

Tel Erozyonla Kesmede Çoklu Kesim Yöntemi Kullanılarak Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu

Salih Güvercin^{1,*} , Eren Kocaoğlu² 

¹Amasya Üniversitesi, Amasya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Mühendislik Fakültesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 04.11.2023

Kabul: 14.12.2023

Anahtar Kelimeler:

WEDM

Ana kesim

Son kesim

Yüzey pürüzlülüğü

Optimizasyon

ÖZET

Tel erozyonla işlemede (WEDM) son kesim işlemi, ana kesim işleminden sonra elde edilen yüzeyden çok az miktarda talaş kaldırarak yüzey özelliklerini ve geometrik doğruluğu iyileştirmek için olası bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, SAE 1080 karbon çeliğinin tel erozyon tezgâhında kesilmesi sırasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), kuadratik ortalama pürüzlülük (R_q) ve maksimum pürüzlülük (R_z) kriterlerine kesme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Kontrol faktörleri, tezgâh değişkenlerinden vurum süresi (T_{on}), tabla ilerleme hızı (T_s) ve vurum bekleme süresi (T_{off}) olarak belirlenmiştir. Deneyler, Taguchi L9 ortogonal dizisine göre yapılmıştır. R_a , R_q ve R_z pürüzlülük kriterleri üzerinde kontrol faktörlerinin etki düzeylerini belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Ayrıca, ana kesim ve son kesim uygulamaları için “en küçük en iyi” yaklaşımı kullanılarak parametre optimizasyonu yapılmıştır. ANOVA sonuçlarına göre, değerlendirilen yüzey pürüzlülük kriterleri üzerinde en etkin kesme parametresini ana kesim ve son kesimde vurum süresi olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, son kesim işleminin ana kesim işlemine göre R_a , R_q ve R_z için sırasıyla ortalama %21.5, %10.5 ve %12.5’lik bir iyileşme elde edildiği görülmüştür.

Optimization of Surface Roughness Using Multiple-Cut Method in Wire Electrical Discharge Machining

ARTICLE INFO

Received: 04.11.2023

Accepted: 14.12.2023

Keywords:

WEDM

Main cut

Trim cut

Surface roughness

Optimization

ABSTRACT

The trim cut process in wire electrical discharge machining (WEDM) is considered as a possible solution to improve surface properties and geometric accuracy by removing a small amount of chip from the surface obtained after main cut process. In this work, the effects of cutting parameters on the mean surface roughness (R_a), quadratic mean roughness (R_q) and maximum roughness (R_z) criteria formed during the cutting of SAE 1080 carbon steel on the WEDM machine were investigated. Control factors were determined as the machine variables pulse duration (T_{on}), table feed speed (TS) and pulse interval (T_{off}). Experiments were performed based on the Taguchi L9 orthogonal sequence. Analysis of variance (ANOVA) was applied to define the impact levels of control factors on the R_a , R_q and R_z roughness criteria. Additionally, parameter optimization was performed using the “smallest is best” approach for main cutting and final cutting applications. Based on the ANOVA outcomes, it was detected that the most influence cutting parameter on the considered surface roughness criteria was the pulse duration in the main cut and trim cut. As a result of the study, it was seen that an average improvement of 21.5%, 10.5% and 12.5% was achieved for R_a , R_q and R_z , respectively, in the trim cut process compared to the main cut process.

*Sorumlu yazar, e-posta: salih.guvercin@hotmail.com

To cite this article: S. Güvercin, E. Kocaoğlu, Tel Erozyonla Kesmede Çoklu Kesim Yöntemi Kullanılarak Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3),155-166, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1386132>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tel elektro erozyonla işleme (WEDM), geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan iş parçalarının ve karmaşık profillerin üretiminde gerçek çözümü geliştirmek için kullanıldığından, mekanik endüstrisi için çok önemli bir yer tutmaktadır. Tel erozyon işleme yüksek mekanik ve ısı özelliklerinden dolayı işlenmesi zor malzemeler olarak bilinen süper alaşımlar, metal, seramikler, ve matrisli kompozitler gibi malzemelerin işlenmesinde sıklıkla kullanılan geleneksel olmayan imalat metotlarından biridir [1,2]. Tel erozyon yönteminin çalışma prensibi temel olarak iletken iş parçasından, servo motor yardımıyla pirinç, tungsten, bakır, molibden veya kaplanmış tel kullanılarak temas yüzeyi oluşturulmadan talaş kaldırılması işlemidir. Burada, ısınma ve soğumanın tekrarlandığı karmaşık bir elektro termal süreç gerçekleşir [3-5]. Jadam vd., yapmış oldukları çalışmada bazı malzemelerin (Ti-6Al-4V vb) WEDM performansı, zayıf termal iletkenliği, sert ve kırılğan karbür/oksit açısından zengin tabakanın oluşması ve genellikle parça ürününün yorulma performansını etkileyen yüzey çatlama nedeniyle bir miktar sınırlı olduğunu ve bu nedenle çoklu kesim stratejisi, işlemeden kaynaklanan kusurları azaltmak için uyarlandığını çoklu kesim işleminin, bir ana/kaba kesimin ardından bir dizi ince/son kesimden oluştuğunu ve ana/kaba kesimden sonra ince/son kesim yaparak bu tür sorunları iyileştirdiğini tespit etmişler [6]. Rehan vd., çalışmalarında, çok pasolu işlemin işlenen yüzeydeki hasarı en aza indirmek için kanıtlanmış bir teknik olduğunu belirtmiştir.. Ancak paso sayısını arttırmak verimliliği düşürür. Bu nedenle, kesme işlemi için tel ofset değerinin dikkatli seçilmesi, proses verimliliğini korumak ve geçiş sayısını minimumda tutmak açısından çok önemli olduğunu belirlemişler [7]. Usman vd., prosesin termo-elektrik doğasından dolayı yeterli seviyede yüzey bütünlüğüne sahip olması zordur. Bu nedenle çoklu kesime ihtiyaç duyulduğunu tespit etmişler [8]. Goswami vd., son kesim uygulamasının kaba kesim uygulaması ile karşılaştırıldığında yüksek yüzey kalitesi için hassas kesim potansiyelini açıkça gösterdiğini belirlemişler [9]. Janga vd., dört farklı malzeme ile kaba kesim ve birden çok son kesim işlemleri yapmışlardır. Sonuç olarak tek ve uygun tel ofseti sayesinde son kesim uygulanmasının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği sonucuna varmışlardır [10]. Sharma vd., kaba kesim ve iki farklı son kesim işlemi yapmışlar ve sonuç olarak son kesimin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğunu tespit etmişler [11]. Rohilla vd., kaba kesim ve son kesim işlemi yapmışlar ve sonuç olarak son kesimin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğunu belirlemişler [12]. Oliver vd., seramik kompozit malzemesini tel erozyon tezgâhında ana kesim, ana kesimden sonra son kesim şeklinde işlemişler sonuç olarak ana kesim sonrasında malzemede büyük çentiklerin oluştuğunu ve son kesimde yüksek deşarj verilirse çentiklerin daha da büyüebileceğini gözlemlemişler [13]. Singh vd., titanyum alaşımlı malzemeyi ana kesim ve son kesim 1. son kesim 2. şeklinde işleyerek yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşler ve ana kesimde yüksek çatlaklar olduğu ve son kesimlerde daha düşük çatlakların olduğunu ve yaklaşık %30 azaltıldığını tespit etmişler [14]. Lia vd. Inconel 718 iş parçasını ana kesim ve son kesim olarak işlemişler ve ana kesimin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu ve daha düşük bir deşarj ile yapılan son kesimde yüzey pürüzlülük değerinin düşük olduğunu tespit etmişler [15]. Arikatla vd., bir ana kesim ve üç son kesim işlemi yapmışlar ve son kesim işlemlerinin ana kesim işlemlerinden daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü olduğunu çalışmaları sonucu tespit etmişler [16]. Liu vd., ana kesim ve son kesim deneyinde, ana kesime göre son kesim işleminde daha iyi yüzey elde ettiklerini ifade etmişler [17]. Li vd., bir ana kesim ve üç son kesim işlemi yapmışlar ve son kesim işlemlerinin ana kesim işlemlerinden daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü olduğunu ayrıca son kesim sayısı arttıkça yüzeyin daha iyi olduğunu çalışmaları sonucu belirtmişler [18]. Cao vd., iki farklı malzemeyi çoklu kesim yöntemi ile işlemişlerdir. İşleme sonuçlarına bakıldığında kesme geçişlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü ayrıca farklı malzemelerde aynı parametre kullanılmasına rağmen malzeme özelliklerinden dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinde farklılıkların olduğunu tespit etmişler [19]. Selvakumar vd., iş parçasını çoklu kesim yöntemi kullanarak işlemişler ve düşük deşarj ile yapılan son kesimde daha düşük yüzey değeri elde ettiklerini belirtmişler [20]. Kumar vd., kaba kesim ve son kesim işleminde, ana kesime göre son kesim işleminde yüzey pürüzlülüğün düşük olduğunu tespit etmişler [21]. Kumar vd., katkılı dielektrik sıvı ile yapmış oldukları kaba kesim ve son kesim işleminde, ana kesimde deşarj yüksek olsa da son kesim işleminde yüzey pürüzlülüğün daha iyi

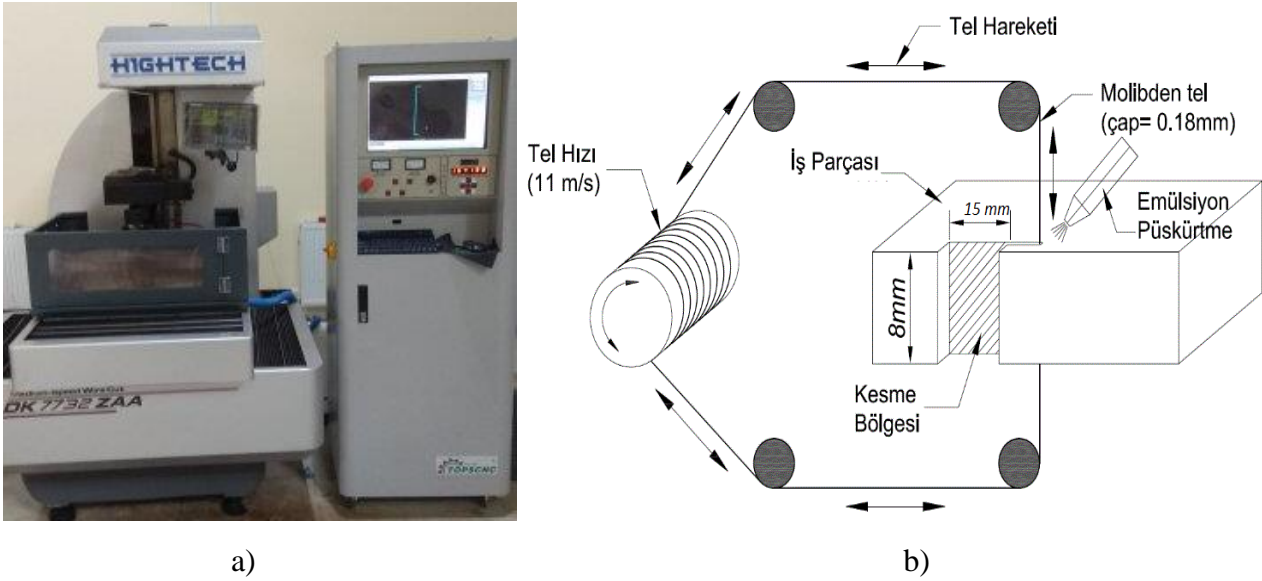
olduğunu hatta katkılı dielektrik sıvı kullanılarak yapılan son kesim işleminde çok daha iyi bir yüzey kalitesi elde ettiklerini tespit etmişlerdir [22].

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, işlenen parçaların tek kesim yapılarak istenilen yüzey kalitesi, yüzey sertliği, ölçü doğruluğu gibi sonuçların elde edilemediği görülmüştür. Bu nedenle, çoklu kesim yöntemleri kullanılarak istenilen ölçü tamlığı ve yüzey bütünlüğü sağlanabildiği belirtilmektedir. Çoklu kesim, ana kesim (main) ve son kesim (trim) olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, takım imalatında kullanılan yüksek karbonlu bir çeliğin tel elektro erozyon ile çoklu kesim uygulanarak kesilmesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü için işleme parametreleri optimizasyonu hedeflenmiştir.

2. MALZEME VE METODOLOJİ (MATERIAL AND METHODOLOGY)

2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Bu çalışmada, bıçak, matkap veya bazı aşınma direnci gerektiren kesme aletlerinde kullanılan iş parçası malzemesi SAE 1080 çeliği kullanılmıştır. Deneyler, Şekil 1(a)'da gösterilen Hightech DK-7732 CNC WEDM tel erozyon tezgâhında yapılmıştır. Kesici tel olarak 0.18 mm Molibden alaşım tel, tel erozyon tezgâhında dielektrik sıvı olarak saf su ve JR3A reçine 1/30-40 (kg/kg) (JR3A/pure water) oranında emülsiyonu kullanılmıştır. Molibden tel kullanan tezgâhlarda tel bir tambura sarılı olarak devamlı kullanılır. Tel hızı 11 m/s, yalıtkan emülsiyon sirkülasyon basıncı ise 1 bar seviyesinde sabit olarak uygulanmıştır. Deneysel kurulum şematik olarak Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.

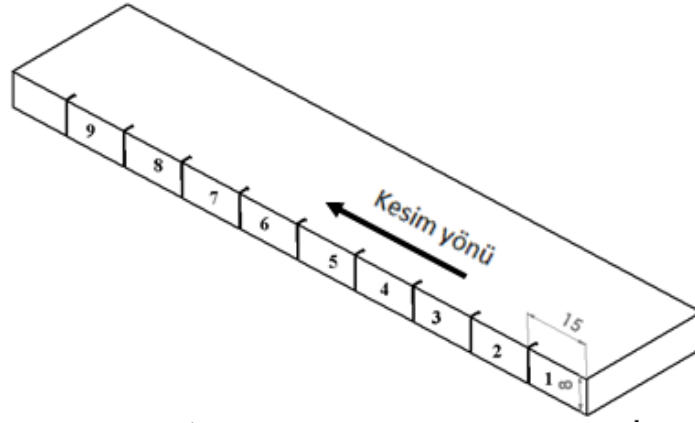


Şekil 1 a) Deneyde kullanılan Tel Erozyon Tezgâhı b) Deneysel süreç şeması (a) wire erosion machine used in the experiment, b) Experimental process diagram)

Yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surfes SJ-210 cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, ISO 4288 standardına göre yapılmış olup kesim uzunluğu (λc) 0.8 mm ve değerlendirme uzunluğu (Lt) 4 mm seçilmiştir.

2.2. İş Parçası Özellikleri (Workpiece Properties)

Çalışmada iş parçası olarak %0.80 C, %0.08 Mn, %0.04 P ve %0.05 S gibi içeriğe sahip yüksek karbonlu bir çelik olan SAE 1080 çelik kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan iş parçası boyutları Şekil 2'de verilmiştir. İş parçası üzerinde, gösterilen yönde 15 mm işleme uzunluğunda deney tasarımına göre ana kesim ve son kesim için 9 kesme işlemi yapılmıştır.



Şekil 2. İş parçası ölçüleri (Workpiece dimensions)

2.3. Deneysel Tasarım ve Analizi (Experimental Design and Analysis)

İşlenen parçalarda hem istenilen yüzey bütünlüğü ve ölçü doğruluğu sağlamak hem de üretim süresince harcanan zaman ve maliyeti düşürmek için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, zaman ve maliyeti düşürerek tasarruf sağlamak adına Taguchi yöntemi tercih edilmiş olup, bu metodoloji talaşlı imalat süreçlerinde en çok kullanılan optimizasyon yöntemlerinden birisidir. Taguchi L_9 (3^3) deney tasarımı için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 1’de verilmiştir. Deney tasarımında tercih edilen üç farklı parametre, vurum süresi (T_{on}), vurum bekleme süresi (T_{off}) tabla ilerleme hızı (T_S) için üç seviye seçilmiştir. Faktörlerin/parametrelerin seviyeleri belirlenirken ön deney sonuçlarından elde edilen veriler ve tel erozyon üretici firmanın belirlemiş olduğu en uygun değerler dikkate alınmıştır. Deneysel verilerin analizinde Minitab programı kullanılmıştır.

Tablo 1. Deneysel tasarım için kontrol faktörleri (Control factors for experimental design)

Faktörler	Sembol	Birim	Seviyeler		
			1	2	3
Vurum süresi	T_{on}	μs	12	24	48
Bekleme süresi	T_{off}	μs	115	208	406
Tabla ilerleme hızı	T_S	(mm/dk)	0.5	1	2

Taguchi optimizasyon metodolojisinde, performans kriteri (çıkıtı) için beklenen duruma göre “en büyük-en iyi”, “nominal-en iyi” ve “en küçük-en iyi” yaklaşımlarından birisi uygulanarak optimum faktörler bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülük kriterleri olan R_a , R_q ve R_z değerlerinin küçük olması istenildiğinden, bu çalışmada Taguchi optimizasyonunda “en küçük-en iyi” yaklaşımı tercih edilmiş olup, bu yaklaşım fonksiyonu Eş.1’de verilmiştir [23].

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

Eş. 1’de “n” deney sayısı ve “y” performans kriterini temsil etmektedir.

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

Bu çalışmanın amacı; tel elektro erozyon tezgâhında kesilen iş parçası yüzeyinde oluşan pürüzlülük kriterlerinden R_a , R_q ve R_z değerlerinin en küçük olmasını sağlayacak faktör seviyelerini elde edebilmektir. Bu amaca ulaşmak için Taguchi deney tasarım ve optimizasyon uygulamalarından L_9 (3^3) ortogonal deney deseni tercih edilmiştir.

3.1 Deneysel veriler ve Taguchi optimizasyonu (Experimental data and Taguchi optimization)

Taguchi optimizasyon yönteminde analiz yapmak için yüzey pürüzlülük kriterleri olan R_a , R_q ve R_z için yapılan üç ölçüm değerinin aritmetik ortalaması alınmış ve Eş.1 kullanılarak “en küçük en iyi” yaklaşımı ile ilgili cevap değişkenleri için Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır”. Dönüştürülen sonuçlarda sinyal, ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü ise ölçülen değerlerde istenmeyen faktörlerin oranını temsil eder [24]. Ana kesim sonrası ölçülen R_a , R_q ve R_z değerleri Tablo 2’de, son kesimde ölçülen R_a , R_q ve R_z değerleri ise Tablo 5’te sunulmuştur.

Tel erozyonda uygulanan çoklu kesme sürecinde (Ana kesim+son kesim) R_a , R_q ve R_z kriterleri üzerinde kontrol parametrelerinin (T_{on} , T_S ve T_{off}) etkisi, S/N oranları tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiş ve ana kesim için Tablo 3 ve 4’te, son kesim için Tablo 6 ve 7’de verilmiştir. Optimum seviyeler, L_9 dikey dizinindeki kontrol faktörlerinin farklı seviyeleri değerlendirilerek bulunmuştur. Ayrıca, kontrol faktörleri ve seviyelerinin değerlendirilen pürüzlülük kriterlerine etkisi ana kesim için Şekil 3’te, son kesim için Şekil 4’te grafik olarak verilmiştir.

Tablo 2. Ana kesim için deney sonuçları ve S/N oranları.(Experiment results and S/N ratio for the main cut)

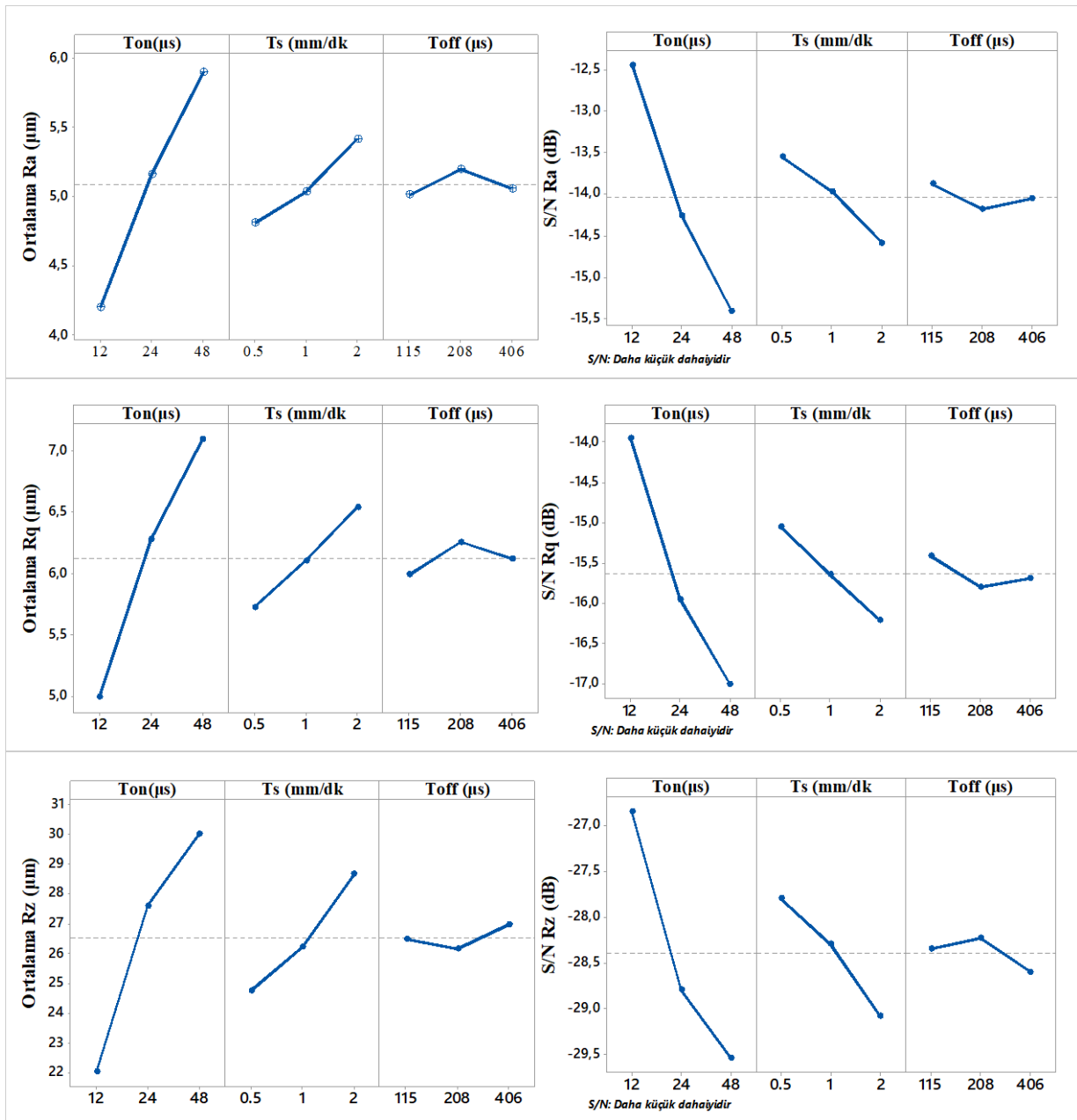
Deney no	T_{on}	T_S	T_{off}	R_a	S/NR_a	R_q	S/NR_q	R_z	S/NR_z
	μs	mm/dk	μs	(μm)	(dB)	(μm)	(dB)	(μm)	(dB)
1	12	0.5	115	3.909	-11.841	4.562	-13.184	20.698	-26.319
2	12	1	208	4.183	-12.430	5.083	-14.122	21.335	-26.582
3	12	2	406	4.498	-13.060	5.331	-14.536	24.043	-27.620
4	24	0.5	208	4.997	-13.974	5.943	-15.480	24.884	-27.918
5	24	1	406	5.150	-14.236	6.354	-16.061	28.245	-29.019
6	24	2	115	5.347	-14.562	6.542	-16.314	29.666	-29.445
7	48	0.5	406	5.522	-14.842	6.666	-16.477	28.660	-29.146
8	48	1	115	5.776	-14.842	6.877	-16.748	29.091	-29.275
9	48	2	208	6.407	-16.133	7.748	-17.784	32.269	-30.176
			Ortalama	5.088	-13.991	6.123	-15.634	26.543	-28.388

Tablo 3. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait tepki tablosu (Response table of roughness criteria for the main cutting)

Seviye	R_a			R_q			R_z		
	T_{on}	T_S	T_{off}	T_{on}	T_S	T_{off}	T_{on}	T_S	T_{off}
	Ortalama (μm)			Ortalama (μm)			Ortalama (μm)		
1	4.197	4.809	5.011	4.992	5.724	5.994	22.03	24.75	26.49
2	5.165	5.036	5.196	6.28	6.105	6.258	27.6	26.22	26.16
3	5.902	5.417	5.057	7.097	6.54	6.117	30.01	28.66	26.98
Fark	1.705	0.608	0.185	2.105	0.817	0.264	7.98	3.91	0.82
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Tablo 4. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait S/N oranları (S/N ratios of roughness criteria for the main cutting)

Seviye	R_a			R_q			R_z		
	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}
	S/N (dB)			S/N (dB)			S/N (dB)		
1	-12.44	-13.55	-13.88	-13.95	-15.05	-15.42	-26.84	-27.79	-28.35
2	-14.26	-13.97	-14.18	-15.95	-15.64	-15.8	-28.79	-28.29	-28.23
3	-15.4	-14.59	-14.05	-17	-16.21	-15.69	-29.53	-29.08	-28.59
Fark	2.96	1.03	0.3	3.06	1.16	0.38	2.69	1.29	0.37
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3



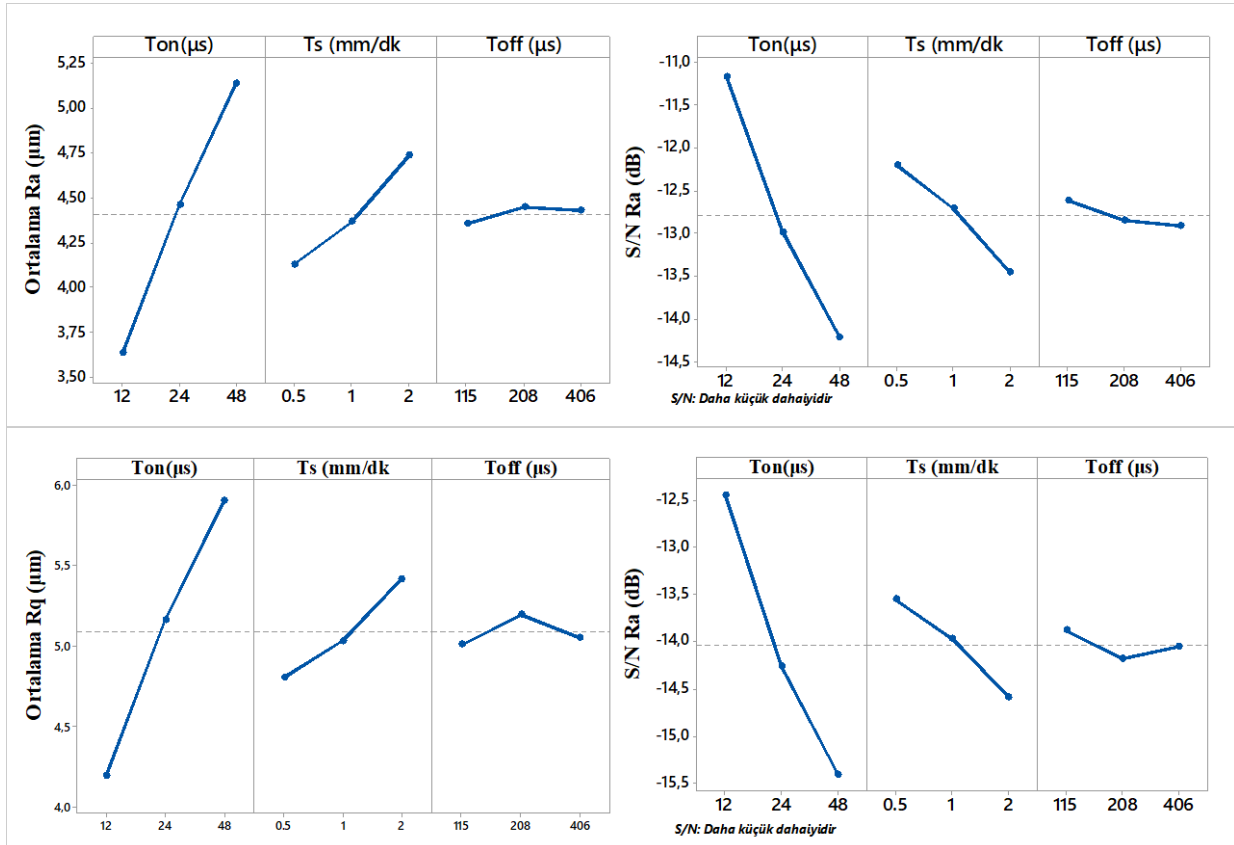
Şekil 3. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait ortalama ve S/N oranları grafikleri (Average and S/N ratio graphs of roughness criteria for the main cut)

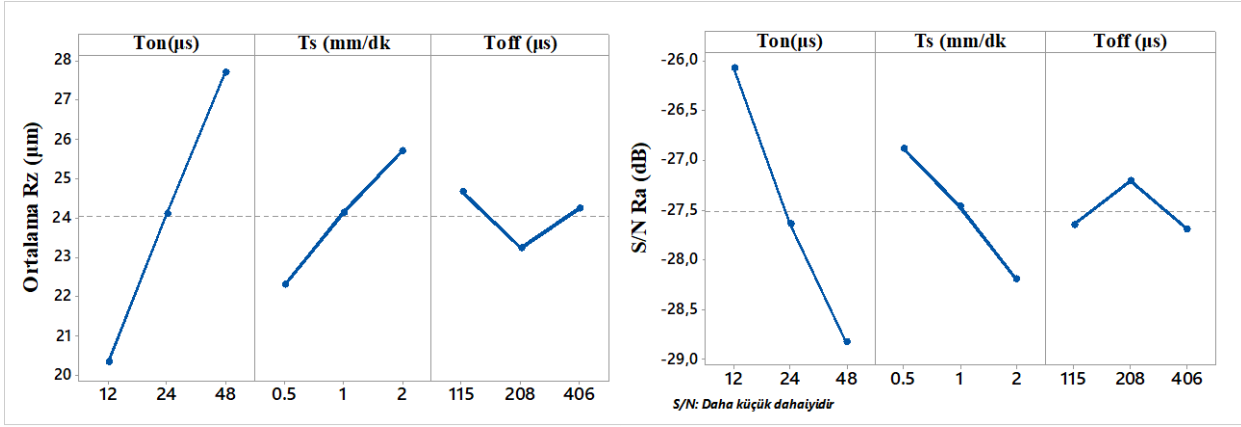
Ana kesim deneysel sonuçların analizinde, R_a ortalaması $5,088 \mu m$, S/N oranı ortalaması $13,991$ dB olarak belirlenmiştir. R_q ortalama değeri $6,123 \mu m$, R_q için S/N oranı $-15,634$ dB olarak elde

edilmiştir. Maksimum pürüzlülük, R_z ortalaması 26,543 μm R_z için ortalama S/N oranı -28,388 dB olarak hesaplanmıştır. T_{on} , T_s ve T_{off} faktörlerinin R_a , R_q ve R_z değerlerine etkisi, S/N oranı tepki tablosu yardımıyla belirlenmiştir (Tablo 3 ve 4). Optimum seviyeler, dikey dizideki tüm faktör kombinasyonlarına ait hesaplanan ortalama değerler ve S/N oranları analiz edilerek bulunmuştur. Ayrıca, kontrol faktörlerinin R_a , R_q ve R_z değerlerine etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. R_a ve R_q pürüzlülük kriterleri için optimum faktör seviyeleri, T_{on1} , T_{s2} , T_{off1} olarak ve R_z için T_{on1} , T_{s1} , T_{off2} olarak bulunmuştur. R_a , R_q ve R_z için faktörlerin optimum seviyeleri; düşük vurum süresi (12 μs), düşük tabla ilerleme (0,5 mm/dk) ve orta vurum bekleme süresi (208 μs) olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Son kesim için deney sonuçları ve S/N oranları (Experiment results and S/N ratio for trim cut)

Deney no	T_{on}	T_s	T_{off}	R_a	S/N R_a	R_q	S/N R_q	R_z	S/N R_z
	μs	mm/dk	μs	(μm)	(dB)	(μm)	(dB)	(μm)	(dB)
1	12	0.5	115	3.216	-10.146	4.083	-12.220	18.146	-25.176
2	12	1	208	3.590	-11.102	4.118	-12.294	18.369	-25.282
3	12	2	406	4.098	-12.251	5.333	-14.539	24.436	-27.761
4	24	0.5	208	4.339	-12.748	5.206	-14.330	23.794	-27.529
5	24	1	406	4.349	-12.768	5.321	-14.520	23.354	-27.367
6	24	2	115	4.693	-13.429	5.716	-15.142	25.162	-28.015
7	48	0.5	406	4.839	-13.695	5.820	-15,298	24,916	-27,930
8	48	1	115	5.157	-14.248	6.414	-16.143	30.664	-29.733
9	48	2	208	5.420	-14.680	6.457	-16.201	27.527	-28.795
			Ortalama	4.411	-12.785	5.385	-14.520	24.040	-27.509





Şekil 4. Son kesi için pürüzlülük kriterlerine ait ortalama ve S/N oranları grafikleri (Average and S/N ratio graphs of roughness criteria for the trim cut)

Tablo 6. Son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait tepki tablosu (Response table of roughness criteria for trim cut)

Seviye	R_a			R_q			R_z		
	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}
	Ortalama (µm)			Ortalama (µm)			Ortalama (µm)		
1	3.635	4.131	4.355	4.511	5.036	5.404	20.32	22.29	24.66
2	4.46	4.365	4.45	5.414	5.284	5.26	24.1	24.13	23.23
3	5.139	4.737	4.429	6.23	5.835	5.491	27.7	25.71	24.24
Fark	1.504	0.606	0.094	1.719	0.799	0.231	7.9	3.42	1.43
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Tablo 7. Son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait S/N (S/N of roughness criteria for trim cut)

Seviye	R_a			R_q			R_z		
	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}	T_{on}	T_s	T_{off}
	S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)		
1	-11.17	-12.2	-12.61	-13.02	-13.95	-14.5	-26.07	-26.88	-27.64
2	-12.98	-12.71	-12.84	-14.66	-14.32	-14.27	-27.64	-27.46	-27.2
3	-14.21	-13.45	-12.9	-15.88	-15.29	-14.79	-28.82	-28.19	-27.69
Fark	3.04	1.26	0.3	2.86	1.34	0.51	2.75	1.31	0.48
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Son kesim deneysel sonuçların analizinde, R_a ortalaması 4,411 µm S/N oranı ortalaması -12.785 dB olarak belirlenmiştir. R_q ortalama değeri 5,385 µm, R_q için S/N oranı -14.520 dB olarak elde edilmiştir. Maksimum pürüzlülük, R_z ortalaması 24,080 µm, R_z için ortalama S/N oranı -27.509 dB olarak hesaplanmıştır. T_{on} , T_s ve T_{off} faktörlerinin yüzey pürüzlülük kriterlerine etkisi, S/N oranı tepki tablosu yardımıyla belirlenmiştir (Tablo 6 ve 7). Ek olarak, kontrol faktörlerinin R_a , R_q ve R_z değerlerine etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. R_a pürüzlülük kriterleri için optimum faktör düzeyleri, T_{on1} , T_{s1} , T_{off1} olarak, R_q için; T_{on1} , T_{s1} , T_{off3} olarak ve R_z için T_{on1} , T_{s1} , T_{off2} olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, ana kesimde olduğu gibi R_a , R_q ve R_z için optimum seviyeler; düşük vurum süresi (12 µs), düşük tabla ilerleme (0,5 mm/dk) ve orta vurum bekleme süresi (208 µs) olarak bulunmuştur [23, 24].

Bu çalışmada, ana kesim ve son kesim işlemlerinde ölçülen R_a , R_q ve R_z için optimum faktör seviyeleri en düşük vurum süresi ve tabla ilerlemesi ile orta vurum bekleme süresi olarak bulunmuştur (Tablo 2 ve 5). Bu parametreler için ana kesim ve son kesim işlemlerinde en küçük R_a , R_q ve R_z değerleri 1. deneyde, en yüksek değerler ise 9. deneyde bulunmuştur. Ana ve son kesim işlemleri sonucunda oluşan yüksek yüzey pürüzlülük değerleri iki sebebe atfedilmektedir. Birincisi, deşarj sırasında oluşan kıvılcımın işlenen malzemeyi eritmesi ve/veya buharlaştırması sırasında ortaya çıkan döküntülerin bir kısmının tekrar katı bir tabaka oluşturduğu ve bu yüzden yüzey pürüzlülüğünün artmasıdır [24]. İkincisi, iş parçanın işlenmesi sırasında kıvılcımlar sayesinde oluşan erimiş parçaların dielektrik sıvı tarafından tam olarak uzaklaştırılmamasıdır.

3.2. Varyans Analizi (Variance analysis)

Tel erozyon tezgâhında SAE 1080 çeliğinin kesilmesi işlemi için seçilen kesme parametrelerinin R_a , R_q ve R_z pürüzlülük kriterlerine etkilerini tespit edebilmek için ANOVA kullanılmıştır. ANOVA, %95 güvenirlilik seviyesi ($P < 0.05$) uygulanarak yapılmış olup, seçilen faktörlerin pürüzlülük kriterleri üzerindeki etki yüzdeleri tespit edilmiştir. Bu analizler Minitab 19 yazılımında gerçekleştirilmiştir. ANOVA tablosunda, serbestlik derecesi (DoF), kareler toplamı (SS), kareler ortalaması (MS), anlamlılık düzeyi (P) ve katkı oranı (%) gösterilmiştir. Ana kesim ve son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait ANOVA sonuçları Tablo 8 ve 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Ana kesim için ANOVA sonuçları (ANOVA results for main cut)

Faktör	DoF	SS	MS	F	P	(%)	
$R_a(\mu\text{m})$	T_{on}	2	4.38722	2.19361	153.41	0.006*	87.09*
	t_s	2	0.56635	0.28318	19.8	0.048*	11.24*
	T_{off}	2	0.05566	0.02783	1.95	0.339	1.10
	Artık hata	2	0.0286	0.0143			0.57
	Toplam	8	5.03783				100.00
S= 0.119 $R^2 = \% 99.43$ $R^2(\text{adj}) = \% 97.73$							
$R_q(\mu\text{m})$	T_{on}	2	6.7564	3.3782	143.93	0.007*	85.42*
	t_s	2	1.00165	0.50082	21.34	0.045*	12.66*
	T_{off}	2	0.10488	0.05244	2.23	0.309	1.33
	Artık hata	2	0.04694	0.02347			0.59
	Toplam	8	7.90987				100.00
S= 0.153 $R^2 = \% 99.41$ $R^2(\text{adj}) = \% 97.63$							
$R_z(\mu\text{m})$	T_{on}	2	100.56	50.28	59.13	0.017*	79.37*
	t_s	2	23.416	11.7079	13.77	0.068	18.48
	T_{off}	2	1.24	0.512	0.6	0.624	0.81
	Artık hata	2	1.701	0.8504			1.34
	Toplam	8	126.701				100.00
S= 0.922 $R^2 = \% 98.66$ $R^2(\text{adj}) = \% 94.63$							

Tablo 9. Son kesim için ANOVA sonuçları (ANOVA results for trim cut)

Faktör	DoF	SS	MS	F	P	(%)	
R _a (µm)	T _{on}	2	3.40388	1.70194	50.02	0.02*	84.12*
	T _S	2	0.55972	0.27986	8.23	0.108	1.83
	T _{off}	2	0.01472	0.00736	0.22	0.822	0.36
	Artık hata	2	0.06805	0.03402			1.68
	Toplam	8	4.04637				100.00
S= 0.184 R ² = % 98.32 R ² (adj) = % 93.27							
R _q (µm)	T _{on}	2	4.43623	2.21811	13.66	0.068	75.88
	T _S	2	1.00351	0.50175	3.09	0.244	17.17
	T _{off}	2	0.08167	0.04083	0.25	0.799	1.40
	Artık hata	2	0.32475	0.16237			5.55
	Toplam	8	5.84614				100.00
S= 0.402 R ² = % 94.45 R ² (adj) = % 77.78							
R _z (µm)	T _{on}	2	81.832	4.0916	3.56	0.219	65.13
	T _S	2	17.61	8.805	0.77	0.566	14.02
	T _{off}	2	3.226	1.613	0.14	0.877	2.57
	Artık hata	2	22.982	11.491			18.29
	Toplam	8	125.65				100.00
S= 3.388 R ² = % 81.71 R ² (adj) = % 26.84							

Tablo 8’de verildiği gibi, ana kesimde T_{on}, T_S ve T_{off} faktörlerinin R_a değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %87.09, %11.24 ve %1.10; R_q değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %85.42, %12.66 ve %0.59 ve R_z değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %79.37, %18.48 ve %01.34 olarak bulunmuştur. Son kesim için T_{on}, T_S ve T_{off} faktörlerinin R_a değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %84.12, %13.83 ve %1.68; R_q değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %75.88, %17.17 ve %1.40 ve R_z değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %65.13, %14.02 ve %2.57 olarak bulunmuştur (Tablo 9). Analiz sonuçları, R_a, R_q ve R_z değişiminde önemli faktörlerin vuru süresi ve tabla ilerleme hızı olduğunu göstermektedir. Vurum bekleme süresinin pürüzlülük kriterleri için istatistiksel olarak mühim olmadığı belirlenmiştir (P>0.05).

Yüzey pürüzlülüğü değişimleri incelendiğinde vurum süresi ve tabla ilerleme değerleri arttıkça yüzey pürüzlülüğünde kötüleşme olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün vurum süresinin tepe akımı ve tabla ilerleme hızından büyük oranda etkilendiği ve aynı zamanda vurum süresinin yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar da bunu doğrulamaktadır [14-20]. En iyi yüzey pürüzlülüğü 12 µs vurum süresi, 0.5 mm/dk ilerleme hızı ve 115 µs vurum bekleme süresi kullanılarak yapılan deneyde elde edilmiştir.

SAE 1080 çeliğinin çoklu kesim tekniği uygulanarak tel erozyonla kesilmesinde son kesim sonucunda yüzey pürüzlülük kriterleri (R_a, R_q ve R_z) değişimleri değerlendirilmiştir. Ana kesim ve son kesim için yüzey pürüzlülüğü açısından optimum kesme parametreleri aynı seviyelerde bulunmuştur. Sonuç olarak, ana kesime göre R_a, R_q ve R_z için sırasıyla ortalama % 21.5, %10.5 ve %12.5’lik bir iyileşme elde edilmiştir. Bu sonuç, çoklu kesimin yüzey kalitesi açısından tel erozyonla işlemede endüstriyel olarak kullanılması gerektiğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, SAE 1080 çeliğinin tel erozyon ile işlenmesinde, vurum süresi, tabla ilerleme hızı ve vurum bekleme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri çoklu kesim tekniği uygulanarak

araştırılmıştır. Taguchi deney tasarımı ve optimizasyon yöntemi ile yapılan araştırmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yüzeysel pürüzlülük kriterleri (R_a , R_q ve R_z) açısından vurum süresi ve ilerleme hızı arttıkça pürüzlülük değerlerinde artış gözlenirken, vurum bekleme süresi değişiminde anlamlı bir etki görülmemiştir.
- En düşük yüzeysel pürüzlülüğü, 12 μ s vurum süresi, 0.5 mm/dk ilerleme hızı ve 115 μ s bekleme süresi parametrelerinde elde edilmiştir.
- Varyans analizlerine göre, ortalama yüzeysel pürüzlülüğü (R_a) üzerinde en etkin kesme parametresi ana kesim ve son kesimde sırasıyla %87.09 ve %84.12 oranla vurum süresi olduğu anlaşılmıştır.
- Son kesim sonucunda, R_a , R_q ve R_z için sırasıyla % 21.5, %10.5 ve %12.5'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu bağlamda, tel erozyonla kesmede daha iyi bir yüzeysel kalitesine ulaşılabilmesi için çoklu kesimin uygulanması gerektiği anlaşılmıştır.
- Tel erozyonla işlemede çoklu kesim uygulamasında, dielektrik sıvı basıncı ve son kesim derinliği değiştirilerek yüzeysel kalitesi değişimleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A.S.S. Balan, A. Giridharan, A progress review in wire electrical discharge machining process, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 14(2): 4097-4124, 2017.
2. K.T. Chiang, F.P. Chang, Optimization of the WEDM process of particle-reinforced material with multiple performance characteristics using grey relational analysis, Journal of Materials Processing Technology, 180: 96–101, 2006.
3. K. Ukey, A.R. Sahu, S.S. Gajghate, A.K. Behera, C. Limbadri, H. Majumder, Wire electrical discharge machining (WEDM) review on current optimization research trends, Materials Today: Proceedings, 2023
4. R. Vijayakumar, N. Srirangarajulu, M. Santhanakumar, R. Adalarasan, Investigation in μ -WEDM of Inconel 625 superalloy using RSM-CCD technique, Materials and Manufacturing Processes, 38(4): 449–460, 2023.
5. A. Johny, C. Thiagarajan, Investigation of surface integrity and its optimization on pure titanium using molybdenum wire by reciprocated travelling WEDM A review, Materials Today: Proceedings 33: 2581–2584, 2020.
6. T. Jadam, S. Datta, M. Masanta, Study of surface integrity and machining performance during main/rough cut and trim/finish cut mode of WEDM on Ti–6Al–4V: effects of wire material, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41: 151, 2019.
7. M. Rehan, S.A. Khan, R. Naveed, M. Usman, S. Anwar, A.Y. AlFaify, C.I. Pruncu, L. Lamberti, Experimental investigation of the influence of wire offset and composition on complex profile WEDM of Ti6Al4V using trim-pass strategy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127: 1209–1224, 2023.
8. M. Usman, K. Ishfaq, M. Rehan, A. Raza, J. Mumtaz, An in-depth evaluation of surface characteristics and key machining responses in WEDM of aerospace alloy under varying electric discharge environments, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124: 2437–2449, 2023.
9. A. Goswami, J. Kumar, Trim cut machining and surface integrity analysis of Nimonic 80A alloy using wire cut EDM, Engineering Science and Technology, an International Journal, 20: 175–186, 2017.
10. K.K. Jangra, V. Kumar, V. Kumar, An experimental and comparative study on rough and trim cutting operation in WEDM of hard to machine materials, Procedia Materials Science, 5: 1603 –1612, 2014.
11. P. Sharma, D. Chakradhar, S. Narendranath, Precision manufacturing of turbine wheel slots by trim-offset approach of WEDM, Precision Engineering, 71: 293–303, 2021.
12. V.K. Rohilla, R. Goyal, A. Kumar, Y.K. Singla, N. Sharma, Surface integrity analysis of surfaces of nickel-based alloys machined with distilled water and aluminium powder-mixed dielectric fluid after WEDM, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116: 2467–2472, 2021.
13. T. Bergsa, M. Olivier, A. Gommeringer, F. Kern, A. Klink, Surface integrity analysis of ceramics machined by wire EDM using different trim cut technologies, Procedia CIRP, 87: 251–256, 2020.

14. V. Singh, K. Kumar, P. Katyal, Experimental investigation on surface integrity and wear behavior of Ti-6Al-7Nb alloy under rough and trim cut modes of wire electrical discharge machining, *JMEPEG*, 30: 66–76, 2021.
15. L. Li, Y.B. Guo, X.T. Wei, W. Li, Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy, *Procedia CIRP*, 6: 220-225, 2013.
16. S. P. Arikatla, K. T. Mannan, A. Krishnaiah, Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts, *Materials Today: Proceedings*, 4: 1500–1509, 2017.
17. J.F. Liu, L. Li, Y.B. Guo, Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cutmode in W-EDM of shape memory alloy, *Applied Surface Science*, 308: 253–260, 2014.
18. L. Li, X.T. Wei, Z.Y. Li, Surface integrity evolution and machining efficiency analysis of W-EDM of nickel-based alloy, *Applied Surface Science*, 313: 138–143, 2014.
19. C. Cao, X. Zhang, X. Zha, C. Dong, Surface integrity of tool steels multi-cut by wire electrical discharge machining, *Procedia Engineering*, 81: 1945–1951, 2014.
20. G. Selvakumar, K. Bravilin Jiju, S. Sarkar, S. Mitra, *Int J Adv Manuf Technol*, 83: 791–803, 2016.
21. V. Kumar, V. Kumar, K.K. Jangra, An experimental investigation and statistical modelling for trim cutting operation in WEDM of Nimonic-90, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6: 351–364, 2015.
22. V. Kumara, K.K. Jangra, V. Kumar, An experimental study on trim cutting operation using metal powder mixed dielectric in WEDM of Nimonic-90, *International Journal of Industrial Engineering Computations* 7: 135–146, 2016.
23. İ. Demir, T. Kıvak, Ş. Şirin, AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı surfaktan katkılı CuO nanoakışkanların performans değerlendirmesi, *Manufacturing Technologies and Applications*, 3(2): 9-21, 2022.
24. M. Altın Karataş, Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4): 516-532, 2022.