

Savunma Sanayisi Soğutucu Gaz Sistemlerine Kullanılan Custom 450 Alaşımının Delinmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Yığıntı Talaşın Minimize Edilebilmesi amacıyla Matematiksel Modelleme ve Çoklu Yanıt Optimizasyonu

Mathematical Modelling and Multiresponse Optimization to Minimizing Surface Roughness and Built-Up Edge in Drilling Custom 450 Alloys Used in Defense Industry Refrigerant Systems

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering
huseyingokce@karatekin.edu.tr, Orcid iD: 0000-0002-2113-1611

Özet

Custom 450, 650°C'ye kadar çok iyi korozyon direnci gösteren ve mühimmat soğutucu gaz sistemlerinde kullanılan martensitik yapıda paslanmaz çelik kalitesidir. Yüksek mukavemet değerleri ve zayıf ısı iletimleri, bu alaşımın talaş kaldırarak şekillendirilmesini güç hale getirmektedir. Özellikle mühimmat sistemlerinde, Custom 450 malzemesi ile üretilen nihai ürünlerde pek çok delik delme işlemi bulunmaktadır. Silah ve mühimmat sistemleri gibi yüksek hassasiyete sahip ürünlerin üretiminde işleme parametrelerinin doğru tayin edilmesi çok önemlidir. Bu kapsamda Custom 450 malzemesinin delinmesi sonucu oluşan yüzeylerin pürüzlülüğü (Ra) ve matkapta oluşan yığıntı talaş (BUE) oluşumu kontrol faktörlerine (kesme hızı, ilerleme miktarı ve matkap) bağlı olarak incelenmiştir. Taguchi L16 dizisi ile tasarlanan deneylerden elde edilen sonuçlar, Gri İlişkisel Analiz (GRA) metodunun gerektirdiği şekilde hesaplamalara tabi tutulmuş ve böylece kalite karakteristikleri (Ra ve BUE) için kontrol faktörleri ve seviyeleri eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Ayrıca kalite karakteristiklerinin tahmin edilebilmesi için Yanıt Yüzeyi Metodu (RSM) ile matematiksel modeller geliştirilmiştir. Matkaplar optik ve taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiş, enerji yayımlı X-ışını ile analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda ilerlemenin artmasına paralel olarak Ra ve BUE değerlerinde yükselişler görülmüştür. Kesme hızının artmasıyla BUE oluşumunda azalma olurken adhesiv aşınma mekanizmasının etkisiyle matkap aşınmaya başlamıştır. Varyans analizine göre Ra üzerinde %93,11 oranıyla ilerlemenin, BUE üzerinde ise 58,14% oranıyla kesme hızı en etkili kontrol faktörleridir. GRA ile yapılan optimizasyon sonucunda en etkili kontrol faktörü ilerleme miktarıdır, optimum seviyeler ise 60 m/dk. kesme hızı, 0,005 mm/dev. ilerleme miktarı ve 4 numaralı matkaptır. RSM ile elde edilen matematiksel modellere ait determinasyon katsayılarının; Ra için 96,9% ve BUE için 94,7% olarak bulunması geliştirilen modelin güvenilirliğini kanıtlamıştır.

Anahtar kelimeler: Paslanmaz çelik, delme, yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş, optimizasyon

Abstract

Keywords: Stainless steel, drilling, thrust force, surface roughness, BUE, optimization

1. GİRİŞ (Introduction)

Paslanmaz çelikler, korozyona karşı yüksek dayanımları ve mekanik özellikleri ile neredeyse tüm endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Isıl işlem yöntemleri ve/veya alaşım elementlerinin takviyesi paslanmaz çeliklerin özelliklerini değiştirmektedir [4]. Custom 450, martensitik yapıda bir paslanmaz çelik alaşımıdır. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında ($\approx 650^{\circ}\text{C}$) korozyona karşı oldukça dayanıklı olan Custom 450 alaşımı, teknolojinin de hızla gelişmesi ile beraber denizaltı üretiminde, nükleer santrallerde ve mühimmat sistemlerinde bütünü en kritik parçası olarak karşımıza çıkmaktadır [5]. Dünya çapında paslanmaz çelik üreticileri, bu malzemenin yüksek tuz oranına sahip sularda ($\approx 20\%$) oyuklaşmaya ve korozyona karşı oldukça dirençli olduğunu belirtmişlerdir [5, 6]. Custom 450 alaşımının yüksek gerilme dayanımları, düşük ısı iletim katsayısı ve nispeten yüksek sünekliği talaş kaldırarak işlemeyi güç hale getirmektedir [1-3, 7-8]. İşleme sürecinde yükselen kesme kuvvetleri, ısınan kesici takım, talaşın takıma yapışması ve nispeten uzun talaşlar şekillendirmeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Savunma sistemler gibi yüksek teknolojilerin ve özel malzemelerin kullanıldığı sektörlerde, Custom 450 gibi üretim maliyeti yüksek malzemelerin etkin bir şekilde işlenmesi, sürdürülebilir işleme için oldukça önemlidir [5].

Talaşlı imalat yöntemler içinde yaklaşık %35 gibi yüksek bir oranla kullanılan matkapla delik delme, ekonomikliği ve basit yapısı ile en önemli delik delme yöntemi olarak karşımıza çıkar [9-12]. Bu nedenden ötürü birçok bilim insanı, delme sürecinde karşılaşılabilecek muhtemel sorunları anlama ve çözüm önerisi sunabilme noktasına odaklanmışlardır [13]. Delme süreci; kesme parametrelerinden - malzemeye, kesici takımdan - takım tezgâhına kadar birçok faktörden etkilenir. Dahası delme, diğer talaş kaldırma işlemlerine nispeten gözlenmesi güç kapalı bir ortamda gerçekleştiğinden sürecin anlaşılmasını güçleştirmektedir [14].

Birbirleri üzerinde çalışan makine parçalarının en az enerjiyle ve uzun süreli çalışabilmeleri boyutsal ve yüzey hassasiyetleri ile yakından ilgilidir [15-17]. Üretilen parçanın yüzey kalitesi yorulma, aşınma ve sürtünme özelliklerini büyük ölçüde etkiler [16, 17]. Ancak yüksek yüzey kalitesi ekonomik yükleri de beraberinde getirecektir [18]. Bu nedenlerden ötürü yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve nitelendirilebilmesi sürdürülebilir bir işleme ve talaşlı imalat işlemlerinin optimizasyonu için oldukça önemlidir [15]. Talaşlı imalat süresince kesici takımlar yüksek gerilmelere ve sıcaklıklara (termal yüklerle) maruz kalırlar. Bu yüksek gerilmeler ve sıcaklıklar sonucu kesici takım hızla aşınacaktır. Takım aşınması işlenmiş yüzeyin kalitesini ve iş parçasının boyutsal tamlığını da olumsuz yönde etkiler [17, 19].

Araştırmacılar gelişen teknolojiyle beraber dar tolerans aralığına sahip ürünlerin verimli bir şekilde işlenmesine odaklanmışlardır [12, 18]. Bu nedenle en iyi (optimum) işleme parametrelerinin belirlenmesi için farklı optimizasyon tekniklerinden yararlanılmaktadır [20-25]. Öktem vd., kalıp yüzeylerinin frezelemede minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme koşullarını belirlemek adına genetik algoritmadan, analitik modelini elde etmek için ise yanıt yüzey metodundan yararlanmışlardır. Genetik algoritma kullanarak yapılan optimizasyon sonucunda yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık 10% iyileşme sağladığını ifade etmişlerdir [26]. Suresh vd., çelik malzemelerin karbür kesici takımlar ile tornalanması sonucu oluşan yüzeye ait pürüzlülük değerinin tahmin edilebilmesinde yanıt yüzey metodunu kullanmışlardır. Ayrıca kesme değişkenlerinin optimum değerlerini genetik algoritma ile belirlemişlerdir [27]. Günay ve Meral delme işleminde kesme kuvveti, çapak oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak yanıt yüzey metodu ile analitik modelini geliştirmişler, gri ilişkisel analiz ile de değişkenleri optimize etmişlerdir. Ferritik paslanmaz çelik üzerine yaptıkları çalışmada kesme hızının artmasıyla kuvvet ve

pürüzlülük değerinin azaldığını, kesme hızının artmasıyla da çapaklanmanın arttığını ifade etmişlerdir [20]. Zhang vd., delme sürecinde yüzey kalitesini optimize etmek için Taguchi metodundan yararlanmışlardır. İlerleme miktarı, fener mili devri, gagalama miktarı ve takım tipini kontrol faktörleri olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri optimum kontrol faktörü ve seviyeleri ile yaptıkları doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerli olduğunu açıklamışlardır [28]. Gökçe, Custom 450 alaşımı ile yaptığı frezeleme deneylerini Taguchi L16 ile tasarlamış ve kesme hızına, ilerlemeye ve takıma bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını incelemiştir. Yaptığı optimizasyon sonucunda yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeden, takım aşınmasının ise kesme hızından en yüksek oranda etkilendiğini vurgulamıştır [5]. Abbas vd., CNC tezgahlarında işleme süresini, yüzey pürüzlülüğünü ve işleme maliyetini; kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme miktarına bağlı olarak yapay sınır ağları tahmin etmişlerdir. Elde ettikleri tahminsel değerlerin tutarlı olduğunu ve modelin güvenilirlikle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [29]. Toulfatzis vd., pirinç alaşımlarını Taguchi L16 deney tasarımına uygun olarak tornalama deneylerine tabi tutmuşlar ve deney sonucunda kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüklerini değerlendirmişlerdir. Kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme miktarı ve işlenen malzemeyi kontrol faktörleri olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri optimum değerler ile yaptıkları doğrulama deneyi sonuçlarının tutarlı olduğunu belirtmişlerdir [30]. Çaydaş vd., AISI 304 paslanmaz çelik alaşımının delinmesinde matkap malzemesinin ve kaplamasının etkilerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerinde optimum sonuçların TiN kaplamaya sahip yüksek hız çeliği matkaplardan elde edildiğini açıklamışlardır [31]. Bacchewar vd., eklemeli imalat yöntemi ile üretilen prototiflerin lazer gücünün, katman kalınlığının, ışın hızının ve tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini varyans analizi yardımıyla incelemişlerdir. Ayrıca optimum üretim parametrelerini güven bölgesi tabanlı bir optimizasyon yöntemi ile belirlemişlerdir. Doğrulama deneyi sonuçları ve tahminsel değerlerin birbiri ile uyumlu olduğunu bildirmişlerdir [32]. Çiçek vd., AISI 304 paslanmaz çeliğini kriyojenik işlem görmüş karbür matkaplar ve farklı delme şartlarında bir dizi deneye tabi tutmuşlardır. Deney bulguları ile yanıt yüzeyi metodu kullanarak yüzey pürüzlülüğünü ve ovalite değerini tahmin etmişlerdir. Ayrıca gerçekleştirdikleri optimizasyon sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerlemenin, ovalite üzerinde ise kesme hızının en önemli parametreler olduğunu ifade etmişlerdir [33]. Mavi, dubleks paslanmaz çeliğin delinmesini araştırdığı çalışmada ovalite ve silindiriklikten sapma üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda sapma değerlerinin artan hızlar ile olumsuz etkilendiğini vurgulamıştır [34].

Literatür taramasından elde edilen bilgiler, Custom 450 paslanmaz çeliğin delinmesi üzerine herhangi bir çalışmanın olmadığını göstermiştir. Bu çalışmada ilgili malzeme kesme hızı (Vc), ilerleme miktarı (f) ve matkap geometrisi (D) kontrol faktörleri için 4'er seviye kullanılarak kalite karakteristikleri (yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve yığıntı talaş (BUE)) üzerindeki etkileri incelenmiş ve Gri İlişkisel Analiz (GRA) ile optimum kontrol faktörleri ve seviyeleri tespit edilmiştir. Ayrıca Yanıt Yüzeyi Metodu (RSM) ile Ra ve BUE'nin analitik modelleri geliştirilmiştir.

2. EKİPMAN VE YÖNTEM (Equipment and Method)

2.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme, Ekipman ve Parametreler (Materials, Equipment and Parameters Used in Experiments)

Tablo 1'de Custom 450 paslanmaz çelik alaşımının bazı mekanik özellikleri ve kimyasal kompozisyonu verilmiştir. Deney malzemesi $\text{Ø}60 \times 14$ mm ölçülerinde deney standartlarına

(matkap çapı $(\text{Ø}4,5) \times 3 \leq$ iş parçası kalınlığı) uygun olarak hazırlanmıştır. Matkaplar (Tablo 2) ve kesme parametreleri (Tablo 3) literatür taraması ve üretici firma tavsiyeleri ışığında belirlenmiştir. Deneyler, Taguchi L16 dikey dizisi kullanılarak tasarlanmış ve yapılmıştır.

Table 1. Some mechanical properties and chemical composition of Custom 450 stainless steel [35]

Properties	Unit	Custom 450
Density (20°C)	g/cm ³	7.75
Brinell hardness	HB	278
Yield stress	MPa	814
Tensile stress	Mpa	979
Elastic modulus	GPa	200
Poisson's ratio	-	0.29
Heat transfer coefficient (20°C)	W/(mK)	15
Chemical composition	%	Fe: 75 Cr: 14-16 Cu: 1.25-1.75 Ni: 5-7 Mo:0.5-1

Table 2. Deneylerde kullanılan matkapların özellikleri
Table 2. Properties of drill bits used in experiments

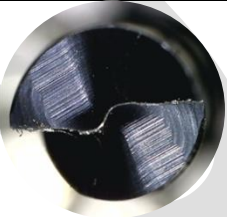
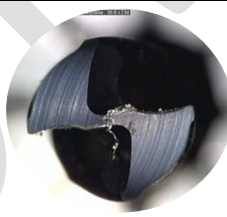
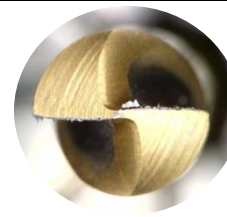
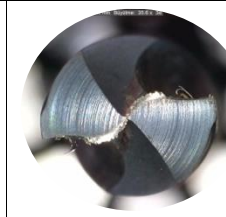
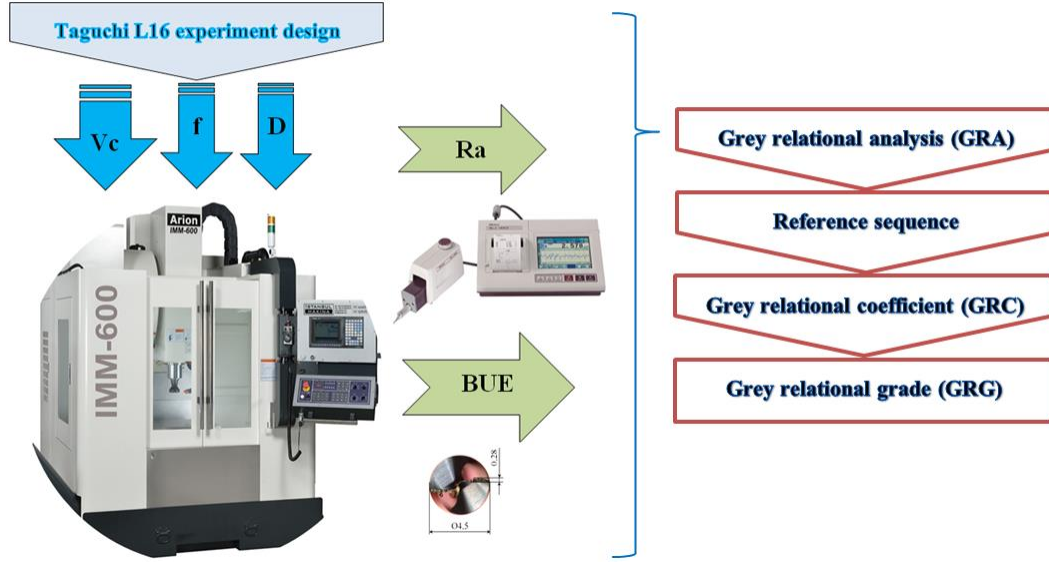
Test code	1	2	3	4
Company code	Kennametal B221A04500HP KCPK15	Kennametal B966A04500 KC7315	Kennametal B042A04500CPG KC7325	Toolex BE0450X2C24AS6N058 MG10
Technical properties	β : 135° β_0 : 30° K: TiAlN-PVD L: 80 mm L ₁ : 47 mm z: 2	β : 140° β_0 : 30° K: TiAlN-PVD L: 80 mm L ₁ : 47 mm z: 2	β : 140° β_0 : 30° K: TiAlN-PVD L: 80 mm L ₁ : 47 mm z: 2	β : 140° β_0 : 30° K: nACo L: 80 mm L ₁ : 47 mm z: 2
Picture				
B: Point angle, β_0 : Helix angle, K: Coating, L: Overall length, L ₁ : Flute length, z: Number of flutes				

Table 3. Delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri
Table 3. Control factors and levels used in drilling tests

Control factors	Unit	Code	Levels
Vc	m/min	A	15 – 30 – 45 – 60
f	mm/rev	B	0.005 – 0.020 – 0.035 – 0.050
D	-	C	1 – 2 – 3 – 4

Karbür matkaplar pens yardımı ile takım tutucuya 35 mm taşma uzunluğunda bağlanmıştır. CNC dik işleme merkezi tablasına sabitlenen 4 ayaklı bir ayna yardımıyla iş parçası tezgâha rijit bir şekilde bağlanmış ve boydan boya delikler delinmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri

Mitutoyo SJ-410 marka/model profilometre kullanılarak delinen delikler içerisinde 120° açı yaptırılacak şekilde 3 farklı bölgeden ve 3 tekrarla ölçülmüştür. Matkaplarda meydana gelen BUE ve deformasyonlar optik bir mikroskop kullanılarak görüntülenmiş ve bu görüntülerden AutoCAD yazılımı kullanılarak BUE değerleri ölçülmüştür. Ayrıca kesici takım aşınmaları Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş ve ayrıca kesici takımlara EDX analizi yapılmıştır. Şekil 1’de deney işlem basamakları gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneylerin ve optimizasyonun işlem basamakları
Figure 1. Process steps of experiments and optimization

2.2. İstatistiksel Metotlar (Statistical Methods)

Gri teorisi yetersiz örnek sayısı ve/veya yeterli bilginin olmadığı problemlerde karar verme ve analiz yapma imkânı sağlayan bir teoridir [36, 37]. Gri teorisinin alt başlıklarından olan gri ilişkisel analiz, gri modelleme, gri tahmin ve gri karar verme gibi yöntemler farklı alanlara uygulanmakta ve bilim insanlarının sıklıkla başvurduğu karar verme yöntemlerindedir [38]. Gri ilişkisel analiz (GRA) yönteminde birden çok kalite karakteristiği için kontrol faktörleri ve seviyelerinin optimum değerleri eş zamanlı olarak belirlenir [39]. Bu çalışmada Custom 450 alaşımının delinmesinde kalite karakteristikleri olarak belirlenen Ra ve BUE'nin Vc, f ve D'ye bağlı optimizasyonu GRA ile eş zamanlı olarak yapılmıştır. Tablo 4'te yapılan optimizasyonun işlem basamakları ve kullanılan eşitlikler verilmiştir.

Tablo 4. GRA Optimizasyonunun işlem basamakları ve eşitlikleri [20, 39]

Table 4. Process steps and equations of GRA [20, 39]

Order	Explanation note	Equations	
		Equation no	Equation
1	Determination of the reference sequence	1	$x_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n))$
2	Normalization of test results	2	$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))}$ large-the-better
		3	$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - (x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))}$ smaller-the-better
		4	$x_i(k) = 1 - \frac{ x_i^0(k) - x^0 }{\max(x_i^0(k) - x^0)}$ nominal best
		$x_i^0(k)$: Original order, $x_i(k)$: Order after preprocessing, $\max(x_i^0(k))$: The greatest value of $x_i^0(k)$, $\min(x_i^0(k))$: The smallest value of $x_i^0(k)$, x^0 : Desired value.	
3	Comparison of series	5	$x_i = (x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n))$ $i = 1, 2, 3, \dots, m$ $i=1 \dots m$ and $k=1 \dots n$: The experimental data and responses, respectively.
4	GRC	6	$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{max}}$ $\Delta_{0i}(k)$: Deviation sequence, $\Delta_{0i}(k) = x_0^*(k) - x_i^*(k) $. Δ_{min} ve Δ_{max} : minimum and maximum values of all sequences. ξ : identification or distinguishing coefficient, ξ is taken as 0.5 for the practical requirements.
5	GRG	7	$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$ n : The number of response properties
6	Optimum kontrol faktörlerinin belirlenmesi: En güçlü ilişki en yüksek GRG değerine sahip düzey ile ilişkilendirilir. Determination of optimum control factors: The strongest relationship is associated with the level with the highest GRG value.		

3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ (ANALYSIS OF EXPERIMENT RESULTS)

Deneyler sonucunda ölçülen Ra ve BUE değerleri Tablo 5’te verilmiştir. Ra için en düşük 0,246 μm ve en yüksek 2,064 μm değerleri ölçülmüştür. En düşük BUE değeri 0,13 mm olurken, en yüksek değeri ise 0,56 mm’dir. En düşük ve en yüksek değerler arasındaki bu farklılık deney sonuçları üzerinde kontrol faktörleri ve seviyelerinin etkisinin bir işaretidir.

Tablo 5. Deneylerden elde edilen Ra ve BUE ölçüm sonuçları
Table 5. Ra and BUE measurement results obtained from experiments

Test no	Vc (m/min)	F (mm/rev)	D	Ra (μm)	BUE (mm)
1	15	0.005	1	0.246*	0.38
2	15	0.020	2	1.087	0.44
3	15	0.035	3	1.252	0.48
4	15	0.050	4	1.725	0.56**
5	30	0.005	2	0.506	0.20
6	30	0.020	1	1.114	0.28
7	30	0.035	4	1.284	0.41
8	30	0.050	3	2.006	0.36
9	45	0.005	3	0.536	0.19
10	45	0.020	4	1.147	0.21
11	45	0.035	1	1.310	0.28
12	45	0.050	2	2.028	0.39
13	60	0.005	4	0.776	0.13*
14	60	0.020	3	1.148	0.23
15	60	0.035	2	1.644	0.25
16	60	0.050	1	2.064**	0.34
Mean				1.242	0.32
* Maximum, ** Minimum					

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

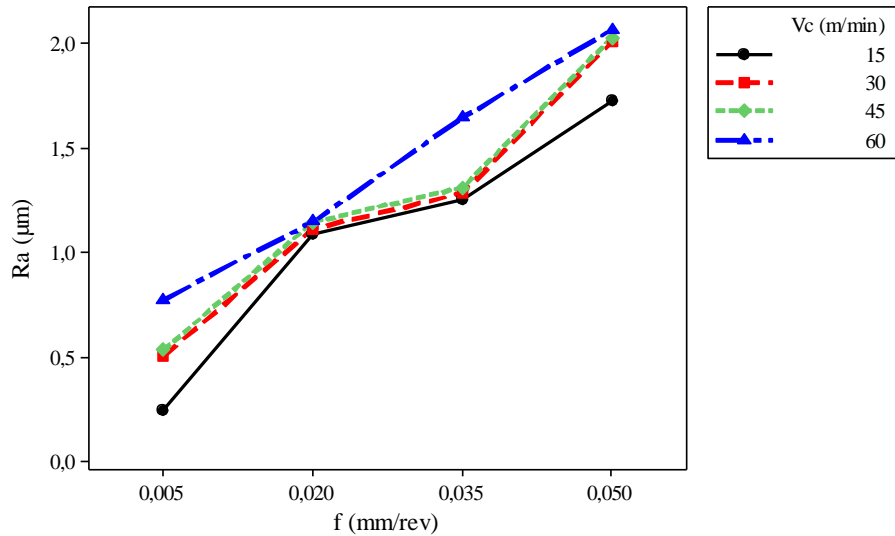
Deneyler sonucu ölçülen Ra değerleri Tablo 5’te verilmiş ve en düşük Ra 0,246 μm ile Vc: 15 m/dk., f: 0,005 mm/dev. ve D:1, en yüksek Ra 2,064 μm ile Vc: 60 m/dk., f: 0,050 mm/dev. ve D:1 kontrol faktörleri ve seviyelerinde ölçülmüştür. Ra değerlerinin Vc, f ve D’den etkilenme oranları ANOVA ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 6’da verilmiştir. Tabloda F oranları ve P değerleri incelendiğinde, Vc ve f’nin deney sonuçları üzerinde etkili ve istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenir ($F_{\alpha: 0.05}: 5,99$ ve P değeri $< 0,05$). İlgili tabloda ayrıca Ra’nın kontrol faktörlerinden etkilenme oranları da verilmiştir. Buna göre, Vc: % 4,80 – f: % 93,11 – D: % 1,30 oranlarında etkilidir.

Tablo 6. Ra için ANOVA
Table 6. ANOVA for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	PCR
Vc	3	0.22017	0.07339	7.36	0.020	4.80
f	3	4.26916	1.42305	142.72	0.000	93.11*
M	3	0.03598	0.01199	1.20	0.386	0.78
Error	6	0.05982	0.00997			1.30
Total	15	4.58514				100.00
R ²						98,70%

* Maximum rate, DF: Degrees of freedom, Seq SS: Sum of squares, Adj MS: Mean of squares, F: Statistic test, P: Significance level, PCR: Percentage rate and R²: Determination coefficient

ANOVA'ya göre en yüksek iki etki oranı f ve Vc'ye aittir. Şekil 2'de f ve Vc değişiminin Ra üzerindeki etkisi sunulmuştur. Özellikle Vc'ye nazaran f değerindeki artışa bağlı olarak Ra değeri oldukça etkilenecek yükselme eğilimine girmiştir. f'nin artması kaldırılan talaş hacminin artmasına ve buna bağlı olarak yüksek plastik deformasyona neden olmaktadır [40]. Yüksek deformasyonun delme işlemi için gerekli kuvvetleri ve titreşimleri artmasına ayrıca deney malzemesinin yüksek sünekliliği [41, 42] delme süresince iş parçası malzemesinin matkap üzerine yapışmasına neden olarak Ra değerini arttırdığı düşünülmektedir [4, 43, 44].



Şekil 2. Ra değerlerinin Vc – f etkileşimi
Figure 2. The effect of Vc - f interaction on Ra

3.2. Kesici Takıma Yapışma (Adhesion to Cutting Tool)

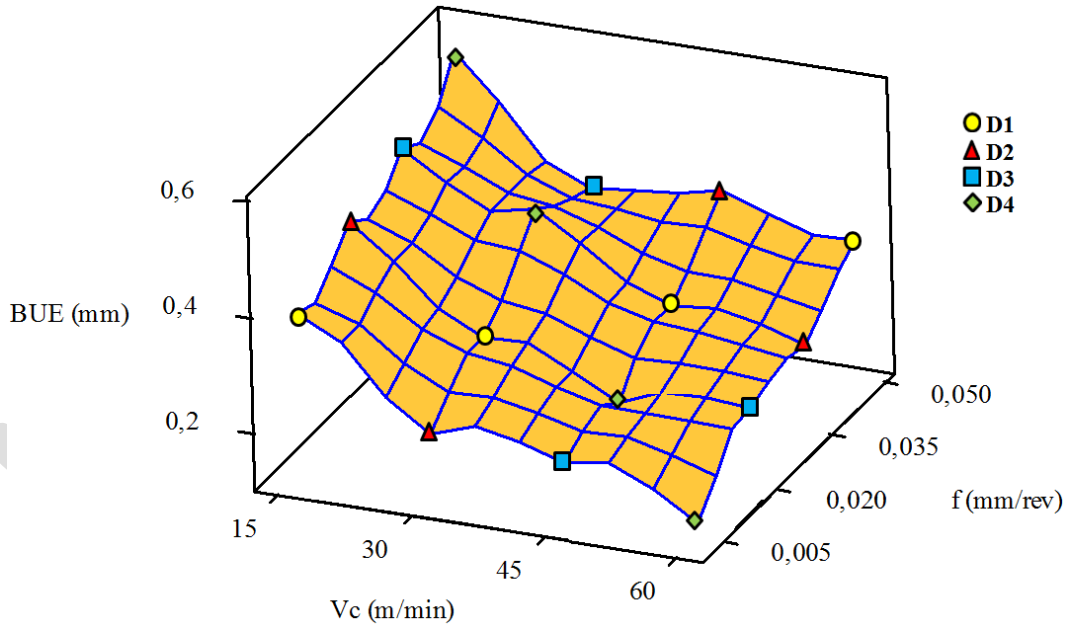
Custom 450 deney malzemesinin delinmesi sonucu ölçülen BUE değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Tabloya göre en düşük BUE 0,13 mm (Vc: 60 m/dk., f: 0,005 mm/dev. ve D:4) ve en yüksek BUE 0,56 mm (Vc: 15 m/dk., f: 0,050 mm/dev. ve D:4) olarak bulunmuştur. Tablo 7'de verilen ANOVA sonuçlarına göre BUE üzerinde Vc ve f'nin istatistiksel açıdan etkili olduğu söylenir (P değeri < 0.05, F oranı > F_{α: 0.05}: 5.99). Bu sonuçlar ve determinasyon katsayısının (R²) yüksek değerleri (94,85%) kalite karakteristikleri ile kontrol faktörleri arasında güçlü bir bağın olduğuna işaret etmektedir. Dahası ilgili tabloda BUE'nin kontrol

faktörlerinden etkilenme oranları da verilmiştir. Buna göre, Vc: 58,14% – f: 36,63% – D: 0,08% etki oranlarına sahiptir. Şekil 3'te kontrol faktörlerindeki değişimin BUE üzerindeki etkileri yüzey grafiği ile gösterilmiştir.

Tablo 7. BUE için ANOVA
Table 7. ANOVA for BUE

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	PCR
Vc	3	0.122006	0.040669	22.58	0.001	58.14*
f	3	0.076855	0.025618	14.22	0.004	36.63
M	3	0.000163	0.000054	0.03	0.992	0.08
Error	6	0.010808	0.001801			5.15
Total	15	0.209833				100.00
R ²	94.85%					

* Maximum rate, DF: Degrees of freedom, Seq SS: Sum of squares, Adj MS: Mean of squares, F: Statistic test, P: Significance level, PCR: Percentage rate and R²: Determination coefficient



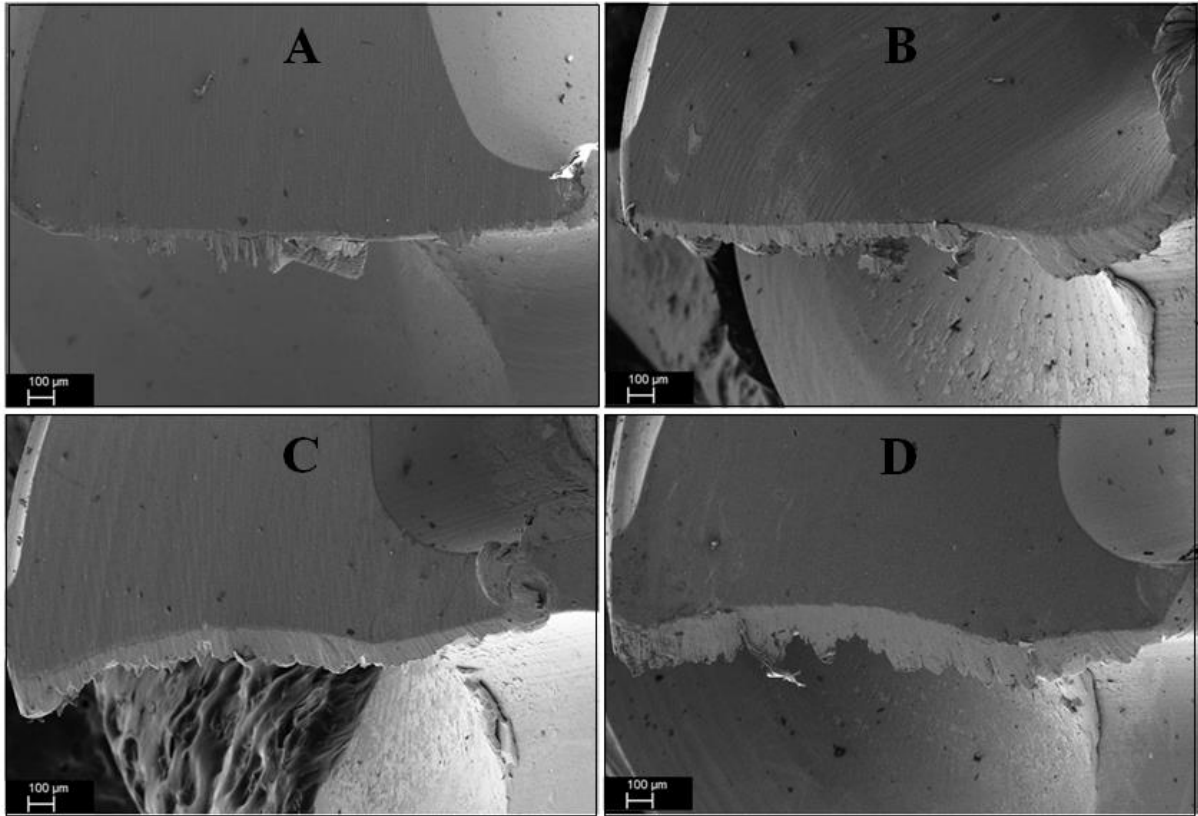
Şekil 3. BUE değerlerinin Vc – f – D etkileşimi
Figure 3. The effect of Vc - f interaction on BUE

Kesme süresince oluşan yüksek sıcaklık ve kesme kuvvetlerinin neden olduğu basıncında etkisi ile iş parçası malzemesi kesici takım üzerine yapışma eğilimine girer. Sürecin devam etmesi ile beraber yapışma giderek büyür ancak maruz kaldığı yükler altında koparak kesici takımdan ayrılır. Talaşlı üretimde yığıntı talaş (BUE) olarak adlandırılan bu olaya sünek malzemelerin işlenmesinde sıklıkla karşılaşılar. Tedrici olarak gerçekleşen bu olay sonucunda takım aşınma eğilimine girer. Trent, özellikle paslanmaz çelik malzemelerin işlenmesinde iş parçası malzemesi ve kesici takım malzemesi arasında çok güçlü bir birleşmenin olduğunu vurgulamıştır [41, 45].

Şekil 4'te sabit kesme hızında (15 m/dk.), artan f değişimlerine bağlı matkaplarda meydana gelen BUE'nin SEM görüntüleri, Şekil 5'te ise sabit f'ye (0,050 mm/dev) karşın yükselen kesme hızı ile yapılan deneylerde kullanılan matkaplara ait SEM görüntüleri sunulmuştur.

Şekil 4'te f 'nin artması ile BUE'nin büyümesi görülmektedir. f değerinin artmasıyla beraber talaş kesit alanını artırarak BUE boyutunun artmasına neden olması beklenen bir durumdur. Şekil 5'te kesme hızının artması ile BUE oluşumunun azaldığı hatta Şekil 5D'de BUE oluşumunun neredeyse tamamen bittiği görülmektedir. Ancak Şekil 5D'de matkap kesici kenarlarında aşınmaların ve kırılmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Kesme hızının artması ile kesme bölgesinde daha yüksek sıcaklıklar oluşacaktır ve yükselen sıcaklığın etkisi altında kalan BUE'nin matkap yüzeyine yapışma kabiliyeti zayıflayacak ve kopma periyodu kısalmaktadır [41].

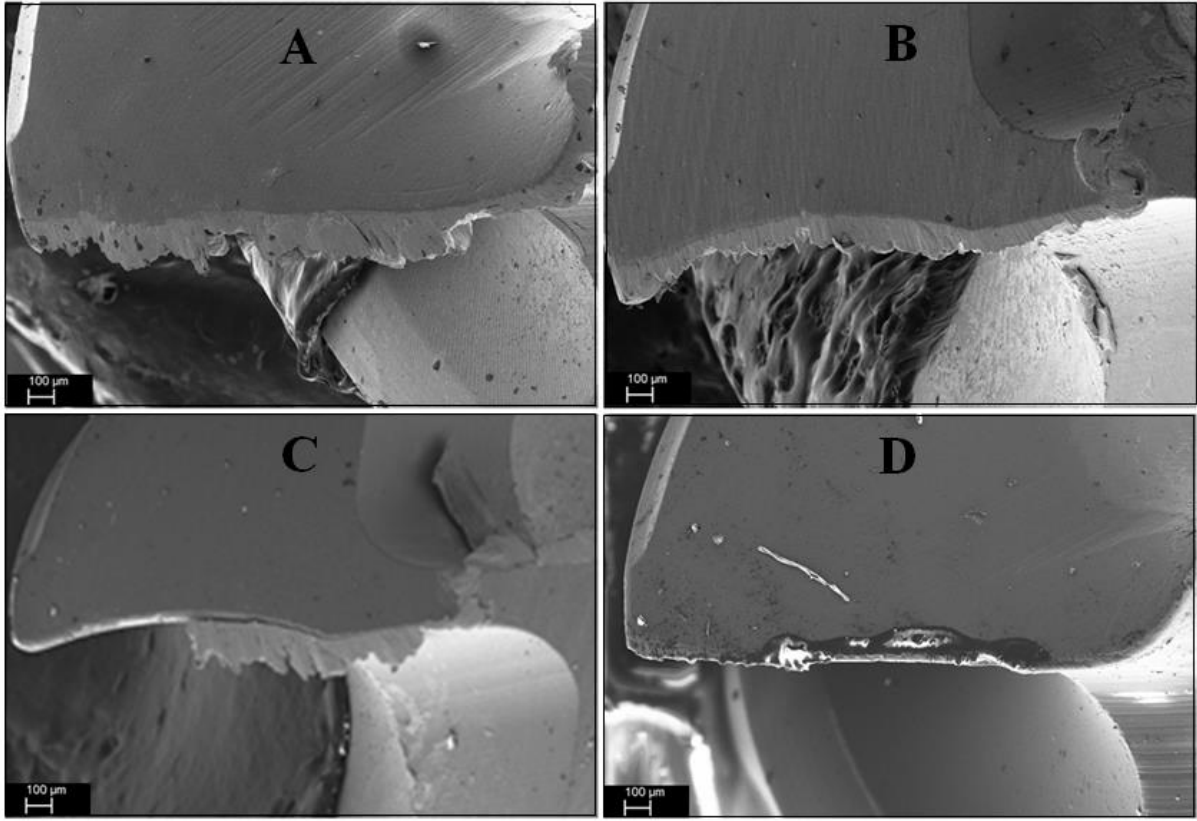
Şekil 5D'deki takım aşınmasında adhesiv aşınma mekanizmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum BUE oluşumunun kesme süresince kesici takım ile iş parçası arasına girerek kesici takımı koruyan bir tabaka gibi iş görmesi ile açıklanabilir. İşleme sürecinde ürün kalitesini etkilemeden oluşan BUE kesici takım ömrünü uzatabilecek bir faktör olduğu kanısına varılabilir. Şekil 6'da sunulan EDX analizinde matkap üzerindeki AlTiN kaplamanın deforme olduğu ve matkap ana malzemesi olan tungsten'in (W) açığa çıkması açıkça görülmektedir.



Şekil 4. 15 m/dk. kesme hızında f değişimine bağlı BUE oluşumunun SEM görüntüleri

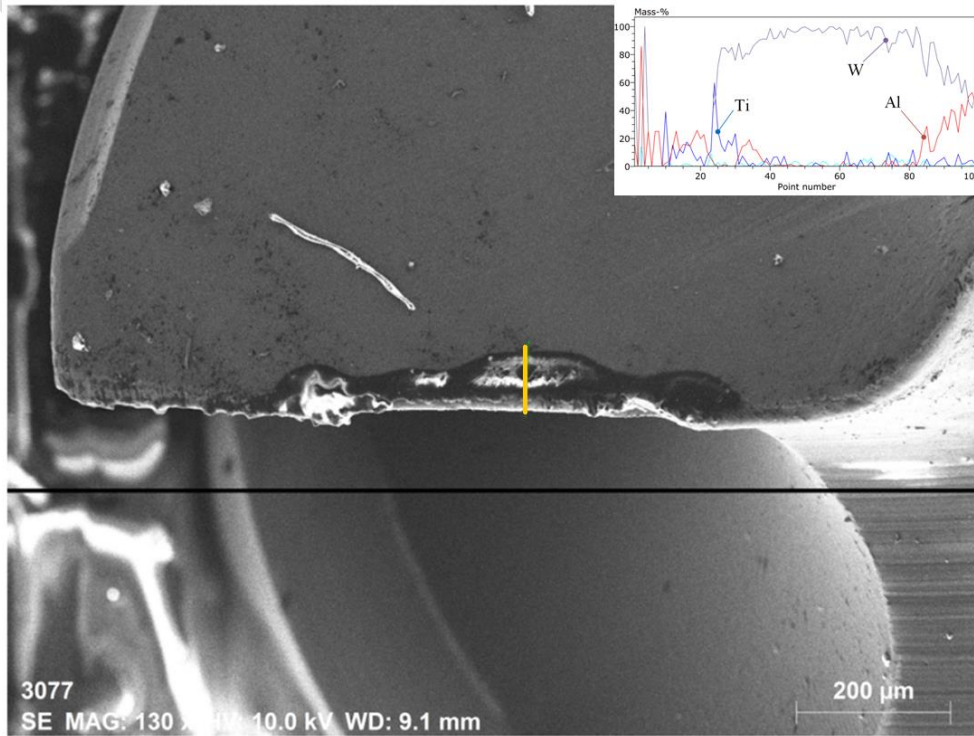
(A:0,005 mm/dev, B: 0,0020 mm/dev, C: 0,0035 mm/dev, D: 0,0050 mm/dev)

Figure 4. SEM images of BUE formation due to f change at V_c : 15 m/min
(A:0.005 mm/rev, B: 0.0020 mm/rev, C: 0.0035 mm/rev, D: 0.0050 mm/rev)



Şekil 5. 0,050 mm/dev fiçin Vc değişimine bağlı BUE oluşumunun SEM görüntüleri
(A: 15 m/dk., B: 30 m/dk., C: 45 m/dk., D: 60 m/dk.)

Figure 4. SEM images of BUE formation due to Vc change at f: 0.050 m/rev
(A: 15 m/min, B: 30 m/min, C: 45 m/min, D: 60 m/min)



Şekil 6. Matkap EDX analizi
Figure 6. Drill bit EDX analysis

3.3. GRA ile Optimizasyon (Optimization via GRA)

Custom 450 alaşımının delinmesi sonucu Ra ve BUE için elde edilen veriler ve ANOVA sonuçları, optimum delme Şartları için farklı kontrol faktörleri ve seviyeleri olduğunu göstermektedir. İşleme verimliliği noktasında her iki kalite karakteristiği içinde eş zamanlı optimizasyonun yapılması oldukça önemlidir. Bu amaç doğrultusunda yapılan GRA için ilk işlem basamağı deney sonuçlarının normalizasyonudur. Kalite karakteristikleri açısında deney sonuçlarının düşük seviyelerde çıkması arzu edilir. Bu amaçla deney sonuçlarına Eşitlik 3 uygulanarak normalize değerleri hesaplanır. Sonraki aşamada normalize değerleri ve Eşitlik 6 kullanılarak GRC değerleri bulunur. Son olarak GRC değerleri ve Eşitlik 7 yardımıyla GRG değerleri elde edilir. GRA için hesaplanan değerler Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Deneyler ve hesaplamalar sonucu elde edilen GRA değerleri

Table 8. Results of the experimental and GRA

Test no	Exp. results		Normalized values		GRC		GRG	Rank
	Ra (μm)	BUE (mm)	Ra	BUE	Ra	BUE		
1	0.246	0.38	1.0000	0.4186	1.0000	0.4624	0.7312	4
2	1.087	0.44	0.5374	0.2791	0.5194	0.4095	0.4645	10
3	1.252	0.48	0.4466	0.1860	0.4747	0.3805	0.4276	12
4	1.724	0.56	0.1870	0.0000	0.3808	0.3333	0.3571	16
5	0.506	0.20	0.8570	0.8372	0.7776	0.7544	0.7660	3
6	1.114	0.28	0.5226	0.6512	0.5115	0.5890	0.5503	7
7	1.284	0.41	0.4290	0.3488	0.4669	0.4343	0.4506	11
8	2.006	0.36	0.0319	0.4651	0.3406	0.4831	0.4119	14
9	0.536	0.19	0.8405	0.8605	0.7581	0.7818	0.7700	2
10	1.147	0.21	0.5044	0.8140	0.5022	0.7288	0.6155	5
11	1.310	0.28	0.4147	0.6512	0.4607	0.5890	0.5249	8
12	2.027	0.39	0.0204	0.3953	0.3379	0.4526	0.3953	15
13	0.775	0.13	0.7090	1.0000	0.6321	1.0000	0.8161	1
14	1.148	0.23	0.5039	0.7674	0.5019	0.6825	0.5922	6
15	1.644	0.25	0.2310	0.7209	0.3940	0.6418	0.5179	9
16	2.064	0.34	0.0000	0.5116	0.3333	0.5059	0.4196	13

Her kontrol faktörünün aynı seviyelerine ait GRG değerlerinin ortalamaları ile oluşturulan GRG yanıt tablosunda (Tablo 9) seviyeler arasındaki en yüksek değerler optimum seviyeyi belirlerken seviyeler arasındaki en büyük fark ise en önemli kontrol faktörünü ifade eder. Bu tariften yola çıkılarak seviye 4 Vc için (60 m/dk.), seviye 1 f için (0,005 mm/dev.) ve seviye 4 ise matkap için (D:4) (Deney no:13) optimum seviyeler olarak belirlenir. Ayrıca en önemli kontrol faktörü olarak 0,3748 değeri ile f karşımıza çıkar.

Tablo 9. GRG için yanıt tablosu
Table 9. Response table for GRG

Control factors	Levels				Delta (max-min)
	1	2	3	4	
Vc	0.4951	0.5447	0.5764	0.5865**	0.0914
f	0.7708**	0.5556	0.4802	0.3960	0.3748*
D	0.5565	0.5359	0.5504	0.5598**	0.0239
Total mean value of the GRG = 0,5651					
* The most important parameter, ** Optimum levels					

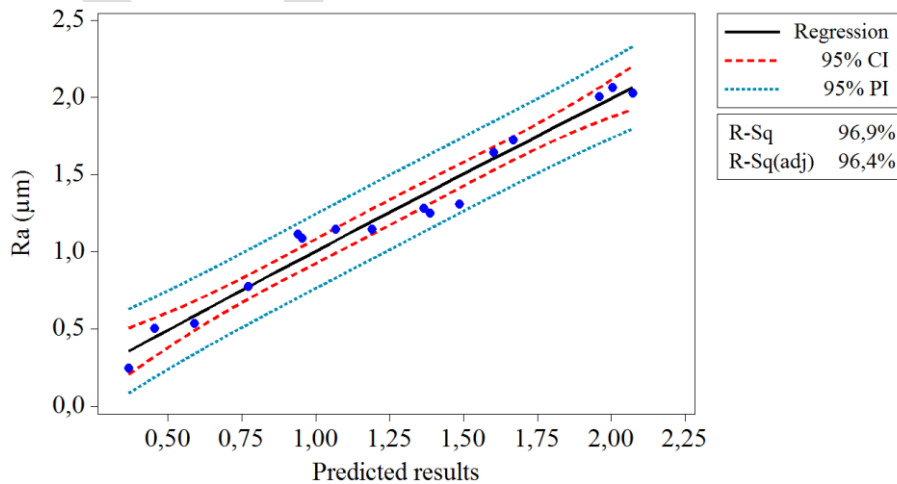
3.5. RSM ile Matematiksel Modelleme (Mathematical Modeling via RSM)

Yanıt yüzeyi metodu (RSM) ile kalite karakteristiklerinin analitik modelleri, kontrol faktörlerinin ikinci dereceden regresyon analizi (Eşitlik 8) yapılarak bulunur. Eşitlik 8'de η tahmin edilen tepkiler (Ra ve BUE), β_0 sabit katsayı, β_i ve β_{ii} regresyon katsayıları, X_i bağımsız değişken değerleri ve k parametre sayısıdır. Eşitlik 9 ve 10'da Ra ve BUE için elde edilen matematiksel modeller verilmiştir. Matematiksel modellerle hesaplanan tahminsel sonuçlar ile deney verilerinin karşılaştırmaları Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Ayrıca bu şekillerde analitik modeller için determinasyon katsayıları (R-Sq) da sunulmuştur. Buna göre Ra ve BUE için matematiksel modellerin R-Sq değerleri sırasıyla 96,9% ve 94,7%'dir. Bu sonuçlar matematiksel modelin güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini göstermektedir.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (8)$$

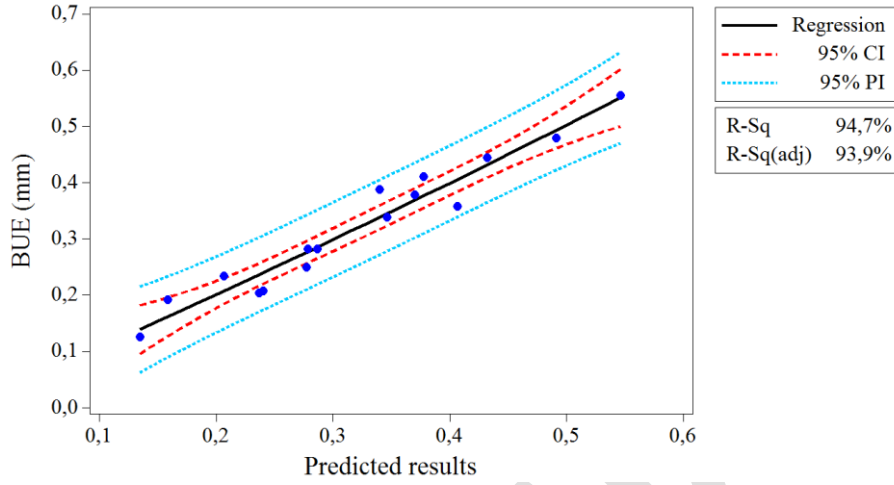
$$Ra = 0,115086 - 0,00415593 Vc + 42,662 f + 0,0916951 D + 2,91667 \times 10^{-6} Vc^2 - 0,0339646 Vc \times f + 0,00380417 Vc \times D - 27,6389 f^2 - 2,39811 f \times D - 0,0337188 D^2 \quad (9)$$

$$BUE = 0,543205 - 0,0154486 Vc + 2,88547 f + 0,0135245 D + 0,000133186 Vc^2 + 0,0490007 Vc \times f - 0,000310768 Vc \times D - 14,2436 f^2 - 0,0365091 f \times D + 0,0019548 D^2 \quad (10)$$



Şekil 7. Ra için deneysel ve tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması

Figure 7. Comparison of the experimental and predicted results for Ra



Şekil 8. BUE için deneysel ve tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması
Figure 8. Comparison of the experimental and predicted results for BUE

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, Custom 450 alaşımının karbür matkapla delinmesi sonucu ölçülen Ra ve BUE değerleri incelenmiş ve GRA ile kontrol faktörlerine bağlı eş zamanlı optimizasyonları yapılmıştır. Ek olarak, Ra ve BUE için matematiksel modeller yanıt yüzeyi metodu ile elde edilmiştir. Çalışma sonucu elde edilen çıkarımlar şunlardır;

- f'deki artışla beraber Ra ve BUE değerleri olumsuz yönde etkilenmiş ve değerler yükselme eğilimine girmiştir.
- BUE oluşumu kesme hızının artmasıyla birlikte önemli ölçüde düşmüştür. Bu durum, BUE dayanımının yükselen hız ile artan sıcaklıklardan etkilenmesine atfedilmiştir.
- Varyans analizi ile elde edilen sonuçlara göre; Ra üzerinde f'nin 93,11% ve BUE üzerinde Vc'nin 58,14% oranlarıyla en etkili kontrol faktörleri olduğu görülmüştür.
- Kesici takım aşınması üzerinde Vc'deki artışla beraber azalan BUE neticesinde adhesiv aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir.
- Ürün kalitesini etkilemeyecek BUE oluşumu kesici takımı koruyan ek bir tabaka gibi işlev görmüştür.
- GRG ile yapılan eş zamanlı optimizasyon sonucunda en önemli kontrol faktörü 0,3748 değeri ile f olduğu belirlenmiştir.
- Geliştirilen matematiksel modellere ait yüksek R^2 değerleri modellerin güvenle kullanılabileceğini gösteren önemli bir parametredir (Ra: 96,9% ve BUE: 94,7%).

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (MYO801202B33) tarafından desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Basmacı G., 2018, "Optimization of processing parameters of AISI 316 Ti stainless steels", *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6 (3), 01-07.
- [2] Darwin JD., Lal DM., Nagarajan G., 2008, "Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18%Cr martensitic stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 241-247.
- [3] Outeiro JC., Umbrello D., M'Saoubi R., 2006, "Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1786-1794.
- [4] Tekaslan Ö., Gerger N., Şeker U., 2008, "AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması", *Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi*, 10 (2), 3-12.
- [5] Gökçe H., 2019, "Optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling of Custom 450 through the Taguchi method", *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11, Doi: 10.1155/2019/5868132.
- [6] İnternet:<https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/custom%20450.pdf>
- [7] Uysal A., 2017, "Ferritik paslanmaz çeliğin çok duvarlı karbon nanotüp katkılı kesme sıvısı kullanılarak minimum miktarda yağlama yöntemi ile frezelenmesinde kesme sıcaklığının incelenmesi", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32 (3), 645-650.
- [8] Özbek NA., Çiçek A., Gülesin M. Özbek O., 2017, "AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi" *Journal of Polytechnic*, 20 (1), 43-49.
- [9] Kalpakjian S., Schmid S., 2014, "Manufacturing Engineering and Technology", 7th ed., Pearson Education Inc, Singapore, 625–665.
- [10] Das R., Barik T., 2014, "An experimental study on the burr formation in drilling of aluminum channels of rectangular section", 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR), 831–85.
- [11] Kurt M., Kaynak Y., Bakır B., Köklü U., Atakök G., Kutlu L., 2009, "Experimental investigation and Taguchi optimization for the effect of cutting parameters on the drilling of Al 2024-t4 alloy with diamond like carbon (DLC) coated drills", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.
- [12] Tonshoff HL., Spintig W., König W., Neises A., 1994, "Machining of holes developments in drilling technology", *Annals of the CIRP*, 43 (2), 551-560.
- [13] Çakır A., Bahtiyar O., Şeker U., 2014, "Farklı soğutma şartları ile farklı kesme parametrelerinin AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımlarında delik delme işlemlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi", 16. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 30 Haziran – 03 Temmuz 2014, İzmir, Türkiye.
- [14] Yağmur S., Acır A., Şeker U., Günay M., 2013, "An experimental investigation of effect of cutting parameters on cutting zone temperature in drilling", *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 28 (1), 1-6.
- [15] SEKMEN M., GÜNAY M., ŞEKER U., 2015, "Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi", *Journal of Polytechnic*, 18 (3), 141-148.
- [16] Karayel D., 2008, "Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3125–3137.
- [17] Kalpakjian, S., Schmid SR., 2009, "Manufacturing Engineering and Technology 6th ed.", Pearson Education.
- [18] Kakati AK., Chandrasekaran M., Mandal A., Singh AK., 2011, "Prediction of optimum cutting parameters to obtain desired surface in finish pass end milling of aluminium

- alloy with carbide tool using artificial neural network”, World Academy of Science and Engineering and Technology, 5 (9), 1929-1935.
- [19] Kopaji J., Bahor M., 1999, “Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product”, Journal of Materials Processing Technology, 92-92, 381-387.
- [20] Günay M., Meral T., 2020, “Modelling and multiresponse optimization for minimizing burr height, thrust force and surface roughness in drilling of ferritic stainless steel”, Indian Academy of Sciences - Sādhanā, 45, 275, <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01490-3>.
- [21] Gaitonde VN., Karnik SR., Achyutha BT., Siddeswarappa B., 2005, “GA applications to RSM based models for burr size reduction in drilling”, J. Sci. Ind. Res. (India) 64, 347–353.
- [22] Kumar S., Rizvi Y., Kumar R., 2018, “A review of modelling and optimization techniques in turning processes”, Int. J. Mech. Eng. Technol. 9, 1146–56.
- [23] Mondal N., Mandal S., Mandal MC., 2020, “FPA based optimization of drilling burr using regression analysis and ANN model”, Measurement, 152, 1-10.
- [24] Dörterler M., Şahin İ., Gökçe H., 2019, “A grey wolf optimizer approach for optimal weight design problem of the spur gear”, Engineering Optimization, 51 (6), 1013-1027, DOI: 10.1080/0305215X.2018.1509963.
- [25] Özyürek D., Kalyon A., Yıldırım M., Tuncay T., Çiftçi İ., 2014, “Experimental investigation and prediction of wear properties of Al/SiC metal matrix composites produced by thixomoulding method using Artificial Neural Networks”, Materials & Design, 63, 270-277, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.005>.
- [26] Öktem H., Erzurumlu T., Kurtaran H., 2005, “Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness”, Journal of Materials Processing Technology, 170 (1–2), 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.096>
- [27] Suresh PVS., Rao PV., Deshmukh SG., 2002, “A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42 (6), 675-680, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00005-6).
- [28] Zhang JZ., Chen JC., 2009, “Surface roughness optimization in a drilling operation using the taguchi design method”, Materials and Manufacturing Processes, 24 (4),459-467, DOI: 10.1080/10426910802714399.
- [29] Abbas AT., Pimenov DY., Erdakov IN., Taha MA., Soliman MS., El Rayes MM., 2018, “ANN surface roughness optimization of AZ61 magnesium alloy finish turning: minimum machining times at prime machining costs”, Materials, , 11 (5), 808; <https://doi.org/10.3390/ma11050808>.
- [30] Toulfatzis AI., Pantazopoulos GA., David CN., Sagris DS., Paipetis AS., 2018, “machinability of eco-friendly lead-free brass alloys: cutting-force and surface-roughness optimization”, Metals, 8 (4), 250; <https://doi.org/10.3390/met8040250>
- [31] Çaydaş U., Hasçalık A., Buytoz Ö., Meyveci A., 2011, “Performance evaluation of different twist drills in dry drilling of AISI 304 austenitic stainless steel”, Mater. Manuf. Process. 26, 951–960.
- [32] Bacchewar PB., Singhal SK., Pandey PM., 2007, “Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221 (1), 35-52, <https://doi.org/10.1243/09544054JEM670>
- [33] Çiçek A., Kıvak T., Ekici E., 2015, “Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with

- cryogenically treated HSS drills”, Journal of Intelligent Manufacturing, 26, 295-305, Doi: 10.1007/s10845-013-0783-5.
- [34] Mavi A., 2018, “Gri ilişkisel analiz yöntemi ile dubleks paslanmaz çeliklerin delinmesinde yüzey form özelliklerini etkileyen optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji 6, 634–643.
- [35] <https://www.ulbrich.com/uploads/data-sheets/Custom-450-Stainless-Steel-Wire-UNS-S45000.pdf>
- [36] İpek Ç., 2018, “Konut satın alma probleminin ahp temelli gri ilişkisel analiz yöntemi ile değerlendirilmesi”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Burdur.
- [37] Yılmaz E., Güngör F., Hartomacioğlu S., 2019, “AISI 4340 malzemesinin torna ile işleminde gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak uygun takım tutucu (kater) seçimine karar verilmesi”, Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2), 7-13.
- [38] Yılmaz E., Güngör F., 2010, “Gri ilişkisel analiz yöntemine göre farklı sertliklerde optimum takım tutucusunun belirlenmesi”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 11-12 Kasım 2010- Balıkesir.
- [39] Yaşar N., 2019, “Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA”, J. Mech. Sci. Technol. 33, 4771–4781.
- [40] Amran MA, Salmah S, Hussein NIS, Izamshah R, Hadzley M, Sivaraos, Kasim MS, Sulaiman MA 2013 Effects of machine parameters on surface roughness using response surface method in drilling process. Procedia Eng. 68: 24–29
- [41] Çiftçi İ., 2004, “AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kaplanmış sementit karbür kesici takımla işlenmesi esnasında oluşan takım aşınması”, Teknoloji, 7 (3), 489-495.
- [42] Ezugwu EO., Kim SK., 1995, “The performance of cermet cutting tools when machining an Ni-Cr-Mo (En 24) steel”, Lubrication Engineering, 51 (2), 139-145.
- [43] Material-Removal Process and Machine Tools, Mark Standart Handbook for Mechanical Engineers, 9th ed., New York, Mc Graw Hill
- [44] Tekiner Z., Yeşilyurt S., 2004, “Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”, Materials & Desing, 25 (6), 507-513.
- [45] Trent EM., “Metal Cutting”, Butterworths Pres, London, 1989.