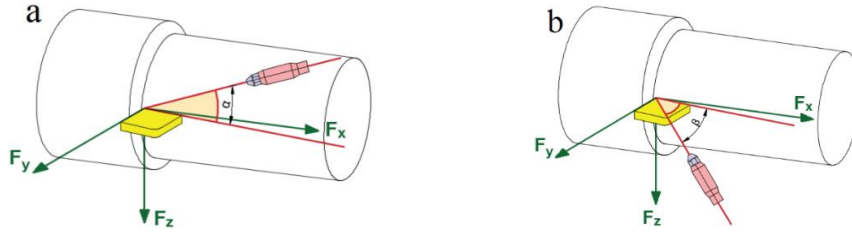
### 3.3. Deney Tezgâhı, Kesici Takım ve Takım Tutucu (Machine Tool, Cutting Tool and Tool holder)

Yapılan deneysel çalışmalarda, Fanuc kontrol ünitesi, JOHNFORD T35 CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. İş parçasının işlenmesi için kesici takım olarak, deney şartlarına uygun, SUMITOMO üretici takım firmasının SNMG 120408-NGU tungsten karbür kesici takım seçilmiştir. Her deney için yeni bir kesici takım kullanılmış olup, eşit kesme uzunluklarında tornalama yapılmıştır. Takım tutucu olarak, yanaşma açısı 75° olan PSBNR 2525M12 formunda takım tutucu kullanılmıştır.

### 3.4. Soğutma Sıvısı ve Nozul Açılıarı (Coolant and Nozzle Angles)

Soğutma sıvısı olarak, suda çözünebilir özellikte yarı sentetik soğutma sıvısı kullanılmıştır. UMMY işleme parametrelerinden yatay nozul açısı (C), nozulun kesici takım talaş yüzeyi ile

yaptığı açığı (Şekil 3.(a)), dikey nozul açısı (D) ise nozulun kesici takım serbest yüzeyi ile yaptığı açığı (Şekil 3.(b)) göstermektedir.



Şekil 3. Yatay nozul açısı (a), dikey nozul açısı (b) (Horizontal nozzle angle (a), vertical nozzle angle (b))

### 3.5. Deneyleerde Kullanılan Nozul Tipleri (Nozzle Types Used in Experiments)

UMMY sisteminde, çok küçük taneciklere sahip atomize kesme sıvısını farklı püskürtme modelleri ile kesme bölgesine nüfuz ettirmek için, Kafkas'ın [35] çalışmasında kullanılan farklı geometrilere sahip değiştirilebilir nozullar kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan değiştirilebilir nozul tipleri (H) Şekil 4'te gösterilmiştir.

Nozul adı	Uzun nozul (U)	Kısa nozul (K)	Vakum nozul (V)
Nozul gösterimi			

Şekil 4. Deneyleerde kullanılan farklı geometrilere sahip nozul tipleri (Nozzle types with different geometries used in experiments) [35]

### 3.6. Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi (Measuring Cutting Force)

Deneyleerde kesme kuvvetini ölçmek için -5...10 kN kuvvet aralığında ölçme yapabilen kuartz KISTLER 9257B tipi dinamometre kullanılmıştır.

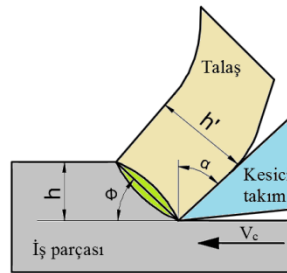
### 3.7. Talaş Büzüşme Katsayısı (Chip Compression Coefficient)

Tornalama işleminde, kesici takımın önündeki malzemeler her taraftan çok büyük kuvvetlerle sıkıştırılır ve talaş deformasyona uğrar. Talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ), işleme sırasında plastik deformasyon kolaylığının bir göstergesidir [41]. Talaş kalınlığı ( $h'$ ) her zaman kesilmemiş talaşın ( $h$ ) kalınlığından daha büyüktür. Talaş kalınlığının kesilmemiş talaş kalınlığına oranı,

$$\zeta = \frac{h'}{h} \quad (2)$$

talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) olarak bilinir (Şekil 5).

( $h = f \cdot \sin(\phi)$ ,  $f$ : İlerleme oranı (mm/dev),  $\phi$ : Takım yaklaşma açısı ( $75^\circ$ ))



Şekil 5. Metal kesme işleminde  $\zeta$ 'in şematik gösterimi (Schematic view of  $\zeta$  in metal cutting)

Deneyleerde, kesme işlemi sonucu oluşan talaşlardan rastgele 10'ar talaş seçilerek her bir talaşın üç farklı noktasından talaş kalınlıkları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ölçülen talaş kalınlığı değerlerinin ortalaması alınarak talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) hesaplanmıştır.

### 3.8. Gri İlişki Analizi (Grey Relational Analysis)

Taguchi tabanlı gri ilişki analizi, karmaşık yapıya sahip çoklu yanıt sistemlerinin analizinde kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Gri ilişki analizinde, deneysel sonuçlar ilk önce sıfır ile bir arasında normalleştirilir. Ardından, gri ilişki katsayısı hesaplanır. Daha sonra, her süreç cevabına karşılık gelen gri ilişki katsayısının ortalaması alınarak gri ilişki derecesi hesaplanır. Çoklu süreç yanıtlarının genel değerlendirmesi, gri ilişki derecesine dayalıdır. Sonuç olarak, karmaşık çoklu işlem yanıtlarının optimizasyonu, tek bir gri ilişki derecesinin optimizasyonuna dönüştürülebilir. Başka bir deyişle, gri ilişki derecesi, çoklu yanıt süreci için deneysel verilerin genel değerlendirmesi olarak ele alınabilir [42-45].

Tornalama işlemi sırasında düşük kesme kuvveti ve talaş büzüşme katsayısı daha iyi performans sağlar. Bu nedenle gri ilişki analizi yöntemine göre referans seriler oluşturulurken minimum değerler dikkate alınır. Normalizasyon değerlerini elde etmek için Eş. 3 kullanılır.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3)$$

$x_i^0(k)$  orijinal veri sırasını,  $x_i(k)$  normalize edilmiş veriyi belirtir.  $\max x_i^0(k)$  maksimum  $x_i(k)$ 'i temsil eder,  $\min x_i^0(k)$  minimum  $x_i(k)$  değerlerini temsil eder ve istenen hedef değeri temsil eder.

Gri ilişki analizinde, iki sistem veya iki dizi arasındaki ilişkinin ölçüsü gri ilişki derecesi olarak tanımlanır. Referans dizisi olarak yalnızca bir dizi,  $x_0(k)$  mevcut olduğunda ve diğer tüm diziler karşılaştırma dizileri olarak hizmet verdiğinde buna yerel gri ilişki ölçümü denir. Veri ön işleme yapıldıktan sonra,  $\xi_i(k)$  deneydeki k. performans karakteristikleri için gri ilişki katsayısı  $i(k)$  olarak ifade edilebilir [42-46]:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (4)$$

burada  $\Delta_{0i}(k)$ , referans dizisinin ve karşılaştırılabilirlik dizisinin sapma dizisidir.

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{min} = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (6)$$

$$\Delta_{max} = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (7)$$

$x_0(k)$  referans sırasını ve  $x_i(k)$  karşılaştırılabilirlik sırasını belirtir.  $\xi$  ayırt edici veya tanımlama katsayısıdır.  $\xi \in [0, 1]$ .  $\xi$  değeri ne kadar küçükse ve ayırt edici yetenek o kadar büyüktür. Genellikle  $\xi = 0.5$  kullanılır. Gri ilişki katsayı türetildikten sonra, gri ilişki katsayıların ortalaması alınarak gri ilişki derecesi elde edilir [42,43,47]. Gri ilişki derecesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (8)$$

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda,  $F_c$  değerleri ölçülerek ortalaması alınmıştır. Ölçülen talaş kalınlıkları değerlerine göre de  $\zeta$  hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkilerinin en küçük en iyidir kalite özelliğine göre ana etki grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerle UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkisinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Varyans analizi ile UMMY işleme parametrelerinin serbestlik derecesi, kareler toplamı, kareler ortalaması, F değeri, P değeri ve % katkı oranı değerleri bulunmuştur. % katkı oranı dikkate alınarak UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine ne oranda katkısının bulunduğu, hangi parametrenin en fazla katkısının olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda, gri ilişki analizi yöntemiyle optimum UMMY işleme parametreleri belirlenmiştir. Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre gerçekleştirilen

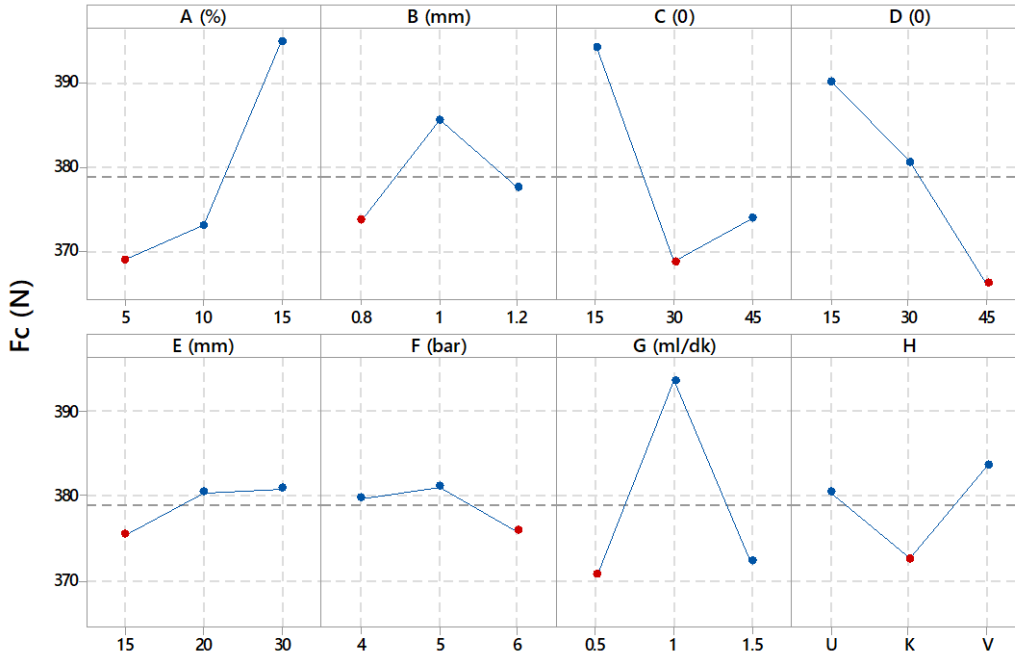
deneyler sonucunda elde edilen ortalama  $F_c$  ve  $\zeta$  deney sonuçlarını ve bu sonuçlara göre oluşan S/N oranlarını Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve S/N oranları değerleri (The results of experiments and S/N ratios values)

Deney No	Deney sonuçları		S/N oranları (dB)		Deney No	Deney sonuçları		S/N oranları (dB)	
	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$		$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$
1	387.84	2.38	-51.77	-7.52	15	389.31	2.43	-51.81	-7.72
2	393.51	2.27	-51.90	-7.12	16	389.92	2.37	-51.82	-7.49
3	389.03	2.34	-51.80	-7.38	17	385.38	2.37	-51.72	-7.49
4	361.43	2.37	-51.16	-7.49	18	390.55	2.40	-51.83	-7.61
5	376.20	2.38	-51.51	-7.52	19	396.90	2.36	-51.97	-7.47
6	363.49	2.37	-51.21	-7.49	20	381.21	2.38	-51.62	-7.52
7	325.27	2.44	-50.24	-7.74	21	380.19	2.37	-51.60	-7.49
8	392.99	2.38	-51.89	-7.55	22	401.10	2.36	-52.07	-7.47
9	331.23	2.40	-50.40	-7.61	23	405.75	2.37	-52.17	-7.49
10	319.94	2.42	-50.10	-7.69	24	404.61	2.35	-52.14	-7.44
11	321.71	2.38	-50.15	-7.52	25	411.33	2.36	-52.28	-7.47
12	392.56	2.38	-51.88	-7.52	26	384.46	2.42	-51.70	-7.69
13	385.27	2.38	-51.72	-7.52	27	387.55	2.38	-51.77	-7.52
14	382.97	2.41	-51.66	-7.63					

#### 4.1. UMMY İşleme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Üzerine Etkileri (Effects of UMQL Machining Parameters on Cutting Force)

Deney sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  üzerine etkilerinin en küçük en iyidir kalite özelliğine göre ana etki grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  üzerine etki grafikleri (Effect graphs of UMQL machining parameters on  $F_c$ )

Şekil 6'daki grafikler incelendiğinde, 1. seviyedeki %5 kesme sıvısı konsantrasyon oranına sahip soğutma sıvısı kullanılarak yapılan işlemede, en küçük  $F_c$  değeri oluşmuştur. Konsantrasyon oranı arttıkça  $F_c$  değerlerinin de arttığı görülmüştür. Daha düşük konsantrasyon oranına sahip kesme sıvısının atomize olma oranı, diğerlerine göre daha yüksektir. Atomize olma oranının artmasıyla, daha küçük çapta buhar tanecikleri üretilmektedir. Bu çok küçük buhar tanecikleri, takım-talaş ara yüzüne çok etkili nüfuz ederek, çok etkili soğutma sağlamakta, aynı zamanda bu bölgede daha ince akışkan filmi tabakası oluşturmaktadır. Böylece kesme bölgesinde sürtünme kuvveti azalmaktadır. Sürtünme kuvvetinin azalmasına bağlı olarak,  $F_c$  değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. En



düşük  $F_c$  değeri, 1. seviyedeki 0.8 mm nozul orifis çapında meydana gelmiştir. Nozul orifis çapının küçülmesi, orifis ucunda basıncın artmasına ve daha küçük çapta buhar damlacıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Daha küçük buhar damlacıkları, kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmektedir. Ayrıca nozul orifis çapının küçük olması, püskürtme açısını da küçültmekte ve çok küçük buhar damlacıklarının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesini olumlu yönde geliştirmektedir. Bu durumda daha etkili bir soğutma-yağlama sağlanmakta ve  $F_c$  değerlerinin düşmesine neden olmaktadır.  $30^\circ$  yatay nozul açısı (2. Seviye) ve  $45^\circ$  dikey nozul açısında (3. Seviye) en küçük  $F_c$  değerleri elde edilmiştir. Bu açı değerlerinde atomize olmuş çok küçük buhar damlacıklarının, takım-talaş ara yüzüne nüfuzunun oldukça etkili olduğu anlamına gelmektedir. Nozul mesafesinin 15 mm (1. Seviye) olduğu durumda, en küçük  $F_c$  değeri elde edilmiştir. Nozul mesafesi arttıkça,  $F_c$  değerleri de artmıştır. Nozul mesafesinin damlacık hızı ve çapı üzerinde bir etkisi bulunmaktadır. Kısa mesafenin, damlacıkların takım-talaş ve takım-iş parçasının temas bölgelerine etkili nüfuz etmelerine yardımcı olduğu için fayda sağlamaktadır. Ancak nozul mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda, sis damlacıkları kesme bölgesine etkili nüfuz edemez, ayrıca talaş hareketinde engellenmeler meydana gelir. Bu mesafe daha büyükse püskürtme açısının artmasının da etkisiyle kesme bölgesine daha az sıvı etki edecektir. Bu da soğutma ve yağlamanın yetersiz olmasına, ayrıca  $F_c$  değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 3. seviyedeki 6 bar basınçta en düşük  $F_c$  değeri elde edilmiştir. Basıncın artması ile birlikte damlacık hızı artmış ve damlacık çapı azalmıştır. Ayrıca basınç arttıkça damlacık sayısı da artmıştır. Yüksek basınç ile elde edilen fazla miktarda oldukça küçük damlacıklar, takım-talaş ara yüzünde etkili yağlamaya katkıda bulunarak sürtünmeyi ve dolayısıyla  $F_c$  değerlerini azaltmıştır. En düşük  $F_c$  değeri, 0.5 ml/dk (1. seviye) sıvı atomizasyon oranında elde edilmiştir. Atomizasyon oranındaki artışla birlikte damlacık hızı artmakta ve damlacık çapı azalmaktadır. Yağ damlacıklarının geri esneme etkisinden dolayı ara yüze giremezler ve yeterli yağlama sağlanamaz. Böylece daha düşük yağlama için sürtünmeden kaynaklanan ısı üretilir. Sonuçta  $F_c$  değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri, Şekil 4'te detayı verilen kısa nozul (K) tipinin kullanımında meydana gelmiştir. Kısa nozulun kesme bölgesine göre konumu itibarıyla, spreyi belirli bir noktaya odakladığından sistemin soğutma ve yağlama performansını oldukça iyi sağladığı görülmüştür. Ayrıca, nozul geometrilerinin sprey geometrileri üzerine önemli bir etkisi bulunmaktadır. Kısa nozulla işlemede kesme sıvılarının etkili bir şekilde soğutma sağlayabilmesi için, küçük püskürtme açısının yanı sıra kesme bölgesine yüksek sıvı akışı sağlanmıştır.  $F_c$  için hesaplanan UMMY işleme parametreleri dağılımı Tablo 5'te verilmiştir. Koyu olarak ifade edilen değerler en düşük  $F_c$  değerlerini göstermektedir.

Tablo 5. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için optimum değerleri ve seviyeleri (Optimum values and levels of UMQL machining parameters for  $F_c$ )

Seviye	A (%)	B (mm)	C ( $^\circ$ )	D ( $^\circ$ )	E (mm)	F (bar)	G (ml/dk)	H
1	<b>369.0</b>	<b>373.7</b>	394.2	390.1	<b>375.4</b>	379.8	<b>370.8</b>	380.5
2	373.1	385.6	<b>368.7</b>	380.6	380.5	381.1	393.8	<b>372.6</b>
3	394.8	377.6	373.9	<b>366.1</b>	380.9	<b>375.9</b>	372.3	383.7
Mak-Min	25.8	11.9	25.4	24.0	5.5	5.2	23.1	11.1
Sıra	1	5	2	3	7	8	4	6
Optimum işleme parametreleri	A1B1C2D3E1F3G1H2							

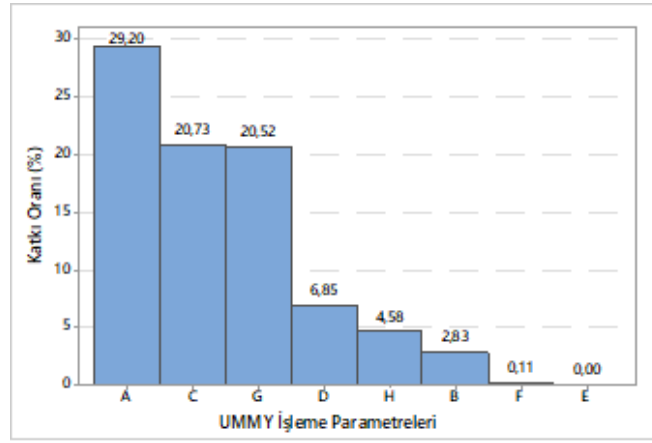
$F_c$  için ANOVA sonuçları, Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da gösterilen ANOVA sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için etki seviyeleri belirlenmiştir. Buna göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için  $P < 0.05$  olması gerekir. ANOVA tablosundan anlaşılacağı gibi  $F_c$  için istatistiksel olarak en anlamlı UMMY işleme parametresi  $P = 0.005$  değeri ile kesme sıvısı konsantrasyon oranı (A) olmuştur.

Tablo 6.  $F_c$  için ANOVA sonuçları (ANOVA results for  $F_c$ )

UMMY İşleme Parametreleri	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	KaO (%)
A (%)	2	3331.00	1665.50	9.61	0.005	29.20
B (mm)	2	322.37	161.19	0.93	0.426	2.83
C (°)	2	2364.12	1182.06	6.82	0.014	20.73
D (°)	2	781.41	390.70	2.25	0.155	6.85
E (mm)	2	0.01	0.01	0.00	1.000	0.00
F (bar)	2	12.18	6.09	0.04	0.966	0.11
G (ml/dk)	2	2340.23	1170.12	6.75	0.014	20.52
H	2	522.84	261.42	1.51	0.268	4.58
Hata	10	1732.67	173.27			15.19
Toplam	26					100.00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, KaO: Katkı oranı

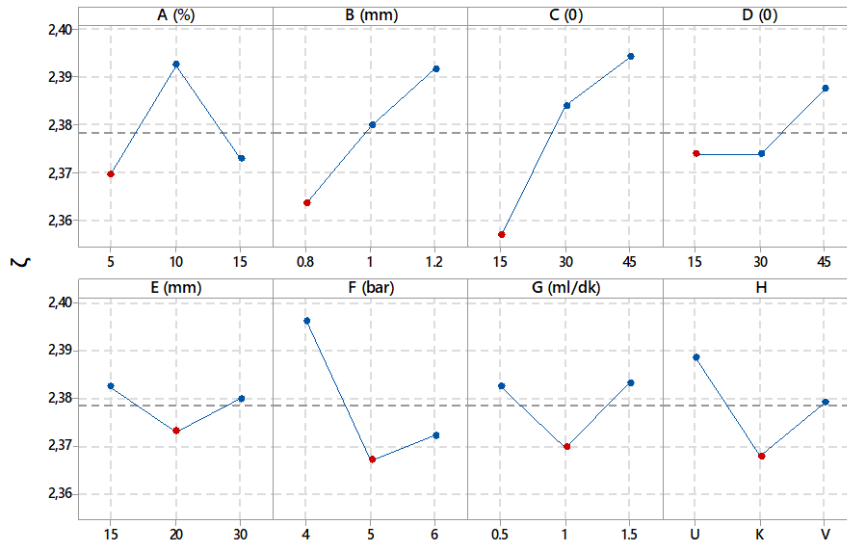
Şekil 7’de UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için katkı oranları grafiği verilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 7’deki % katkı oranları dikkate alındığında  $F_c$  üzerinde en önemli ve etkili olan UMMY işleme parametresinin %29.20 değeriyle kesme sıvısı konsantrasyon oranının (A) olduğu görülmektedir.



Şekil 7. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için katkı oranları grafiği (Graph of contribution ratios of UMQL machining parameters for  $F_c$ )

#### 4.2. UMMY İşleme Parametrelerinin Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkileri (Effects of UMQL Machining Parameters on Chip Compression Coefficient)

$\zeta$ 'nin deney sonuçlarına göre hesaplanan değerleri Şekil 8’deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 8. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  üzerine etki grafikleri (Effect graphs of UMQL machining parameters on  $\zeta$ )

%5 (1. seviye) konsantrasyon oranına sahip soğutma sıvısı ile işlemede, en düşük  $\zeta$  değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Kesme bölgesinde  $F_c$  kuvvetinin azalmasına bağlı olarak,  $\zeta$  değerlerinde düşüşün meydana geldiği görülmüştür. En düşük  $\zeta$  değerleri 0.8 mm (1. seviye) nozul orifis çapında meydana gelmiştir. Nozul orifis çapı arttıkça  $\zeta$  değerleri de artmaktadır. Nozul orifis çapının küçülmesi, orifis ucunda basıncın artmasına ve atomize olmuş kesme sıvısının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesine sebep olmaktadır. Ayrıca nozul orifis çapının küçük olması, püskürtme açısını da küçültmekte ve çok küçük buhar damlacıklarının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesini sağlamaktadır. Bu durumda daha etkili bir soğutma ve yağlama sağlanmakta ve  $\zeta$  değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. En küçük  $\zeta$  değerleri ise  $15^\circ$  yatay nozul açısı ve  $15^\circ$  dikey nozul açısında elde edilmiştir. Bazı araştırmacılar küçük yatay nozul açılarındaki takım yan yüz aşınması bakımından en iyi performansı verdiğini ve optimum yatay nozul açısı olduğunu kaydetmişlerdir. Bu küçük yatay nozul açısının, kesme sıvısının kesme bölgesine, özellikle takım ve iş parçası arasındaki temas bölgesine en verimli şekilde püskürtülmesini sağlamanın bir sonucu olabileceğini ifade etmişlerdir [29]. Bu durum aynı zamanda  $\zeta$  değerini de azaltmaktadır. Nozul mesafesinin 20 mm olduğu durumda (2. seviye), en küçük  $\zeta$  değeri elde edilmiştir. Kısa mesafenin, damlacıkların takım-talaş ve takım-iş parçasının temas bölgelerine etkili nüfuz etmelerine yardımcı olduğu için fayda sağlamaktadır. Ancak nozul mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda, sis damlacıkları kesme bölgesine etkili nüfuz edemez, ayrıca talaş hareketinde engellenmeler meydana gelir. Bu mesafe daha büyükse püskürtme açısının artmasının da etkisiyle, kesme bölgesine daha az sıvı etki edecektir. Bu da soğutma ve yağlamanın yetersiz olmasına, ayrıca  $\zeta$  değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 2. seviye değeri olan 5 bar basınçta, en düşük  $\zeta$  değeri elde edilmiştir. 5 bar ve 6 bar arasında ihmal edilecek kadar az bir fark oluşmuştur. Bu durumda en düşük  $\zeta$  değerleri yüksek basınçlarda elde edildiği söylenebilir. Basıncın artması ile birlikte, damlacık hızı artmış ve damlacık çapı azalmıştır. Ayrıca basınç arttıkça damlacık sayısı da artmıştır. Yüksek basınç ile elde edilen çok küçük damlacıklar, takım-talaş ara yüzünde etkili yağlamaya katkıda bulunarak sürtünmeyi ve dolayısıyla  $\zeta$  değerlerini azaltmıştır. En düşük  $\zeta$  değeri, 1 ml/dk (2. Seviye) sıvı atomizasyon oranında elde edilmiştir. Atomizasyon oranının 0.5 ml/dk'dan (1. seviye) 1 ml/dk'ya (2. seviye) çıkmasıyla birlikte, kesme bölgesinde daha fazla yağlayıcı sağlanarak takım-talaş ara yüzündeki sürtünmenin azaltıldığı, talaşın takım yüzeyine ve işlenmiş yüzeye yapışmasının önlenildiği, bunun da kesmeyi kolaylaştırdığı,  $\zeta$  değerini de düşürdüğü gözlemlenmiştir.  $\zeta$  için hesaplanan UMMY işleme parametrelerinin optimum değerlerinin dağılımı, Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için optimum değerleri ve seviyeleri (Optimum values and levels of UMQL machining parameters for  $\zeta$ )

Seviye	A (%)	B (mm)	C ( $^\circ$ )	D ( $^\circ$ )	E (mm)	F (bar)	G (ml/dk)	H
1	<b>2.370</b>	<b>2.364</b>	<b>2.357</b>	<b>2.374</b>	2.382	2.396	2.382	2.388
2	2.393	2.380	2.384	2.374	<b>2.373</b>	<b>2.367</b>	<b>2.370</b>	<b>2.368</b>
3	2.373	2.392	2.394	2.388	2.380	2.372	2.383	2.379
Mak-Min	0.023	0.028	0.037	0.014	0.009	0.029	0.014	0.020
Sıra	4	3	1	7	8	2	6	5
Optimum işleme parametreleri	A1B1C1D1E2F2G2H2							

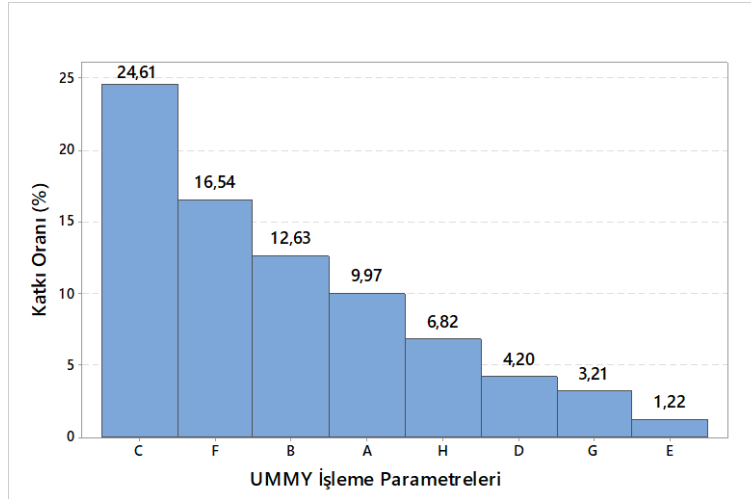
$\zeta$  için ANOVA sonuçları, Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de verilen ANOVA sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  üzerine katkı oranları belirlenmiştir. ANOVA tablosundan anlaşılacağı gibi,  $\zeta$  için istatistiksel olarak en anlamlı UMMY işleme parametresi  $P=0.020$  değeri ile yatay nozul açısı (C) olmuştur.

Tablo 8.  $\zeta$  için ANOVA sonuçları (ANOVA results for  $\zeta$ )

UMMY İşleme Parametreleri	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	KaO (%)
A (%)	2	0.002582	0.001291	2.39	0.141	9.97
B (mm)	2	0.003272	0.001636	3.03	0.093	12.63
C ( $^{\circ}$ )	2	0.006375	0.003187	5.91	0.020	24.61
D ( $^{\circ}$ )	2	0.001089	0.000544	1.01	0.399	4.20
E (mm)	2	0.000316	0.000158	0.29	0.752	1.22
F (bar)	2	0.004284	0.002142	3.97	0.054	16.54
G (ml/dk)	2	0.000832	0.000416	0.77	0.488	3.21
H	2	0.001767	0.000883	1.64	0.242	6.82
Hata	10	0.005390	0.000539			20.81
Toplam	26					100.00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, KaO: Katkı oranı

UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için katkı oranları grafiği Şekil 9’da verilmiştir. Tablo 8 ve Şekil 9’daki % katkı oranları dikkate alındığında,  $\zeta$  üzerinde en önemli ve etkili olan UMMY işleme parametresinin %24.61 değeriyle yatay nozul açısının (C) olduğu görülmektedir.



Şekil 9. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için katkı oranları grafiği (Graph of contribution ratios of UMQL machining parameters for  $\zeta$ )

Ortalama UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum seviyeleri ve bu seviyelerin sayısal değerleri Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum seviyeleri ve değerleri (Optimum levels and values of UMQL machining parameters for  $F_c$  and  $\zeta$ )

UMMY işleme parametreleri	$F_c$		$\zeta$	
	Seviye	Değer	Seviye	Değer
A (%)	1	5	1	5
B (mm)	1	0.8	1	0.8
C ( $^{\circ}$ )	2	30	1	15
D ( $^{\circ}$ )	3	45	1	15
E (mm)	1	15	2	20
F (bar)	3	6	2	5
G (ml/dk)	1	0.5	2	1
H	2	K	2	K

#### 4.3. Doğrulama Testleri (Confirmation Tests)

Bu çalışmada, optimum şartlarda üç defa doğrulama testi yapılmıştır. Doğrulama testlerinden elde edilen sonuçların %95 güven aralığında olduğu ifade edilebilir. Optimum şartlarda tahmin

edilen sonuçlar, %95 güven aralığı ve doğrulama testleri sonuçları Tablo 10’da gösterilmiştir. Yapılan üç doğrulama testi sonucunda  $F_c$  ve  $\zeta$ ’nin ortalama değerleri, sırasıyla 310.061 N ve 2.242 olarak hesaplanmıştır. Doğrulama testlerinden elde edilen sonuçlara göre, parametre etkilerinin güven aralığı sınırları içinde kaldığı ve tekrarlanabilir olduğu, aynı zamanda, deney sonuçlarının da güvenilebilir olduğu anlaşılmıştır. Başka bir ifadeyle,  $F_c$  ve  $\zeta$  için sistem optimizasyonu Taguchi yöntemiyle %95 güven aralığında yapılabilir.

Ortalama değerlere göre ve “En küçük en iyi” amaç fonksiyonuna göre, optimum UMMY işleme parametreleri  $F_c$  için A1B1C2D3E1F3G1H2 ve  $\zeta$  için A1B1C1D1E2F2G2H2 olarak belirlenmiştir. Optimal koşulda bir yanıt karakteristiğinin tahmini ortalaması,

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (9)$$

formülü ile belirlenir [43,44].

Sistemin optimum şartlarının doğru bir şekilde gerçekleştiğinin değerlendirilmesi yapılmalıdır. Bunun için, tahmini yanıt değişkeni güven aralığının (CI) hesaplanmasında,

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,(1,f_e)} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (10)$$

$$n_{eff} = \frac{1}{1+T_{SD}} \quad (11)$$

denklemleri kullanılmıştır [44,46].

Burada;  $F(\alpha, 1, f_e)$ : %95 güvenle F-oranı,  $\alpha$ : anlamlılık düzeyi,  $f_e$ : hata serbestlik derecesi,  $V_e$ : hata varyansı,  $n_{eff}$ : tekrar sayısı,  $R$ : doğrulama testleri tekrar sayısı,  $N$ : toplam deney sayısı ve  $T_{SD}$  toplam serbestlik derecesidir. Eş. 11’e göre  $n_{eff}=1.588$  olarak hesaplanmıştır.  $F_{0.05(1, F_0)}$  değeri, ilgili F-tablosundan bulunmuştur. Eş. 10’daki hata varyansı ( $V_e$ ), ANOVA sonuç tablolarındaki verilerden bulunmuştur. Bulunan değerler Eş. 10’a göre hesaplandığında,  $F_c$  için  $CI=28.769$  ve  $\zeta$  için  $CI=0.051$  olarak hesaplanmıştır. Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 11’de verilmiştir. Tablo 11’de görüldüğü gibi, doğrulama testlerinden elde edilen sonuç ile hesaplanan değerler arasındaki fark, hem  $F_c$  için hemde  $\zeta$  için bulunan CI değerinden küçük çıkmıştır. Bu sonuca göre,  $F_c$  ve  $\zeta$  için yapılan optimizasyonun uygun olduğu tasdiklenmektedir. Tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki hatanın %10’dan daha küçük çıkması, gerçekleştirilen istatistiksel analizin güvenilir olmasının bir göstergesidir [34,36]. Bu durumda, doğrulama testleri sonuçlarına göre başarılı bir optimizasyonun gerçekleştirildiği sonucuna varılabilir. Optimum koşullar altında  $F_c$  ve  $\zeta$  sırasıyla %3.19 ve %0.49’luk bir iyileşme göstermiştir.

Tablo 10. Doğrulama testlerinin sonuçları (Results of confirmation tests)

		Yanıt değişkeni	
		$F_c$ (N)	$\zeta$
Optimum şartlar altında tahmin edilen değer		319.579	2.294
Hata varyansı		173.27	0.00054
% 95 güven aralığı		$\pm 28.769$	$\pm 0.051$
% 95 güven aralığının	Alt sınırı	290.81	2.243
	Üst sınırı	348.348	2.345
Doğrulama test sonuçları	1	308.256	2.276
	2	315.560	2.232
	3	306.368	2.268
Doğrulama testlerinin ortalaması		310.061	2.259
Hata oranı (%)		2.98	1.53

Tablo 11. Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of prediction values and confirmation tests results)

Parametre ve Seviyeleri	Taguchi Metodu için			
	Deneysel Veriler	Tahmin Verileri	Hata (%)	İyileşme (%)
<b>F<sub>c</sub> (N)</b>				
A1B1C2D3E1F3G1H2 (optimal)	310.061	319.579	3.07	3.19
A2B1C2D3E1F2G3H1(deneysel)*	319.937	325.248	1.66	
<b>ζ</b>				
A1B1C1D1E2F2G2H2 (optimal)	2.259	2.294	1.55	0.49
A1B1C1D1E2F2G2H2(deneysel)*	2.270	2.410	6.17	

\*Deneylemlerden elde edilen en iyi sonuçların kombinasyonu seçilmiştir.

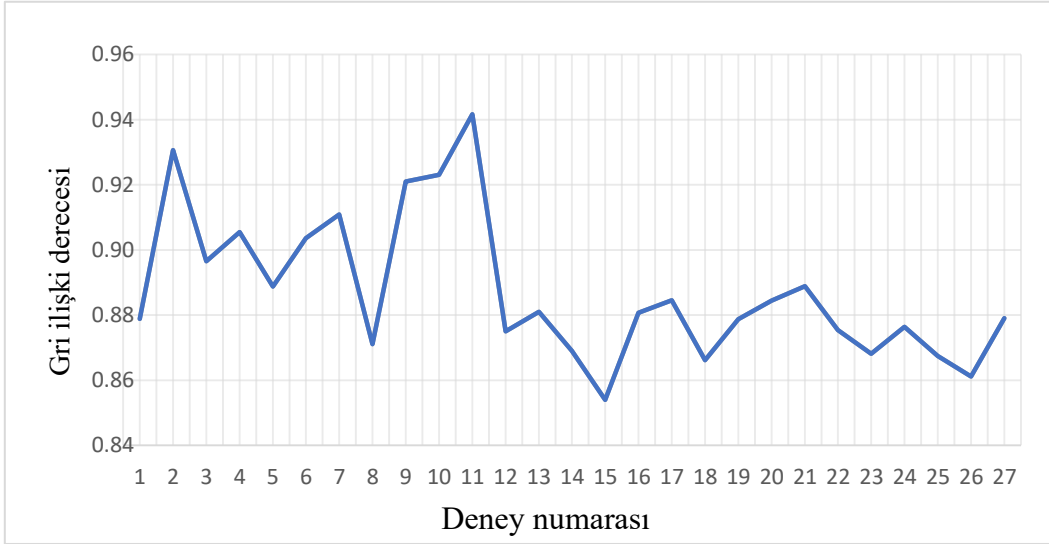
#### 4.4. Gri İlişki Analizi Sonuçları (Grey Relational Analysis Results)

Metal işlemede, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerini aynı anda en aza indirmek için çok yanıtlı optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir. Eş.3 ile elde edilen normalizasyon değerleri, Eş.3-Eş.5 kullanılarak uzaklık matrisi, gri ilişki katsayısı ve Eş.6 ile elde edilen gri ilişki derecesi (GİD) değerleri Tablo 12'de verilmiştir. Gri ilişki derecesinin büyük değeri, normalleştirilmiş değer ve deneysel değer arasındaki ilişkinin daha iyi olması demektir. Bu yüzden, daha büyük GİD, karşılık gelen işlem parametresi kombinasyonu optimuma en yakın olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 12. Gri ilişki derecesi ve sıralaması (Grey relational degree and ranking)

Deney No	Normalizasyon		Uzaklık Matrisi		Gri İlişki Katsayısı		Gri İlişki Derecesi	Sıralama
	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$	$\gamma_i$	
1	0.2570	0.3636	0.7430	0.6364	0.8706	0.8871	0.8789	16
2	0.1950	1.0000	0.8050	0.0000	0.8613	1.0000	0.9307	2
3	0.2440	0.5909	0.7560	0.4091	0.8687	0.9244	0.8965	8
4	0.5460	0.4091	0.4540	0.5909	0.9168	0.8943	0.9055	6
5	0.3844	0.3636	0.6156	0.6364	0.8904	0.8871	0.8887	10
6	0.5235	0.4091	0.4765	0.5909	0.9130	0.8943	0.9036	7
7	0.9417	0.0000	0.0583	1.0000	0.9885	0.8333	0.9109	5
8	0.2007	0.3182	0.7993	0.6818	0.8622	0.8800	0.8711	21
9	0.8765	0.2273	0.1235	0.7727	0.9759	0.8661	0.9210	4
10	1.0000	0.0909	0.0000	0.9091	1.0000	0.8462	0.9231	3
11	0.9806	0.3636	0.0194	0.6364	0.9961	0.8871	0.9416	1
12	0.2053	0.3636	0.7947	0.6364	0.8629	0.8871	0.8750	20
13	0.2851	0.3636	0.7149	0.6364	0.8749	0.8871	0.8810	13
14	0.3103	0.1818	0.6897	0.8182	0.8788	0.8594	0.8691	22
15	0.2410	0.0455	0.7590	0.9545	0.8682	0.8397	0.8539	27
16	0.2342	0.4091	0.7658	0.5909	0.8672	0.8943	0.8807	14
17	0.2839	0.4091	0.7161	0.5909	0.8747	0.8943	0.8845	11
18	0.2274	0.2273	0.7726	0.7727	0.8662	0.8661	0.8661	25
19	0.1579	0.4545	0.8421	0.5455	0.8559	0.9016	0.8787	17
20	0.3296	0.3636	0.6704	0.6364	0.8818	0.8871	0.8844	12
21	0.3407	0.4091	0.6593	0.5909	0.8835	0.8943	0.8889	9
22	0.1119	0.4545	0.8881	0.5455	0.8492	0.9016	0.8754	19
23	0.0611	0.4091	0.9389	0.5909	0.8419	0.8943	0.8681	23
24	0.0735	0.5000	0.9265	0.5000	0.8437	0.9091	0.8764	18
25	0.0000	0.4545	1.0000	0.5455	0.8333	0.9016	0.8675	24
26	0.2940	0.0909	0.7060	0.9091	0.8763	0.8462	0.8612	26
27	0.2602	0.3636	0.7398	0.6364	0.8711	0.8871	0.8791	15

Gri ilişki derecesi grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Tablo 12'deki sıralamadan ve Şekil 10'dan açıkça görülebileceği gibi, gri ilişki derecesinin optimum değeri 11 numaralı testten (A2B1C2D3E2F3G1H2) elde edilmiştir. Elde edilen değerler içerisinde büyük olanı ideal değer olarak tanımlanır. Böylece optimum  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerini elde etmek için 11 numaralı testin işleme koşullarında ideal deneysel faktör olduğu görülmüştür. Buna göre optimum işleme koşullarının %10 sıvı konsantrasyon oranında, 0.8 mm nozul orifis çapında, 30° yatay ve 45° dikey nozul açılarında, 20 mm nozul mesafesinde, 6 bar basınçta, 0.5 ml/dk atomizasyon miktarında ve kısa nozul tipinde elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 10. Gri ilişki derecesi grafiği (Graph of grey relational degree)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, UMMY işleme parametrelerinden olan kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tiplerinin, kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkileri araştırılmıştır. En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerin elde edilmesi için kullanılacak olan optimum UMMY işleme parametrelerinin belirlenmesi, Taguchi deney teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri kısa nozulla (K) yapılan işlemede elde edilmiştir. Kısa nozul ile işlemede elde edilen değerler,  $F_c$  için 372.6 N ve  $\zeta$  için 2.368 olarak belirlenmiştir.
- En düşük  $F_c$  değerini veren UMMY işleme parametreleri, kesme sıvısı konsantrasyon oranı (% 5,  $F_c=369.0$  N), nozul orifis çapı (0.8 mm,  $F_c=373.7$  N), nozul mesafesi (15 mm,  $F_c=375.4$  N), kesme sıvısı atomizasyon oranı (0.5 ml/dk,  $F_c=370.8$  N) 1. seviye değerlerinde, yatay nozul açısı (30°,  $F_c=368.7$  N) 2. seviye değerinde, dikey nozul açısı (45°,  $F_c=366.1$  N) ile hava basıncı (6 bar,  $F_c=375.9$  N) 3. seviye değerlerinde gerçekleşmiştir.
- En düşük  $\zeta$  değeri, 3. seviyedeki değerlerde oluşmamış olup kesme sıvısı konsantrasyon oranı (% 5,  $\zeta=2.370$ ), nozul orifis çapı (0.8 mm,  $\zeta=2.364$ ), yatay nozul açısı (15°,  $\zeta=2.357$ ) ve dikey nozul açısı (15°,  $\zeta=2.374$ ) 1. seviye değerlerinde oluşmuştur. Buna karşılık nozul mesafesi (20 mm,  $\zeta=2.373$ ), hava basıncı (5 bar,  $\zeta=2.367$ ) ve kesme sıvısı atomizasyon oranı (1 ml/dk,  $\zeta=2.370$ ) 2. seviye değerlerinde oluşmuştur.
- Özellikle en düşük  $F_c$  değerlerinin elde edildiği 0.5 ml/dk kesme sıvısı atomizasyon oranı ile UMMY sisteminde oldukça düşük miktarlarda kesme sıvısının kullanıldığı görülmüştür.
- Gri ilişki analizinde elde edilen gri ilişki derecesinin optimum değeri, Taguchi  $L_{27}$  deney düzeneğindeki 11 numaralı deneyden (A2B1C2D3E2F3G1H2) elde edilmiştir.
- UMMY sisteminin en düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerinin elde edildiği % 5 kesme sıvısı konsantrasyon oranı ile daha düşük miktarlarda yağ kullanılan bir sistem olduğu anlaşılmıştır.
- Böylece UMMY sisteminin düşük kesme sıvısı ve yağ tüketiminin bir sonucu olarak hem insan ve çevre dostu bir işleme sistemi olduğu, hem de oldukça ekonomik bir sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. F. Kafkas, R. Mergen, İşleme süreçlerinde ultrasonik atomizasyon kesme sıvısı (ACF) püskürtme sistemine dayalı minimum miktar yağlama (MQL) sistemlerine genel bir bakış, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar VI. (Edt: L. Civcik), Konya: Eğitim Yayınevi, 7-34, 2022.
2. N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, An investigation of the tool-chip contact length and wear in high-speed turning of EN19 steel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 218(8): 889-903, 2004.
3. S.A. Iqbal, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 1: Investigation of contact phenomena, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221(5): 909-916, 2007.
4. I. Ghai, J. Wentz, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, J. Samuel, Droplet behavior on a rotating surface for atomization-based cutting fluid application in micromachining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 132(1), 2010.
5. V. Marinov, The tool chip contact length on orthogonal metal cutting, In 5th International Conference on Advanced Engineering and Technology, AMTECH, 99:149-155, 1999.
6. A.C. Hoyne, C. Nath, S.G. Kapoor, On cutting temperature measurement during titanium machining with an atomization-based cutting fluid spray system, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 137(2): 024502, 2015.
7. M.B. Jun, S.S. Joshi, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130(3): 031118, 2008.
8. X. Wang, C. Li, Y. Zhang, W. Ding, M. Yang, T. Gao, H.M. Ali, Vegetable oil-based nanofluid minimum quantity lubrication turning: Academic review and perspectives, Journal of Manufacturing Processes, 59:76-97, 2020.
9. S.A. Lawal, I. A. Choudhury, Y. Nukman, Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals-a review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 52(1):1-12, 2012.
10. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, Journal of materials processing technology, 172(2):299-304, 2006.
11. M. Hadad, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy, Journal of Cleaner Production, 54: 332-343, 2013.
12. M.M.A. Khan, M.A.H. Mithu, N.R. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. Journal of materials processing Technology, 209(15-16):5573-5583, 2009.
13. Y. Shuang, M. John, D. Songlin, Experimental investigation on the performance and mechanism of graphene oxide nanofluids in turning Ti-6Al-4V, Journal of Manufacturing Processes, 43:164-174, 2019.
14. A. Shokrani, I. Al-Samarrai, S.T. Newman, Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy, Journal of Manufacturing Processes, 43:229-243, 2019.
15. H. Chen, W.L. Cheng, Y.H. Peng, W.W. Zhang, L.J. Jiang, Experimental study on optimal spray parameters of piezoelectric atomizer based spray cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 103:57-65, 2016.
16. M.A. Ebadian, C.X. Lin, A review of high-heat-flux heat removal technologies, Journal of Heat and Mass Transfer, 133(11), 2011.
17. A. Tanveer, D. Marla, S.G. Kapoor, A thermal model to predict tool temperature in machining of Ti-6Al-4V alloy with an atomization-based cutting fluid spray system, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139(7): 071016, 2017.
18. C. Nath, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Design and evaluation of an atomization-based cutting fluid spray system in turning of titanium alloy, Journal of Manufacturing Processes, 14(4): 452-459, 2012.
19. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Study of droplet spray behavior of an atomization-based cutting fluid spray system for machining titanium alloys, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136(2): 021004, 2014.



20. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, Finish turning of Ti-6Al-4V with the atomization-based cutting fluid (ACF) spray system, *Journal of Manufacturing Processes*, 28: 464-471, 2017.
21. M.B. Jun, S.S. Joshi, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(3): 031118, 2008.
22. C. Nath, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Design and evaluation of an atomization-based cutting fluid spray system in turning of titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 14(4): 452-459, 2012.
23. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Effect of fluid concentration in titanium machining with an atomization-based cutting fluid (ACF) spray system, *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4):419-425, 2013.
24. E. Martínez-Galván, R. Antón, J. C. Ramos, R. Khodabandeh, Effect of the spray cone angle in the spray cooling with R134a, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50:127-138, 2013.
25. E. Abd Rahim, H. Dorairaju, Evaluation of mist flow characteristic and performance in minimum quantity lubrication (MQL) machining, *Measurement*, 123:213-225, 2018.
26. R. Singh, Minimum quantity lubrication turning of hard to cut materials–A review, *Materials Today: Proceedings*, 37:3601-3605, 2021.
27. T. Ueda, A. Hosokawa, K. Yamada, Effect of oil mist on tool temperature in cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128:130–135, 2006.
28. A. Yassin, C.Y. Teo, Effect of pressure and nozzle angle of minimal quantity lubrication on cutting temperature and tool wear in turning, In *Applied Mechanics and Materials*, 695:676-679, 2015.
29. V. Upadhyay, P.K. Jain, N.K. Mehta, K. Branko, Minimum quantity lubrication assisted turning-an overview, *Daaam International Scientific Book*, 463-478, 2012.
30. V.S. Sharma, M. Dogra, N.M. Suri, Cooling techniques for improved productivity in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6):435-453, 2009.
31. T. Singh, P. Singh, J.S. Dureja, M. Dogra, H. Singh, M.S. Bhatti, A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys, *International journal of Machining and Machinability of Materials*, 18(3):213-251, 2016.
32. Z.Q. Liu, X.J. Cai, M. Chen, Q.L. An, Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(8): 1273-1279, 2011.
33. S. Masoudi, M.J. Esfahani, F. Jafarian, S.A. Mirsoleimani, Comparison the effect of MQL, wet and dry turning on surface topography, cylindricity tolerance and sustainability, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-13, 2019.
34. Y. Hou, X. Liu, J. Liu, M. Li, L. Pu, Experimental study on phase change spray cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 46:84-88, 2013.
35. F. Kafkas, Evaluation of the efficiency of an ultrasonic atomization-based coolant (uACF) spray system in external turning using different nozzle tips, *Journal of Manufacturing Processes*, 81:991-1004, 2022.
36. F. Kafkas, H. Gürbüz, U. Şeker, AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında takım geometrisi ve işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü özelliklerine etkisinin taguchi yöntemi ile analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10 (3), 391-407, 2022.
37. K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44(10): 2138-2148, 2011.
38. I. Asiltürk, H. Akkuş, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44(9):1697-1704, 2011.
39. O. Köksoy, F. Zehra Muluk, Solution to the Taguchi’s problem with correlated responses, *Gazi University Journal of Science*, 17(1):59-70, 2004.
40. A. Gupta, H. Singh, A. Aggarwal, Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel, *Expert Systems with Applications*, 38(6):6822-6828, 2011.
41. S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology in SI units*, 8th Edition, UK: Pearson Education Limited, 2022.
42. C.L. Lin, Use of the taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics, *Mater. Manuf. Process.* 19(2):209–220, 2004.

43. A. Acır, M.E. Canlı, İ. Ata, R. Çakiroğlu, Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis, *Appl. Therm. Eng.*, 122:330–338, 2017.
44. K. Ramesh, P. Baranitharan, R. Sakthivel, Investigation of the stability on boring tool attached with double impact dampers using Taguchi based Grey analysis and cutting tool temperature investigation through FLUKE-Thermal imager, *Measurement*, 131:143–155, 2019.
45. M. Mia, A. Rifat, F. Tanvir, M.K. Gupta, J. Hossain, A. Goswami, Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning, *Measurement*, 129:156–166, 2018.
46. O. Zerti, M. Yallese, A. Zerti, S. Belhadi, F. Girardin, Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/mixed ceramic tool (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiC)), *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, 9(2):173–194, 2018.
47. T. Zeng, C.J. Lin, Y.H. Yang, M.C. Jeng, Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the taguchi method and grey relational analysis, *J. Mater. Process. Technol.*, 209:2753-2759, 2009.