



IJEASED

INTERNATIONAL JOURNAL OF EASTERN ANATOLIA  
SCIENCE ENGINEERING AND DESIGN

*Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*  
ISSN: 2667-8764 , 3(1), 333-349, 2021  
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased>



Araştırma Makalesi / Research Article



Doi: [10.47898/ijeased.842732](https://doi.org/10.47898/ijeased.842732)

## Polioksümetilen Kopolimerinin Su Jeti Tezgâhlarında İşlenebilirliğinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu

Alırıza ALTINSOY <sup>1\*</sup>, Yusuf ARSLAN <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Düzce, 81000, Türkiye.

<sup>2</sup> Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, 81000, Türkiye.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
*Sorumlu Yazar / Corresponding author : <a href="mailto:alirizaaltinsoy@duzce.edu.tr">alirizaaltinsoy@duzce.edu.tr</a>  <a href="https://orcid.org/0000-0002-8429-9606">https://orcid.org/0000-0002-8429-9606</a> , A. Altinsoy  <a href="https://orcid.org/0000-0003-1731-5423">https://orcid.org/0000-0003-1731-5423</a> , Y. Arslan	Geliş Tarihi / Received Date : 18.12.2020 Revizyon Tarihi / Revision Date : 07.04.2021 Kabul Tarihi / Accepted Date : 19.04.2021 Yayın Tarihi / Published Date : 15.07.2021
<b>Alıntı / Cite:</b> Altinsoy, A., Arslan, Y. (2021). Polioksümetilen Kopolimerinin Su Jeti Tezgâhlarında İşlenebilirliğinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 3(1), 333-349.	

### Özet

Mühendislik polimeri olan polioksümetilen kopolimer (POM-C) yüksek çekme mukavemeti, aşınma direnci ve boyut kararlılığı gibi mekanik özelliklerinden dolayı günümüzde havacılık, otomotiv ve gemi sanayinde faaliyet gösteren birçok sanayi alanında kullanılmaktadır. Bu polimerler kullanım alanlarına göre şekillendirilmesi gerekmektedir. Şekillendirme yöntemlerinden bir tanesi de su jeti tezgâhlarıdır. Kesme sonrası, talaş oluşum sorununu ortadan kaldırması nedeniyle su jeti ile kesme genelde çok sert ve kırılğan olmayan malzemeler için uygundur. Polimerler, bu malzeme grubuna girmemekle birlikte, kesme işlemi esnasında yüksek ısıların oluşmaması bundan dolayı polimerlerin yapısal olarak bozulmaması, daha küçük ve karmaşık şekillerin rahatlıkla işlenmesi, su jeti ile üretimin, diğer üretim metodlarına göre daha hızlı olması, aynı zamanda mühendislik polimerlerinin pahalı olması, uygulanan metotta daha az malzemenin israf olması polimerlerin su jeti tezgâhlarında işlenmesinin başlıca sebeplerindedir. Bu çalışmada polioksümetilen kopolimerine 210, 260, 310 MPa basınçta üç farklı ilerleme hızı ( 170, 240, 380 mm/dk), üç farklı aşındırıcı garnet miktarı (150, 250, 350 g/dk) su jeti tezgâhında kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarındaki veriler sinyal - gürültü oranı (S/N), ANOVA analizi, ve regresyon yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonuçlarında su jeti tezgâhında 260 MPa basınçta 350 g/dk garnet miktarı 170 mm/dk ilerleme hızında yüzey pürüzlülüğünün diğer parametrelere göre daha düşük çıktığı, ilerleme hızının su jeti tezgâhlarında en etkin parametre olduğu bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Su jeti, Polioksümetilen, Yüzey pürüzlülüğü, Eğim Açısı.

## ***Optimization of Polyoxymethylene Copolymer Workability on Water-Jet Machines Using Taguchi Method***

### ***Abstract***

*Polyoxymethylene copolymer (pom-c), which is an engineering polymer, is used in many industries operating in aviation, automotive and ship industries today due to its mechanical properties such as high tensile strength, fly resistance and thermal resistance. These polymers need to be shaped according to their usage areas. Waterjet cutting is generally suitable for very hard and non-brittle materials, as it eliminates the problem of chip formation after cutting. Although polymers do not belong to this group of materials, high temperatures do not occur during the cutting process, therefore the polymers do not deteriorate structurally, smaller and complex shapes can be easily processed, production with water jet is faster than other production methods, at the same time, engineering polymers are expensive, Less material wasted in the method is one of the main reasons polymers are processed on waterjet looms. In this study, three different feed rates (170, 240, 380 mm / min) and three different sand quantities (150, 250, 350 g / min) were cut on a water jet machine at 210, 260, 310 MPa pressure to the polyoxymethylene copolymer. The data in the experimental results were analyzed by applying the signal-to-noise ratio (S / N), ANOVA analysis, and regression method. According to the results of the study, it was found that the sand amount of 350 g / min at 260 MPa pressure and 170 mm / min feed rate was lower than the other parameters and the feed speed was the most effective parameter in water jet looms.*

**Keywords:** *Water jet, Polyoxymethylene, Surface roughness, Tilt Angle.*

### **1. Giriş**

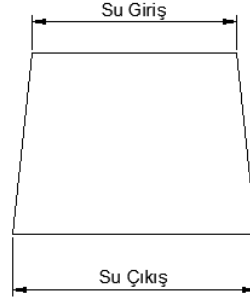
Türkiye’de ve dünyada polimer sektörü hızlı bir gelişme göstermiştir. Polimerlere olan talebin artmasıyla birlikte kimya mühendisleri, tıp sektörü, tekstil mühendisleri, makine mühendisleri gibi meslek branşları da polimerler üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Polimerlere artan taleple beraber kullanım alanlarına göre şekillendirilme ihtiyacı artmıştır (Chanda ve ark., 2007)

Talaşlı imalat aracılığıyla şekillendirilen numunelerin yüzey kalitesinin artırılmasında ilerleme hızı, iş parçası veya kesici dönüş hızı gibi birçok parametre kullanılmaktadır. Yüzey kalitesi, birbirine temas ederek çalışan dişli, mil, yatak gibi sistemlerde numunelerin kolay aşınmaması için önemli bir faktördür. Malzemelerin işlenebilir olması için belirlenen parametrelerin değişmesi, yüzey kalitesini de etkiler (Akkurt 2009).

Su jeti tezgahlarında, basınçlı su, aşındırıcı ile beraber iş parçasının hedeflenen yüzeyine çarparak talaş kaldırma işlemi gerçekleşir. Su jeti kesim teknolojisi, termal bozulma olmaması, yüksek esneklik, yüksek işleme çok yönlülüğü, fiziksel temas olmadan kolay entegrasyon, düşük işleme kuvveti ve minimum çapak gibi bir dizi farklı avantaja sahiptir. Sonuç olarak, düz su jeti veya aşındırıcı su jeti işleme teknolojisi önemli bir üretim konusu haline gelmiştir ( Liu ve ark., 2019). İşlenmesi zor olan malzemelerin şekillendirilmesini kolaylaştıran su jeti tezgâhları, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Proses maliyeti su ve aşındırıcı olduğundan düşüktür (Kulekçi, 2002)

Su jeti tezgâhları ile kesme işleminde, ısı oluşmadığından kesilen polimer numunelerde deformasyon görülmemekte, ayrıca insan sağlığı ve çevreye doğrudan zarar vermemektedir (Dong ve ark., 2014). Ancak, kesme işleminin çok yüksek basınçlarda yapılması nedeniyle insan sağlığını etkileyecek riskli bir durumun oluşmaması için emniyet tedbirlerine çok daha fazla önem verilmelidir.

Su jeti tezgâhlarında en önemli parametre yüzey kalitesi ve eğim açısıdır. Yapılan çalışmada araştırmacılar bu etkenleri azaltmak için çalışmışlardır (Liu ve ark., 2012; Mardı ve ark., 2017; Ishfaq ve ark., 2019) Şekil 1’de görüldüğü gibi kesme işlemi esnasında iş parçasına suyun en son temas ettiği çıkış bölgesi (sç), ilk temas ettiği giriş bölgesinden daha geniştir (sg) (Shanmugam ve ark., 2009).



**Şekil 1.** Kesme sonrası oluşan eğim (Shanmugam ve ark., 2009).

Birçok araştırmacı paslanmaz çelik, kompozit malzemeler, granit, alüminyum gibi malzemelerde su jeti ile kesimini yaparak yüzey pürüzlülüğü ve eğim açısını değerlendirmiştir. (Schwartzentruber ve ark., 2017; Shanmugam ve ark., 2020; Akkurt ve ark., 2004; Karakurt ve ark., 2010).

Genellikle düşük mukavemete sahip olan ve ısıyla sertleşen polimerler, her zaman amorfurlar. Dolayısıyla, yüksek gerilme direnci oluşturdukları için kırılırlar. Termoplastik polimerler ise amorf veya kristal halde olabildikleri için nispeten daha sünek bir davranış sergilerler. Bu nedenle, su jeti tezgâhlarında, polimerlerin işlenebilir özelliklerinin çok kısıtlı olduğu, yapılan çalışmalarda gösterilmiştir

Bu çalışmada polioksimetilen kopolimer (pom-c) malzemesini farklı basınç, farklı garnet miktarı ve ilerleme hızında kesimi yapılarak giriş yüzey ve çıkış yüzey pürüzlülüğü, parça üzerindeki su giriş ve su çıkış ölçüleri değerlendirilerek eğim açıları optimum parametreler belirlenmiştir.

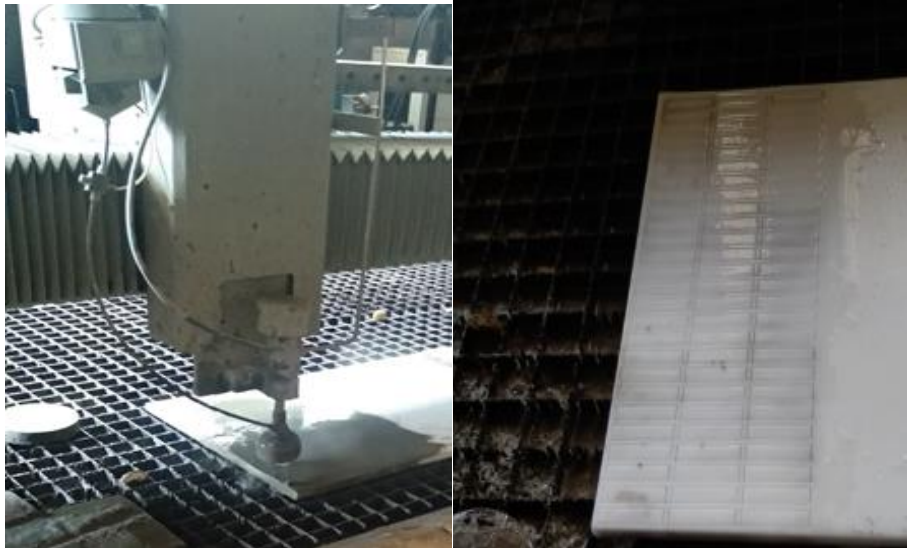
## 2. Materyal ve Metot

Polioksimetilen kopolimeri yüksek aşınma ve darbe direnci, mükemmel boyut kararlılığı, yüksek termal dayanımı gibi özelliklerinden dolayı dişli, mafsal, kam gibi dinamik kuvvetlere maruz kalan malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Jose ve Alagar, 2011). Polioksimetilenin teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Polioksimetilen kopolimerin teknik özellikleri (Taşdemir, 2012)

<b>Yoğunluk</b>	1,43 g/cm <sup>3</sup>
<b>Çekme Dayanımı</b>	79 MPa
<b>Darbe Dayanımı</b>	15 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Kopma Uzaması</b>	% 37
<b>Eğilme Mukavemeti</b>	106 MPa
<b>Erime Sıcaklığı</b>	182 °C
<b>Cam Geçiş Sıcaklığı</b>	-60 °C
<b>Bilya Baskı Basıncı</b>	165 MPa

Deneilerin yapıldığı N-WJL marka su jeti tezgâhına ait teknik özellikler, Tablo 2’ de verilmiştir. Şekil 2’ de gösterildiği gibi 15,6 mm kalınlığında olan numuneler, 60 mm uzunluğunda, 12,7 mm genişliğinde 90° lik açıyla 80 mesh garnet aşındırıcı ile 27 adet numune işlenmiştir.



**Şekil 2.** Su jetinde işlenen numuneler

**Tablo 2.** Su jeti tezgahı teknik özellikleri

<b>Pompa basıncı</b>	≤ 4000 bar	<b>Nozulun parçaya uzaklığı</b>	4 mm
<b>Kesme sürecindeki sıcaklık aralığı</b>	45-50 °C	<b>Nozul duruş açısı</b>	90°
<b>Aşındırıcı tipi</b>	80 mesh garnet	<b>Nozul boyu</b>	76,2 mm
<b>Nozul çıkış çapı</b>	0,76 mm	<b>Tezgah kapasitesi</b>	2 m x 4 m

## 2.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülük değerleri PCE-RT 1200 yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür. Numuneler işlenen yüzeyde 3 farklı noktadan ölçüm alınarak, yüzey pürüzlülüklerinin ortalamaları değerlendirilmiştir. Daha sonra taguchi metodu aracılığıyla en uygun verilere ulaşılmıştır. Sonuçlar optimum yüzey kalitesi S/N oranı ANOVA ve regresyon analizi sonucunda matematiksel model oluşturulmuştur. Yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılan numunelerde, hassasiyeti 1/1000 mm olan dijital mikrometre yardımıyla istenilen ölçüye göre referans alınarak, eğim açılarının bulunması için numunelerin su giriş ve su çıkış bölgeleri ölçülerek, parametreler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Sabit basınç ve sabit garnet miktarı farklı ilerleme hızlarında su jeti ile işlenmiş yüzeylerin SEM yardımıyla 70x büyüklükte görüntüleri alınarak aşınma türleri karşılaştırılmıştır.

## 3. Taguchi Metodu

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, endüstriyel alanda farklı yenilikler getirdi. Yenilikler kullanılırken en uygun değişkenler tayin etmek gerekir. Talaşlı imalatta zaman ve maddi kayıpları önlemek için yeni optimizasyon yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi taguchi yöntemidir. Bu yöntem aracılığıyla parametreler azaltılarak işlem değişkenlerini optimize etmek için kullanılır. Böylece yapılan analiz sonucunda deney değişkenleri büyük ölçüde azalır. Taguchi metodunda sonuçları değerlendirmek için bazı yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden bir tanesi sinyal gürültü oranı (S/N) aracılığıyla deney çıktılarını gösteren istenmeyen herhangi bir gürültü değeri için istenilen sinyal oranına dönüştürülür. Sinyal gürültü oranı (S/N) analizinde en küçük en iyi kalite özelliği kullanılır (Savaşkan ve ark., 2004; Gur ve ark., 2019).

$$\text{En küçük en iyi : } \eta = \frac{S}{N_s} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Burada n deneysel numunelerin sayısını,  $y_i$  ise ölçülen deneysel verilerin ortalamasıdır (Gur ve ark., 2014).

Taguchi metodunda uygulanan ortogonal dizi tasarımını irdelemek için en uygun değişken ve etkileşim sayısının, çalışmanın amacı aynı zamanda deney bütçesi ve zamanının belirlenmesi büyük önem taşır (Roy 2010). Bu metotta kullanılan kesme parametreleri, Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Su jeti tezgâhı kesme parametreleri

<b>Parametreler</b>	<b>1</b>			<b>2</b>			<b>3</b>		
<b>Basınç ( MPa)</b>	210			260			310		
<b>Garnet Miktarı (g/dk)</b>	150	250	350	150	250	350	150	250	350
<b>İlerleme Hızı ( mm/dk)</b>	170	240	380	170	240	380	170	240	380

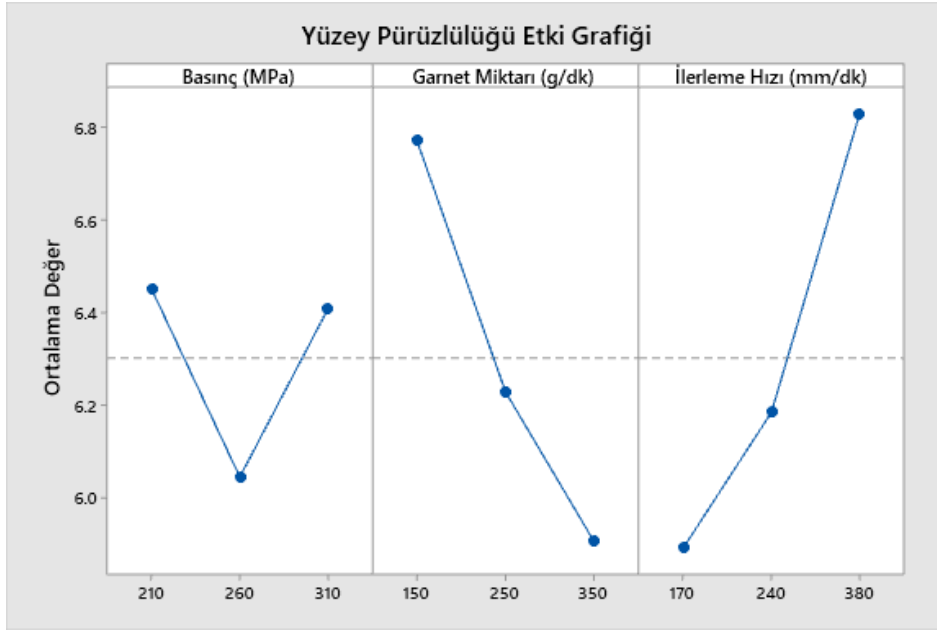
Taguchi metodunu uygulamadan önce birinci adım, denetleme etkenleri olarak seçilen, kesme parametrelerine uygun ortogonal dizinin belirlenmesidir. Bu çalışmada en uygun parametreyi belirlemek için  $L_{27}(3^3)$  dizisi belirlenmiştir.

#### **4. Bulgular ve Tartışma**

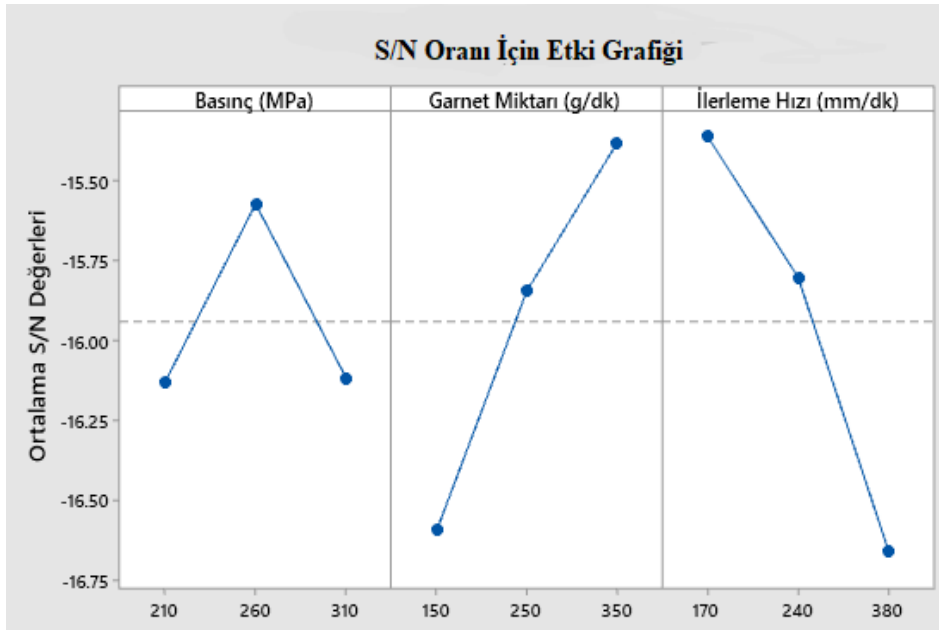
Su jeti ile kesme işlemi esnasında su giriş ve çıkış çalışma parametresi faktörlerinin her kombinasyonu için deneysel tasarım yoluyla Taguchi metodu uygulanarak değerlendirilmiştir. Parametrelerin optimizasyonu sinyal-gürültü (S/N) oranları ile sağlanmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarda istenen yüzey kalitesinin minimum değerler istendiğinden sinyal - gürültü (S/N) oranının “en küçük en iyi” koşuluna göre sonuçlar oluşturulmuştur. Tablo 4’de yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranlarını göstermektedir.

**Tablo 4.** Deney sonuçların neticesinde bulunan yüzey pürüzlülüğü değerleri ve S/N oranları

Sıra no	1.Parametre	2.Parametre	3.Parametre	Yüzey Pürüzlülük Değerleri ( $\mu\text{m}$ )		Sinyal ve Gürültü Oranları ( S/N)	
	Basınç (MPa)	Garnet Miktarı (g/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ra (Su Giriş) Ortalama	Ra(Su Çıkış) Ortalama	S/N Oranı(Su Giriş)	S/N Oranı(Su Çıkış)
1	210	150	170	6.681	6.920	-16.4968	-16.8021
2		150	240	6.524	9.680	-16.2903	-19.7175
3		150	380	8.054	10.252	-18.1202	-20.2162
4		250	170	6.081	6.670	-15.6795	-16.4825
5		250	240	6.201	6.634	-15.8492	-16.4355
6		250	380	7.267	9.680	-17.2271	-21.3489
7		350	170	5.467	5.917	-14.7550	-15.4420
8		350	240	5.467	6.561	-14.7550	-16.3394
9		350	380	6.321	8.907	-16.0157	-18.9946
10		260	150	170	6.441	7.827	-16.1791
11	150		240	7.001	8.507	-16.9032	-18.5955
12	150		380	6.587	8.819	-16.3738	-23.9786
13	250		170	5.028	5.896	-14.0279	-15.4111
14	250		240	6.107	6.887	-15.7166	-16.7606
15	250		380	6.614	8.720	-16.4093	-18.8103
16	350		170	5.013	5.840	-14.0020	-15.3283
17	350		240	5.600	6.547	-14.9638	-16.3208
18	350		380	6.014	7.481	-15.5833	-17.4792
19	310		150	170	6.441	7.347	-16.1791
20		150	240	6.547	7.281	-16.3208	-17.2438
21		150	380	6.680	9.480	-16.4955	-20.4072
22		250	170	5.960	6.934	-15.5049	-16.8197
23		250	240	5.920	7.294	-15.4464	-17.2593
24		250	380	6.880	7.801	-16.7518	-17.8430
25		350	170	5.907	6.554	-15.4273	-16.3301
26		350	240	6.294	6.667	-15.9785	-16.4786
27		350	380	7.054	7.627	-16.9687	-17.6471



Şekil 3. Taguchi metodu sonrası yüzey pürüzlülüğü etki grafiği

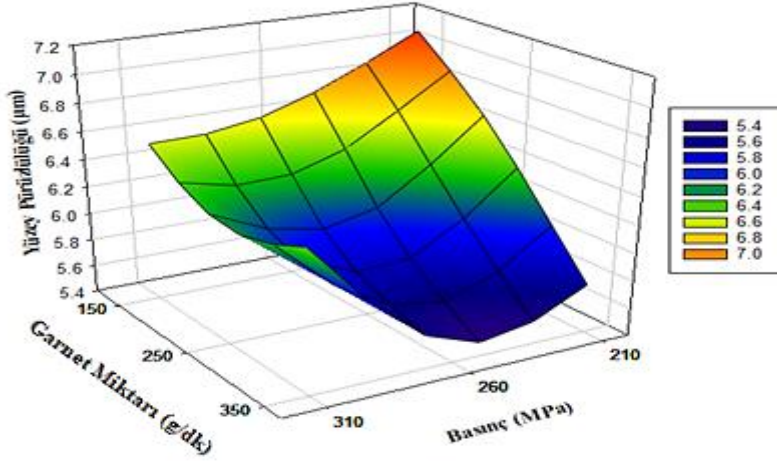


Şekil 4. Taguchi metodu sonrası S/N oranı etki grafiği

Şekil 3 ve Şekil 4 'de işlenen yüzey üzerinde, Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımı ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü etki grafiği ve S/N oranı etki grafiği sırasıyla verilmiştir. Polioksümetilen kopolimeri kontrol faktörleri arasında en etkili olan parametre, her iki şekil içinde belirlenmiştir. Şekiller incelendiğinde 260 MPa basınç, 350 gr/dk garnet miktarı ve 170 mm/dk ilerleme hızında, en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.

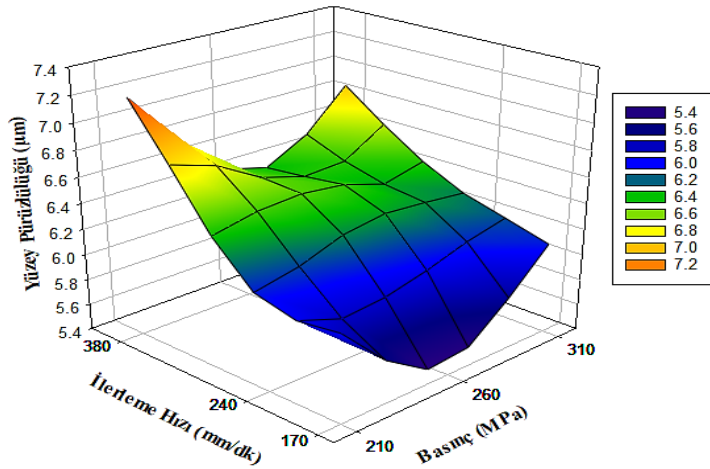


Tablo 4'teki verilerin etki grafikleri, Şekil 5 ve Şekil 6'da göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerini en minimum değere azaltmak için kontrol faktörlerinin optimum işleme parametreleri oluşan bu grafikler aracılığıyla kolaylıkla belirlenir.



Şekil 5. Basınç ve aşındırıcı garnet miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Deney parametrelerine ayrılmış, çalışma sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 5'de basınç ve garnet miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Uygulanan parametrelerde minimum basınç ve minimum garnet miktarında yüzey pürüzlülüğünde maksimum artış olduğu görülmektedir. Aynı zamanda maksimum garnet miktarı ve maksimum basınç miktarında da yüzey pürüzlülüğün arttığı anlaşılmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü 260 MPa basınç, 350 g/dk garnet miktarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Basınç ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6 incelendiğinde 210 MPa ve 310 MPa basınçta her iki parametre için ilerlemenin artırılması yüzey pürüzlülüğünde maksimum artışa neden olmuştur. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğünde en önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır. İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ilerleme hızı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 260 MPa basınç ve 170 mm/dk ilerleme hızında olduğu saptanmıştır.

#### 4.1. Anova Yardımıyla Veri Analizi

ANOVA, deney tasarımında kullanılan parametrelerin etkileşimini öğrenmek için kullanılan yöntemdir (Tabachnick ve Fidell 2007 ; Akıncıoğlu ve ark., 2020). Sabit basınçta, garnet miktarı ve ilerleme hızının yüzey kalitesine etkisi ANOVA yardımıyla % 95 güven düzeyinde incelenmiştir. Deneysel verilere göre yüzey pürüzlülüğü ve S/N oranları sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6’da verilmiştir.

**Tablo 5.** Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi (Df)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Parametre Etkisi (%)
Basınç	2	0.8989	0.4495	2.77	0.08704	% 7.64
Garnet Miktarı	2	3.4689	1.7344	10.67	0.00070	% 29.46
İlerleme Hızı	2	4.1545	2.0773	12.78	0.00027	% 35.29
Hata	20	3.2508	0.1625			% 27.61
<b>Toplam</b>	<b>26</b>					<b>% 100.00</b>

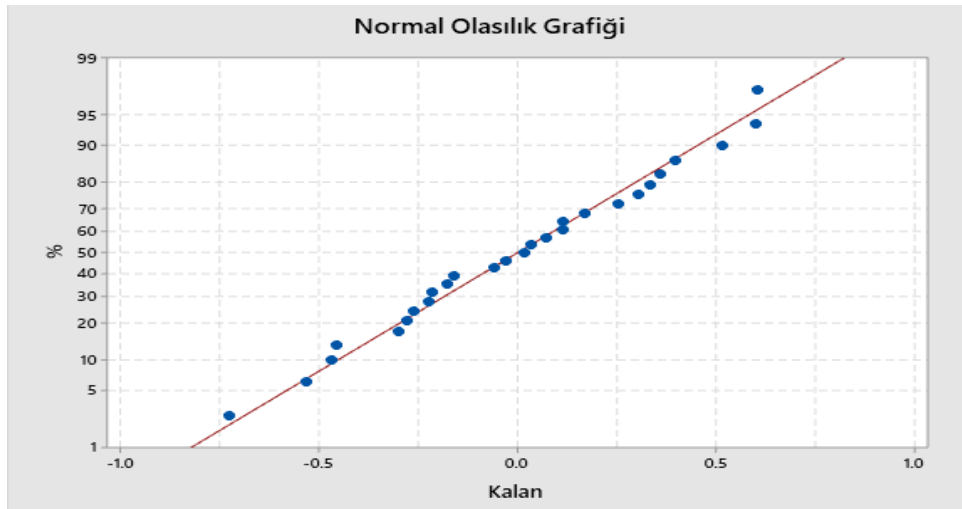
**Tablo 6.** S/N oranları için anova analizi

Parametre	Serbestlik Derecesi (Df)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Parametre Etkisi (%)
Basınç	2	0.00802	0.00802	0.04	0.083614	% 0.07
Garnet Miktarı	2	3.39649	3.39649	18.53	0.000264	% 28.85
İlerleme Hızı	2	4.15234	4.15234	22.65	0.000085	% 35.27
Hata	20	4.21631	0.18332			% 35.81
<b>Toplam</b>	<b>26</b>					<b>% 100.00</b>

Tablo 5’te yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizinde basınç etkisi % 0.07 garnet miktarı % 29.46 ilerleme hızının % 35.29, hata oranının % 27,61 olduğu görülmektedir. Su jeti tezgâhları için, ilerleme hızının etkin faktör olduğu anlaşılmıştır. Tablo 6’da S/N oranları için yapılan ANOVA analizinde basınç etkisi % 0.07, garnet miktarı % 28.85, ilerleme hızı % 35.57 olarak bulunmuştur.

Her iki tablo karşılaştırıldığında en önemli parametre ilerleme hızı olurken, basınç etkisinin en etkisiz parametre olduğu anlaşılmıştır. Polimer esaslı kompozit malzemelerin su jeti ile işlenmesinde düşük ilerleme hızı ile malzemeye daha az zarar verilerek düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonuçları literatürü desteklemektedir (Mayuet ve ark., 2015). Ayrıca Alberdi ve ark., (2015) yapmış olduğu çalışmada düşük basıncın ve yüksek ilerleme hızının malzemeye daha fazla zarar verdiği ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğunu tespit etmiştir. Su jeti tezgahlarında ilerleme hızının, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 7 incelendiğinde normal olasılık grafiği, regresyon modeli denkleminde kıyasla tek tek değerlerin sapmasını gösterir (Nas ve Özbek, 2020). Çizgi etrafındaki kümelenmiş noktalar düşük sapma gösterir. Yüzey için kalan (kalıntı) grafikleri pürüzlülüğü göstermektedir. Şekil 7’de normal olasılık grafiğinin, hata noktalarının normal olarak dağıldığını, neredeyse doğrusal bir tepki gösterdiği görülmüştür.



**Şekil 7.** Yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey aşınmasının S / N oranları için artık grafikler

## 4.2. Deneysel Sonuçlar İçin Regresyon Yöntemi

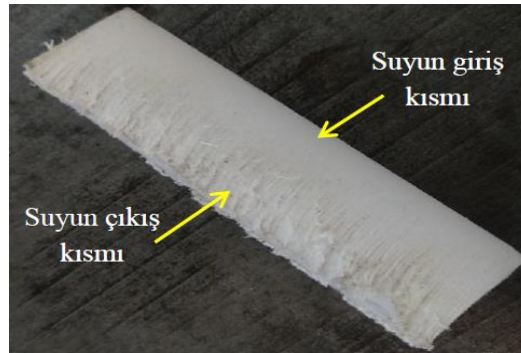
Bağımlı değişkenin, bir veya daha fazla bağımsız değişken ile modellenerek formülasyon oluşturmak için Regresyon yöntemi kullanılmıştır (Nas ve Öztürk, 2018; Kıvak, 2014 ). Bu çalışmada, sabit basınçta, yüzey kalitesi ile garnet miktarı ve ilerleme hızı arasındaki ilişki regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemle, sonraki çalışmalar için en uygun yüzey kalitesinin belirlenmesi sağlanmıştır. Basınç artışıyla yüzey pürüzlülüğü arasında ters bir korelasyonun olduğu, regresyon yöntemiyle belirlenen ve aşağıda verilen formülden anlaşılmaktadır.

Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ ) =  $6,315 - 0,00042 (\text{Basınç}) - 0,00434 (\text{Garnet Miktarı}) + 0,004492 (\text{İlerleme Hızı})$

#### 4.3. Parametrelere Göre En Uygun Eğim Açısının Bulunması

Su jeti tezgâhında yapılan kesme işlemi sırasında, özellikle iş parçasının çıkış noktasında, aşındırıcıların etkisini kaybetmesi mümkündür. Literatürde, iş parçasının kalınlığı ile birlikte sürtünme kuvvetlerinin de arttığı dolayısıyla yüzey kalitesinin azaldığı, eğim açısının ise arttığı görülmüştür. Ayrıca, kalınlık artırılarak ilerleme hızı düşürüldüğünde basınç artışıyla birlikte yüzey kalitesini iyileştirmek mümkündür. (Vikram ve Babu, 2002).

Şekil 8’de görüldüğü gibi ilerleme hızı artırılarak işlenmiş numunede suyun giriş kısmındaki yüzeyin daha kaliteli olduğu ancak ilerleme hızının artmasından dolayı aşındırıcının etkisini kaybetmesinden çıkış yüzeyinin bozulduğu görülmektedir.



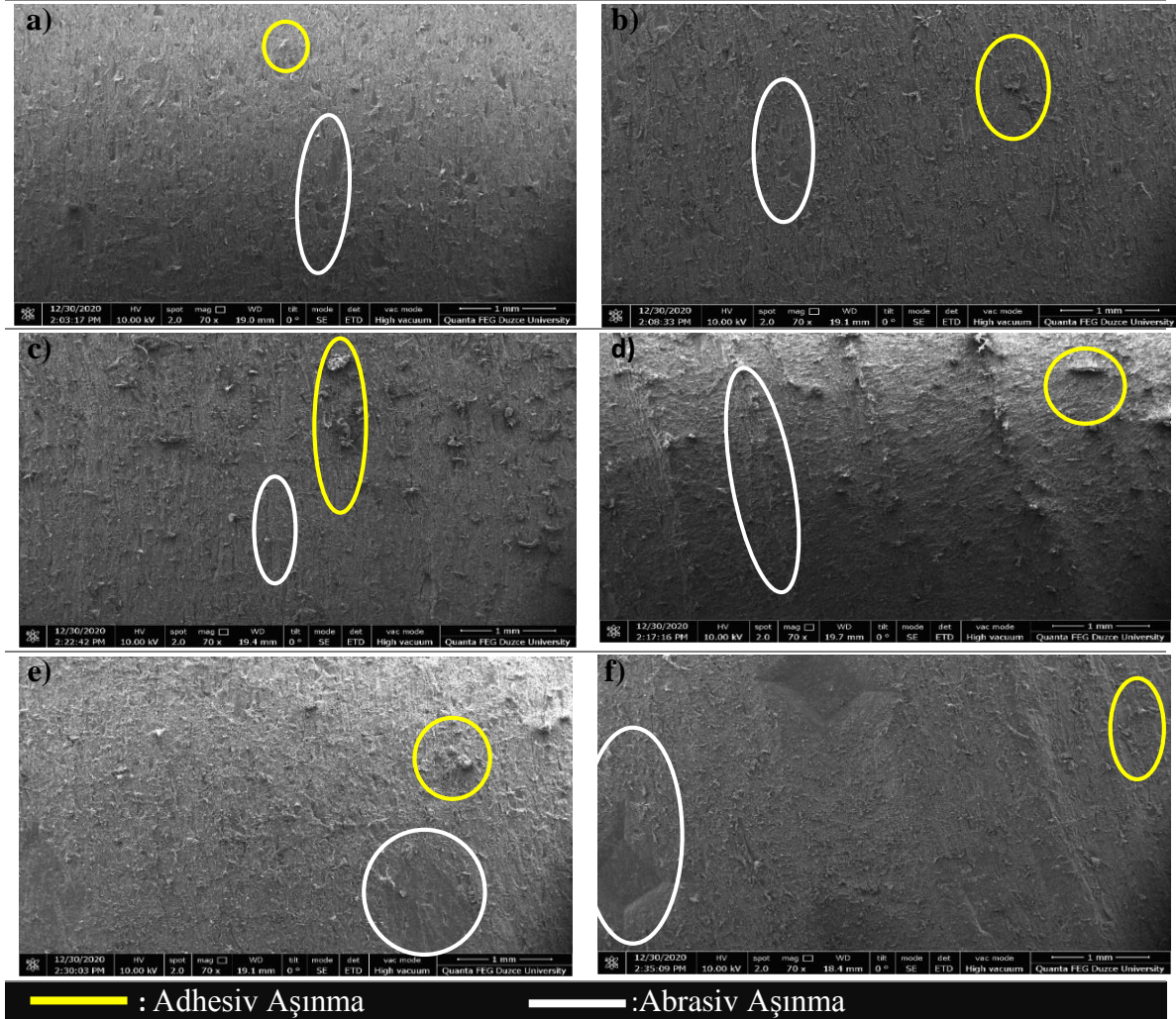
Şekil 8. Kesim esnasında oluşan yüzey

**Tablo 7.** İşlenen numunelerin eğim açısının belirlenmesi

Basınç (MPa)	Garnet Miktarı (g/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Su Giriş Ölçüsü (µm)	Su Çıkış Ölçüsü(µm)	Eğim Açısı (°)
210	150	170	12,737	13,092	0,6519
	150	240	12,863	13,159	0,5436
	150	380	12,956	13,235	0,5123
	250	170	12,690	12,990	0,5509
	250	240	12,676	13,023	0,6372
	250	380	12,742	13,094	0,6464
	350	170	12,566	12,842	0,5068
	350	240	12,590	12,879	0,5307
	350	380	12,605	12,986	0,6996
	260	150	170	12,875	13,038
150		240	12,894	13,054	0,2938
150		380	12,986	13,144	0,2901
250		170	12,851	12,974	0,2259
250		240	12,781	12,866	0,2295
250		380	12,932	13,119	0,3434
350		170	12,767	12,855	0,1671
350		240	12,836	12,967	0,2406
350		380	12,931	13,094	0,2993
310		150	170	12,874	12,996
	150	240	12,928	13,061	0,2442
	150	380	13,014	13,208	0,3563
	250	170	12,842	12,980	0,2534
	250	240	12,880	13,111	0,4242
	250	380	12,949	13,189	0,4407
	350	170	12,793	12,935	0,2608
	350	240	12,824	13,010	0,3416
	350	380	12,892	13,138	0,4517

Tablo 7 incelendiğinde, 210 MPa basınçta eğim açılarının diğer basınçlara göre arttığı, ancak 260 MPa basınç altında işlenen numunelerin, 310 MPa ve 210 MPa basınç altında işlenen numunelere göre eğim açılarının azaldığı gözlemlenmiştir. Uygulanan basınç parametrelerinde 260 MPa basınç optimum parametre olarak bulunmuştur. İrana Wong ve ark., (2018) azalan eğim açısının ilerleme hızının azalmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Tabloda eğim açıları genel olarak ilerleme hızı azaldıkça eğim açısında azalma olduğu görülmüştür. Ancak Tablo 7’de uygulanan basınçlar altında, düşük basınç ve düşük garnet miktarında, ilerleme hızı arttıkça eğim açıları azalma olduğu görülmektedir. Suyun giriş kısmında kesme işlemi daha kolayken, suyun çıkış kısmında düşük basınç ve düşük garnet miktarından dolayı kesme özelliğinin azalmasından dolayı eğim açısının arttığı, bundan dolayı eğim açıları azalma isteniyorsa ilerleme hızının azaltılmasının yanı sıra uygulanan basıncın ve garnet miktarının artırılması gerektiği kanısına varılmıştır. En küçük eğim açısı 260 MPa

basınç, 350 gr/dk garnet miktarı ve 170 mm/dk ilerleme hızında belirlenirken, en büyük eğim açısı 210 MPa basınç, 350 gr/ dk garnet miktarı ve 380 mm/dk ilerleme hızında bulunmuştur.



**Şekil 9.** Su jeti ile 260 MPa basınç, 250 g/dk garnet miktarı ve 170 mm/dk ilerleme hızında, su ve garnetin numuneye giriş yüzeyinin SEM görüntüsü (a) , suyun ve garnetin numuneden çıkış yüzeyinin SEM görüntüsü (b) . 260 basınç, 250 g/dk garnet miktarı ve 240 mm/dk ilerleme hızında su ve garnetin numuneye giriş yüzeyinin SEM görüntüsü (c), suyun ve garnetin numuneden çıkış yüzeyinin SEM görüntüsü (d). 260 basınç, 250 g/dk garnet miktarı ve 380 mm/dk ilerleme hızında, su ve garnetin numuneye giriş yüzeyinin SEM görüntüsü (e). suyun ve garnetin numuneden çıkış yüzeyinin SEM görüntüsü (f).

Şekil 9’da sabit basınç ve sabit garnet miktarının farklı ilerleme hızlarında aşınmaya etkisi incelenmiştir. Aşınma türlerinin yoğun olduğu bölgeler daireler aracılığıyla belirlenmiştir. 170 mm/dk ilerleme hızında işlenen numunede su ve garnet giriş yüzeyinde abrasiv aşınmaların görüldüğü, adhesiv aşınmaların daha az olduğu görülmektedir (a). Su ve garnet çıkış yüzeyinde

abrasiv aşınmaların yanı sıra adhesiv aşınmaların oluştuğu görülmektedir (b). 240 mm/dk ilerleme hızında su ve garnet giriş yüzeyinde adhesiv aşınmaların çoğunlukta olduğu (c), su ve garnet çıkış yüzeyinde abrasiv aşınmaların çoğunlukta olduğu görülmüştür (d). 380 mm/dk ilerleme hızında işlenen numunenin su ve garnet giriş yüzeyinde abrasiv aşınmaların geniş bir alana yayıldığı (e), su ve garnet çıkış yüzeyinde abresiv aşınmaların çok derin ve geniş alanda olduğu tespit edilmiştir (f).

## **5. Sonuçlar ve Öneriler**

Yapılan çalışmalardaki parametrelerin yüzey pürüzlülüğünde en uygun kombinasyonu 260 MPa basınç, 350 g/dk garnet miktarı ve 170 mm/dk ilerleme hızında bulunmuştur. En küçük eğim açısı, 260 MPa basınç, 350 gr/dk garnet miktarı, 170 mm/dk ilerleme hızında elde edilmiştir. En büyük eğim açısında, basınç 210 MPa, garnet miktarı 350 gr/dk ve ilerleme hızı ise 380 mm/dk olarak ölçülmüştür. Anova analizi sonuçlarında, ilerleme hızının % 35.29 garnet miktarının % 29.46, basınç etkisinin %7.64 olduğu görülmüştür. İlerleme % 35.29 oranla hızının su jeti tezgâhlarında en önemli faktör olduğu, basıncın %7.64 oranla ise en etkisiz faktör olduğu anlaşılmıştır. Üç boyutlu grafikler değerlendirildiğinde ilerleme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği, yüksek ilerleme hızında nozuldan gelen suyun ve garnetin aynı noktaya daha az etki ettiği bundan dolayı suyun çıkış kısmında genişleme olduğu anlaşılmıştır. İlerleme hızının azalması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.

Literatür incelendiğinde polimer malzemelerin su jeti ile işlenebilirliğinin çok az olduğu daha birçok mühendislik polimerinin su jeti tezgahı ile işlenebilirliğinin yüzey kalitesine etkisi gibi parametrelerin uygulanmadığı görülmüştür. Yapılan çalışma diğer polimer türlerinin bu proseste işlenebilirliğine ışık tutacaktır.

### **Yazarların Katkısı**

Çalışmada her iki yazar da eşit oranda katkı sunmuştur.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### **Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı**

Yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Teşekkür

Yazarlar, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje no: 2019.21.01.1047) Koordinatörlüğü tarafından, destekler için teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- Akincioğlu, S., Gökkaya, H., Akincioğlu, G., & Karataş, M. A. (2020). Taguchi optimization of surface roughness in the turning of Hastelloy C22 super alloy using cryogenically treated ceramic inserts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(19), 3826-3836.
- Akkurt, A. (2009). AISI 1030 Çeliğinin Aşındırıcılı Su Jeti İle Kesilmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Ve Kesme Önü Geometrisinin İncelenmesi. *Pamukkale University J Journal of Engineering Sciences*, 15(1).
- Akkurt, A., Kulekci, M. K., Seker, U., & Ercan, F. (2004). Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 147(3), 389-396
- Alberdi, A., Artaza, T., Suárez, A., Rivero, A., & Girot, F. (2016). An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1-4), 691-704.
- Chanda, M., & Roy, S. K. (2008). *Industrial polymers, specialty polymers, and their applications* (Vol. 74). CRC press.
- Dong, Y., Liu, W., Zhang, H., & Zhang, H. (2014). On-line recycling of abrasives in abrasive water jet cleaning. *Procedia Cirp*, 15, 278-282.
- Gür, A. K., Taskaya, S., & Çetin, Ö. (2019). Ramor 500 Çeliğinde Isıl İşlemin Mikroyapı, Mikrosertlik ve Abrasiv Aşınma Direncine Etkisinin Taguchi Metoduyla Değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 1045-1056.
- Gür, A. K., Ozay, C., Orhan, A., Buytoz, S., Caligulu, U., & Yigittürk, N. (2014). Wear properties of Fe-Cr-C and B4C powder coating on AISI 316 stainless steel analyzed by the Taguchi method. *Materials Testing*, 56(5), 393-398.
- Ishfaq, K., Ahmad Mufti, N., Ahmed, N., & Pervaiz, S. (2019). Abrasive waterjet cutting of clad material: kerf taper and MRR analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(5), 544-553.
- Jose, A. J., & Alagar, M. (2011). Development and characterization of organoclay- filled polyoxymethylene nanocomposites for high performance applications. *Polymer composites*, 32(9), 1315-1324.
- Karakurt, İ., Aydın, G., & Aydın, K. (2010). Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kesme parametrelerinin granit yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Yerbilimleri Dergisi*, 31(2), 99-110.
- Kulekci, M. K. (2002). Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12), 1297-1306.
- Kıvak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, 19-28.
- Liu, X., Liang, Z., Wen, G., & Yuan, X. (2019). Waterjet machining and research developments: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5), 1257-1335.
- Liu, H. T., Hovanski, Y., & Dahl, M. E. (2012). Machining of aircraft titanium with abrasive-waterjets for fatigue critical applications. *Journal of pressure vessel technology*, 134(1).
- Mardi, K. B., Dixit, A. R., Mallick, A., Pramanik, A., Balloková, B., Hvizdos, P., & Zelenak, M. (2017). Surface integrity of Mg-based nanocomposite produced by Abrasive Water Jet Machining (AWJM). *Materials and Manufacturing Processes*, 32(15), 1707-1714.
- Mayuet, P. F., Girot, F., Lamíkiz, A., Fernández-Vidal, S. R., Salguero, J., & Marcos, M. (2015). SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM. *Procedia Eng*, 132, 693-700



- M, I. W., Azmi, A. I., Lee, C. C., & Mansor, A. F. (2018). Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5-8), 1727-1744.
- Nas, E., & Altan Özbek, N. (2020). Optimization of the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools. *Surface Review and Letters*, 27(05), 1950177.
- Nas, E., & Öztürk, B. (2018). Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Materials Testing*, 60(5), 519-525.
- Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
- Savaskan, M., Taptik, Y., & Ürgen, M. (2010). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜDERGİSİ/d*, 3(6).
- Schwartzentruber, J., Spelt, J. K., & Papini, M. (2017). Prediction of surface roughness in abrasive waterjet trimming of fiber reinforced polymer composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 122, 1-17.
- Shanmugam, D. K., & Masood, S. H. (2009). An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of materials processing technology*, 209(8), 3887-3893.
- Shanmugam, A., Krishnamurthy, K., & Mohanraj, T. (2020). Experimental Study Of Surface Roughness And Taper Angle In Abrasive Water Jet Machining Of 7075 Aluminum Composite Using Response Surface Methodology. *Surface Review and Letters*, 27(03), 1950112.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2007). *Experimental designs using ANOVA* (p. 724). Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole.
- Taşdemir, M. (2019). *Ticari Plastikler*. Ankara : *Seçkin Yayınları*.
- Vikram, G., & Babu, N. R. (2002). Modelling and analysis of abrasive water jet cut surface topography. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12), 1345-1354.