

Makale Gönderim Tarihi: 17.05.2023

Yayına Kabul Tarihi: 28.09.2023

## Limra Kireçtaşının CNC Doğal Taş İşleme Makinesinde İşleme Parametrelerinin ve Yüzey Kalitesinin Araştırılması

*Investigation of Processing Parameters and Surface Quality of Limra Limestone in CNC Natural Stone Processing Machine*

Erkan Özkan<sup>1</sup>, Oğuzhan Öz<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar\* Sorumlu yazar: [oguzhanoz@aku.edu.tr](mailto:oguzhanoz@aku.edu.tr)

### Özet

Bu çalışmada Limra kireçtaşı numunelerinin bilgisayar kontrollü makine (CNC) ile işlenmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak uygun işleme parametreleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, ticari ismi Finike Limra olan sedimanter kökenli doğaltaş üzerine 6 mm çapında karbür kesici uç kullanılarak işleme yapılmıştır. İşleme parametreleri; 2000, 2500, 3000 m/dk ilerleme hızı, 169 m/dk (9000 devir), 188 m/dk (10000 devir) 207 m/dk (11000 devir) kesme hızı ve 1, 2, 3 mm kesme derinliğidir. Taguchi deney tasarım yöntemiyle oluşturulan L9 ortogonal dizini dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İşleme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek için “daha küçük daha iyi” yaklaşımına dayanan S/N (Sinyal Değeri/Gürültü Faktörü) oranı kullanılmıştır. Varyans analizi yöntemiyle işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak 1 mm derinlik, 207 m/dk kesme hızı ve 3000 m/dk ilerleme hızı parametrelerinde en küçük yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşılmıştır. İstatistiksel analiz sonucunda kesme derinliği ve kesme hızı parametrelerinin yüzey işlemede etkili parametreler oldukları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Limra, Taguchi Metot, Yüzey pürüzlülüğü, Varyans Analizi

### Abstract

*In this study, appropriate processing parameters were determined by using Taguchi experimental design method to obtain the best surface roughness of marbles with computer controlled machine (CNC). In experimental studies, a 6 mm diameter carbide insert was processed on natural stone of sedimentary origin, whose trade name is Finike Limra. Processing parameters; 2000, 2500, 3000 m/min feed rate, 169 m/min (9000 rpm), 188 m/min (10000 rpm) 207 m/min (11000 rpm) cutting speed and 1, 2, 3 mm depth of cut. Experiments were carried out considering the L9 orthogonal array created by the Taguchi experimental design method. The S/N ratio based on the “smaller is better” approach was used to determine the optimal levels of processing parameters. The effects of machining parameters on surface roughness were evaluated using the variance analysis method. As a result, the smallest surface roughness value was reached in the parameters of 1 mm depth, 207 m/min cutting speed and 3000 m/min feed rate. As a result of statistical analysis, it was determined that the cutting depth and cutting speed parameters are the effective parameters in surface treatment.*

**Keywords:** Limra, Taguchi Method, Surface Roughness, Analysis of Variance

## 1.GİRİŞ

Doğal taşlar asırlar boyunca dayanıklılığı ve zarafeti ile sanatın ve mimarının vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Doğal taş blok, levha ve plakalar yapılan dekoratif ve sanatsal ürünler (rölyef, heykel gibi) günümüzde CNC işleme makineleri el işçiliğine göre daha hızlı ve hassas bir şekilde işlenebilmektedir (Herz, 1988; Özkan ve ark., 2014; Sarıışık ve Özkan, 2016; 2017). Doğaltaşların CNC makinelerinde işlenmesinde freze takımı, makine parametreleri ve kayaç özellikleri ürün kalitesini etkileyen faktörlerdir. Doğal taşlar, doğal yapı malzemesi olması nedeniyle her biri birbirinden farklı karakterizasyona sahiptir ve metal malzemelere göre daha heterojen özelliklere sahiptir. Limra kireçtaşı CNC makinelerinde karbür kaplamalı freze takımlarla kolay ve hızlı işlenebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Limra kireçtaşlarını oluşturan kalsit minerallerinin ortalama tane boyutunun diğer mermer ve kireçtaşlarına göre daha ince ve içerisinde fosil olmaması nedeniyle kolay işlenebilmektedir. Daha kolay ve hızlı işlenen Limra kireçtaşının en az yüzey pürüzlülüğüyle işlenebilmesi yüzey kalitesini artıracak ve takım ömrünü uzatacaktır. Limra kireçtaşının işlenmesinde en iyi yüzey kalitesi uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi ile sağlanacaktır (Erkan ve Öz, 2020; 2021; Sarıışık ve Özkan, 2016; 2017; 2018).

Frezeleme imalat sanayisinde özellikle metal işlemede yaygın olarak kullanılan temel bir işleme prosesidir. CNC’de metal malzemelerin frezeleme işleminde temel kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı ve derinlik parametreleri) yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Alauddin, 1995; Altintas, 1994; Lee and Lin, 2000; Lou et al., 1998). Taguchi deney tasarımının frezeleme işlemlerinde temel kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne karşı etkileşimi tam faktöriyel deney tasarımına kıyasla en az sayıda deneyle çözülebilmektedir (Teruo, 2011).

Farklı özelliklerdeki doğaltaşlarda yapılan çalışmalarda; Kenda ve Kopač (2009) granitlerin elmas kesici uçlar ile işlenmesinde elmas tanelerinin tipi, matrisin sertliği, elmas takımların yapısı, elmas takımların aşınma ilkeleri, suyla soğutmanın ve işleme sürecinin ürün kalitesi ve verimliliği üzerine araştırma yapmışlardır. Zhao and Lang (2010) granit işlemede, milin dönme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Gálos and Gyurika (2000) frezelenmiş granit yüzeylerin ortalama kenar yontma oranını tanımlamak için nicel bir ölçüm yöntemi geliştirmek ve bu ölçüm yönteminin etkin bir şekilde uygulanabilirliği üzerine çalışma yapmışlardır. Gyurika (2018) granitlerin frezeleme işleminde kullanılan frezeleme takımlarının segmentlerindeki ortalama elmas tane büyüklüğündeki değişiklikleri incelemiş ve işleme sırasında uygulanan ilerleme hızının granit yüzeylerin kenarlarına göre kenar yontmasına etkileri üzerine araştırma yapmıştır. Çalışmada 200, 300, 400, 500 mm/dak ilerleme hızı, 1100 m/dk kesme hızı ve 1 mm kesme derinliği parametreleri kullanılmıştır. Gyurika and Szalay (2019) 200, 500, 800, 1100 ve 1400m/dak kesme hızı uygulanarak farklı kesme hızlarında granit yüzeylerinin frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve ortalama kenar talaş oranlarındaki değişimleri analiz etmişlerdir. Arunramnath ve ark (2019) epoksi granit kompozitlerin frezelemesinde 600, 1200, 1800 dev/dk kesme hızı ve 0.03, 0.06, 0.09 m/dk ilerleme hızı parametreleri İdeal Çözüm Benzerlik Bakımından Sıralama Performansı (TOPSIS) yöntemi uygulanarak kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır.

Polini ve Tuchetta (2004) elektroliz elmas freze ile taş şekillendirmede kesme kuvveti ile enerji ve proses parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kesme kuvveti (veya spesifik kesme enerjisi) ile eşdeğer talaş kalınlığı (veya MRR) arasındaki ilişki, 200, 400 ve 600 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızı için güç fonksiyonu ile modellenmiştir. Turchetta ve ark (2009) elmas freze kullanılarak beş farklı taşı işlemek için belirli kesme enerjisi ve işlem parametre-

leri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için bir model geliştirmeye çalışmışlardır. 3-6-9 mm derinlik, 100-250 mm/dk ilerleme hızı, 2000-4000-8000 devir kesme devri işlem parametreleri olarak kullanılmıştır. Turchetta (2012) bir freze makinesi ve elmas kaplı disk ile doğal taşlar üzerinde yapılan çalışmalarda kesme gücü ve enerjisinin hesaplanması için modeller geliştirilmiştir. Çalışmada 0.1, 0.5, 1.0 mm derinlik 200–400–600 mm/dk ilerleme hızı, 3000 rpm devir parametreleri kullanılarak takım aşınmasına bağlı olarak kesme modeli davranışını analiz etmek amacıyla deneysel testler yapılmıştır. Wang (2020), karbür küresel uçlu parmak freze ile mermerin yüksek hızda frezelemesinde işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve mermer talaşları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 1mm kesme derinliği, 0,5 mm kesme genişliği, 800, 1600, 2400, 3200 mm/dk ilerleme hızı ve 2000, 4000, 6000, 8000 dev/dk kesme devri parametreleri ile kuru frezeleme işlemi yapmışlardır. Sarıışık ve Özkan (2016) parmak frezeli kesici uç ile 1.2, 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliği, 2000, 2500 ve 3000 mm/dk ilerleme hızı parametreleri uygulanarak işleme türü, kesme derinliği ve ilerleme hızına göre mermerlerin işlenebilirliğinde kesme kuvveti ve spesifik enerji değeri üzerine çalışmışlardır. Sarıışık ve Özkan (2017) parmak frezeli kesici uç kullanılarak 1.2, 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliği, 2000, 2500 ve 3000 mm/dk ilerleme hızı parametreleri uygulanarak mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisine olan etkilerini araştırmışlardır. Sarıışık ve Özkan (2018) jeolojik oluşumlarına göre sınıflandırılmış 12 çeşit doğal taş üzerine teğetsel kesme kuvveti (Fc), radyal kesme kuvveti (Ft), özgül enerji (Se) ve özgül kesme enerjisi (Sc) değerlerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada 1.2, 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliği, 2000, 2500 ve 3000 mm/dk ilerleme hızı ve 188 m/ dk (10000 devir) kesme hızı işleme parametreleri olarak uygulanmıştır. Özkan ve Öz (2020) metamorfik kökenli mermerlerin karbür kaplamalı kesici uç ile frezelemesinde Taguchi deney metodu uygulanarak işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerine etkileri araştırmışlardır. Çalışmada 1, 2, 3 kesme derinliği, 2000, 2500, 3000 mm/dk ilerleme hızı ve 169, 188 ve 207 m/dk kesme hızı işleme parametreleri olarak uygulanmıştır. Özkan ve Öz (2021) sedimanter kökenli bej mermerlerin frezelemesinde 1, 2, 3 kesme derinliği, 2000, 2500, 3000 mm/dk ilerleme hızı ve 169, 188 ve 207 m/dk kesme hızı parametreleri Taguchi deney metodu uygulanarak işleme parametrelerinin ve mineralojik-petrografik özelliklerin yüzey kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır.

Limra kireçtaşının işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. Erol (2008) Finike Turunçova bölgesindeki limra mermer ocaklarının stratigrafik konumunun ortaya konulması, fasiyes değişimlerinin saptanması, açık ocak ve yeraltı işletmelerinin jeolojik ve üretim özelliklerinin incelenerek üretim açısından en verimli düzeylerin tespit edilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Şengün ve ark. (2013) bej, traverten, limra ve andezit kayaçlarının kesme işleminde kullanılan dairesel testerelerin boştaki ve yükteki durumuna göre gürültü seviyesindeki ve testerenin devir sayısındaki değişimleri araştırmışlardır. Çalışkan ve Yavuz (2019) 4 farklı mermer ocağında (Cappuccino Bej, Adonis bej, Limra, Traverten) blok üretimi amacıyla kullanılan zincirli kollu kesme makinelerinin kesim performanslarını araştırarak zincirli kesicilerin verimli çalışması için optimum çalışma parametrelerini önermişlerdir.

Doğal taşların frezelemesinde, deneme yanılma yöntemiyle parametrelerin belirlenmesi zaman alıcı ve maliyetli süreçlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada limra kireçtaşının işlenmesinde klasik deney yöntemi ve Taguchi deney yöntemi ile frezeleme işlemi yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile limra kireçtaşı için uygun işleme parametreleri tespitinin daha az süre ve maliyetle elde edilmesiyle yüksek yüzey kalitesinde ürünlerin üretilmesi sağlanacaktır. Frezeleme işlemleri sonrasında Ra yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülerek parametrelerin etkililikleri belirlenmiştir. Uygun işleme parametrelerin belirlenmesi yüksek

yüzeysel kalitesinde ürünlerin üretilmesini sağlayacaktır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, limra kireçtaşının frezelemesine yönelik hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada limra kireçtaşının frezelemesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılarak en uygun işleme parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın neticesinde yaygın olarak CNC makinelerinde işlenen limra kireçtaşı için en uygun yüzey pürüzlülüğünü sağlayan işlem parametrelerinin sektördeki uygulayıcılar tarafından kullanılması önerilmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneyde Kullanılan Kireçtaşının Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, Akdeniz bölgesinden çıkarılan ve ticari ismi “Finike Limra” olan sedimanter kökenli kireçtaşı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan kireçtaşının fiziko-mekanik testleri TS EN doğal taş standartlarına göre yapılmış ve yapılan testler ve standart numaraları Tablo 1’de gösterilmiştir. Kireçtaşının fiziko-mekanik test sonuçları ise Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’de üretilen ve geri kazanılan atık miktarları (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2016)

Standart İsimleri	TS EN Standart No
XRF* cihazıyla kimyasal analiz	<a href="#">15309 : 2007</a>
Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini	<a href="#">1936 : 2006</a>
Atmosfer basıncında su emme tayini	<a href="#">13755 : 2008</a>
Sabit moment altında eğilme dayanımının tayini	<a href="#">13161 : 2008</a>
Tek eksenli basınç dayanımı tayini	<a href="#">1926 : 2006</a>
Aşınma direncinin tayini	<a href="#">14157 : 2017</a>
Dona direncin tayini	<a href="#">12371 : 2010</a>
<a href="#">Knoop sertliğinin tayini</a>	<a href="#">14205 : 2003</a>

XRF\*: X-ışını floresansı


Tablo 2. Fiziko-mekanik özellikler

Doğal taş	<b>GY</b> ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	<b>P</b> (%)	<b>SE</b> (%)	<b>KS</b>	<b>BD</b> ( <i>MPa</i> )	<b>ED</b> ( <i>MPa</i> )	<b>AD</b> ( <i>cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup></i> )
<a href="#">Limra</a>	2,33	5,54	3,37	103,85	65,22	8,43	26,23

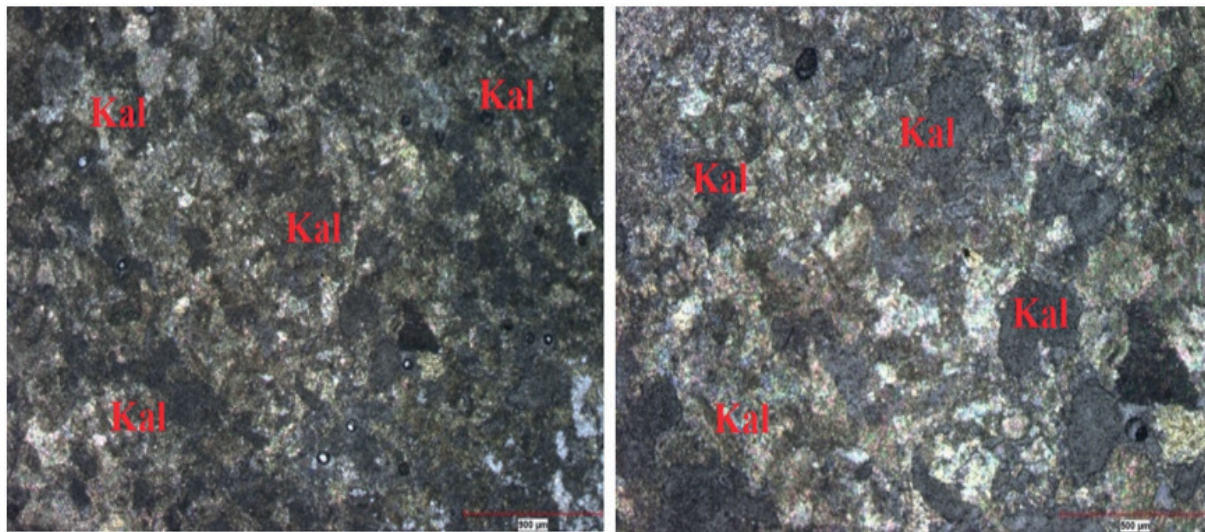
GY: Görünür Yoğunluk, P: Porozite, SE: Su Emme, KS: Knoop Sertliği, BD: Basınç Dayanımı, ED: Eğilme Dayanımı, AD: Aşınma Dayanımı

Deneyde kullanılan kireçtaşının mineralojik ve petrografik özellikleri incelenmiştir. Deneyde kullanılan kireçtaşı; sedimanter kökenli, mikrokristalin dokulu, küçük tane büyüklüğüne sahip olup yapısında çatlak, gözenek ve makro fosil içermemektedir. En küçük tane boyutu 1,9 µm, en büyük tane boyutu 26,5 µm ve ortalama tane boyutu 7,0 µm şeklindedir. Numunenin mineralojik ve petrografik analizi Tablo 3’te, ince kesit görüntüsü ise Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Mineralojik ve petrografik analizri kazanılan atık miktarları (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2016)

Doğal Taş	Yüzey Görünümü	Renk	Mineral Dağılımı	Doku	Ç/ G /F (µm)	Ortalama Tane Boyutu (µm)
<u>Limra</u>		N9	% 99.0 <u>Calcite</u>	Mikrokristalin	-/-/-	7,0

Ç: çatlak, G: gözenek, F: fosil, Geological Rock – Color Chart (2009)



Şekil 1. İnce kesit görünümü

Deneyde kullanılan kireçtaşı örneğinin XRF cihazıyla kimyasal analizi yapılmış ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Kimyasal analiz değerleri

Doğal Taş Türü	AZ* (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MnO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SrO (%)	F (%)
<u>Limra</u>	44,0	0,016	0,251	0,072	0,127	0,007	0,018	-	0,001	55,3	-	0,020	0,072	0,138

AZ\*: Kızdırma kaybı

## 2.2. Taguchi Metodu

Bir işlemdeki parametrelerden proses değişkenliğini azaltan ve etkileyen parametrelerin en iyi kombinasyonunu ortogonal diziler (orthogonal array) adı verilen özel bir diziden yararlanarak minimum deney sayısı ile gerçekleştirmek bu yöntemin temel amacıdır. Klasik yöntemle tüm deneylerin yapılması yerine az sayıda deney yapılarak zaman ve maliyetten tasarruf etmek bu yöntemin önemli avantajlarından biridir (Taguchi and Phadke, 1984; Taguchi and Tsai, 1995).

Taguchi yöntemi, tanımlanmış olan parametrelere göre ortogonal diziler (orthogonal array) kullanılarak deney tasarımının seçilmesini sağlayan ve bu parametrelerin en iyi kombinasyonu

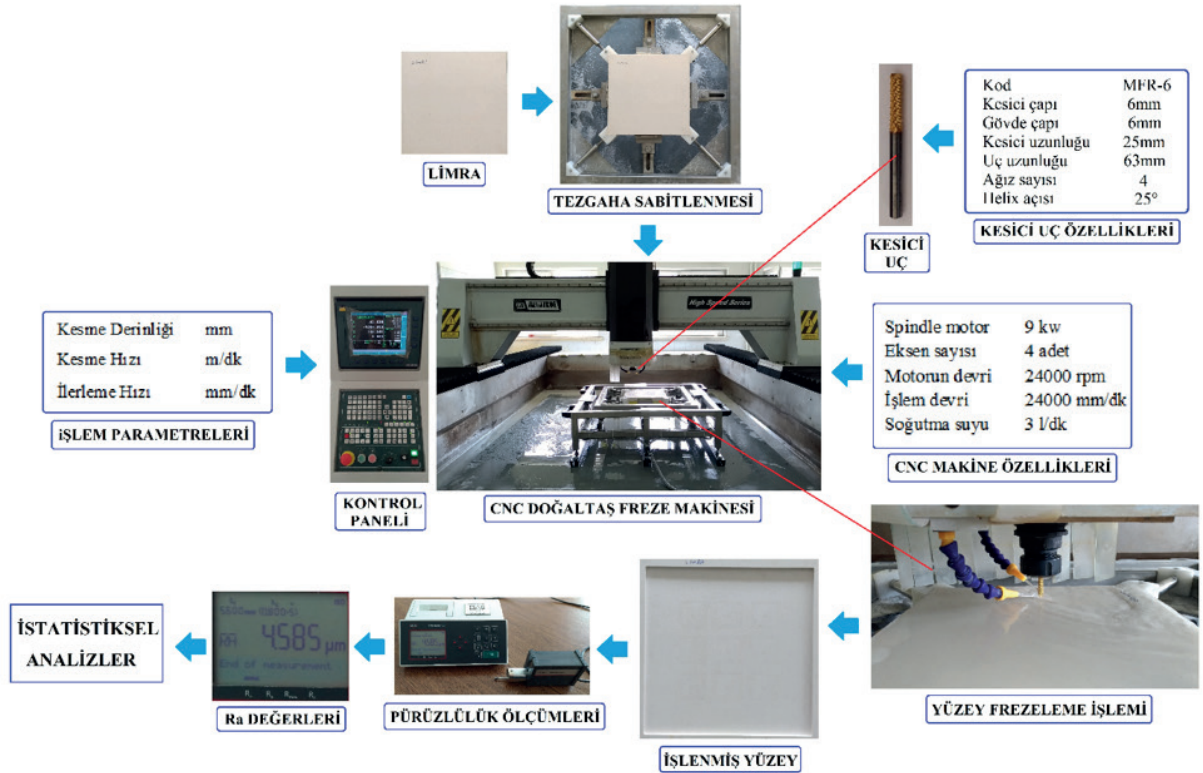
belirlenerek ürün kalitesini arttırmaya yönelik kullanılır. Sinyal değeri (S) sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü (N) ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. S/N oranı ürünün karakteristik değerlerini mümkün olduğunca hedef değerlere yaklaştırmakta ve minimum sapmayı sağlamaktır. S/N oranında performans karakteristik analizinin üç kategorisi vardır: Nominal en iyisi (Nominal is the best), Daha büyük-daha iyi (Larger-is-the better), Daha küçük-daha iyi (Smaller-is-the better). Bu kategorilerin her biri için, bir işlem parametresinin optimal seviyesi, S/N oranının en büyük değeriyle sonuçlanan seviyedir (Nagode and Fajdiga, 1995; Taguchi et al., 2004). Çalışmada S/N oranı analizinin 'daha küçük-daha iyi' (eşitlik 1) fonksiyonu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

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

Deneyel çalışmamızda uygulayacağımız Taguchi tasarımının işlem adımları: Frezeleme için parametre ve seviyeler belirlenir. Parametre ve seviye sayısına uygun ortogonal dizin seçilir. Ortogonal diziye göre deney tasarımı hazırlanır ve uygulaması yapılır. Elde edilen verilere S/N oranı ve varyans analizi uygulanarak sonuçlarının istatistiksel analizi yapılır. Analiz sonuçlarına göre uygun olan parametre ve seviyeler belirlenir (Terou, 2011; Taguchi and Phadke, 1984; Taguchi et al. 2004).

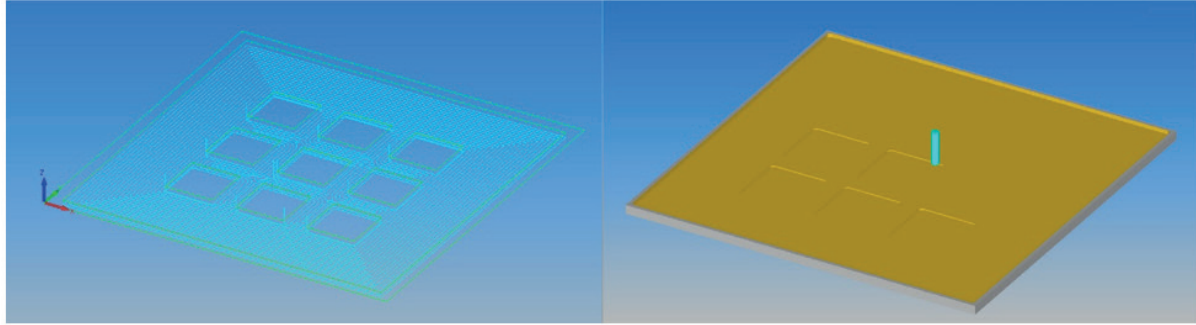
### 2.3. Frezeleme ve Yüzey Pürüzlülüğü İşlemleri

Frezeleme işlemleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Megatron Marka 4 Eksenli CNC doğal taş dikey işleme makinesinde yapılmıştır. CNC işleme makinesinin ve kullanılan kesici ucun teknik özellikleri Şekil 2'deki görselde verilmiştir. CNC doğal taş işleme makinesinde frezeleme ve yüzey pürüzlülük işlemleri aşamalar halinde Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney işlem akışı

İşlemlerin ve parametrelerin programlanmasında AlphaCAM programı kullanılmıştır. Belirlenen deney tasarımına göre 300x300x20 mm boyutundaki kireçtaşı üzerine 40x40 mm boyutlarında deney sayılarına göre kareler (Şekil 3) modellenmiştir.



Şekil 3. Kireçtaşı'nın AlphaCAM çizim programında modellenmesi

Frezeleme işleminde seçilen parametre ve seviyeleri; derinlik=1, 2 ve 3 mm; kesme hızı=169, 188, 207 m/dk; ilerleme hızı=2000, 2500 ve 3000 mm/dk şeklinde olup Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu parametrelerin seçimi için önceki çalışmalar (Özkan ve Öz, 2020; 2021; Sarıışık ve Özkan, 2016; 2017; 2018) ve mermer sektöründe CNC doğal taş işleyen firmaların operatör gözlemleri dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Parametreler ve seviyeler

Parametreler	Sembol	Birim	Kod	Seviyeler		
				1	2	3
Kesme Derinliği	$a$	mm	A	1	2	3
Kesme Hızı	$V$	m/dk	B	169 (9000 devir)	188 (10000 devir)	207 (11000 devir)
İlerleme Hızı	$f$	mm/dk	C	2000	2500	3000

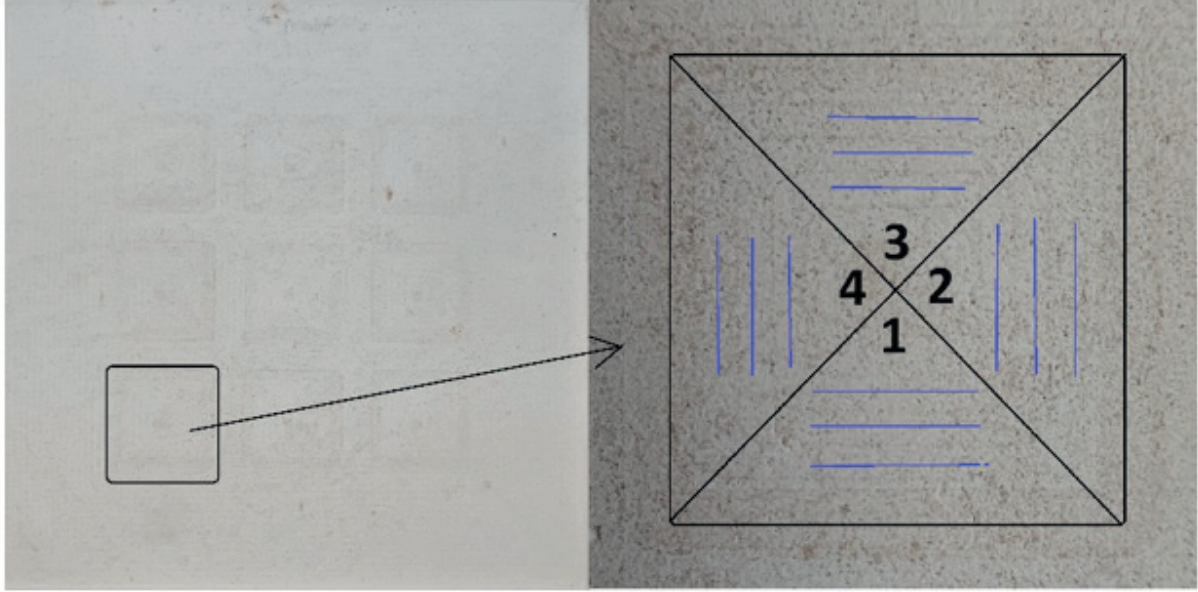
Seçilen parametre ve seviyelere göre; klasik yöntem uygulanarak 27 deney modeli oluşturulmuştur. Taguchi deney metodunun 3 seviye ve 3 parametre için ortogonal dizine karşılık gelen L9 dizini oluşturulmuş ve bu dizine göre oluşturulan deney modeli Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. L9 ortogonal dizin ve deney tasarımı

Deney No:	L9 ortogonal dizin modeli			Parametrelerin deney tasarımı		
	A	B	C	$a$ (mm)	$V$ (mm/dk)	$f$ (mm/dk)
T1	1	1	1	1	169 (9000 devir)	2000
T2	1	2	2	1	188 (10000 devir)	2500
T3	1	3	3	1	207 (11000 devir)	3000
T4	2	1	2	2	169 (9000 devir)	2500
T5	2	2	3	2	188 (10000 devir)	3000
T6	2	3	1	2	207 (1000 devir)	2000
T7	3	1	3	3	169 (9000 devir)	3000
T8	3	2	1	3	188 (10000 devir)	2000
T9	3	3	2	3	207 (11000 devir)	2500

Yüzeyin düzgünlüğünü ve ölçüm hassasiyetini sağlamak için frezeleme işleminden önce limra örneğinin ilk olarak üst yüzey tesviyesi yapılmıştır. Deney modellemesine göre işleme yönü olarak içten dışa hatlar ile karelerin işlenmesi yapılmıştır. Son olarak işlenen kısımlar haricinde kalan kısımların tesviyesi yapılmıştır.

Marh Perthometer M2 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Şekil 4' te gösterildiği gibi mavi çizgi doğrultusunda 3'er adet Ra pürüzlülük ölçümü alınmıştır. Toplamda her kare bölgeden alınan 36 adet ölçümün ortalaması o kareye ait Ra pürüzlülük değeri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4. İşlenmiş yüzeyde pürüzlülük ölçümünün alınması

### 3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Deneysel çalışmalar için belirtilen ebatlarda hazırlanan Limra kireçtaşı hem klasik deney tasarımı ile hem de Taguchi'nin ortogonal tasarımına göre derinlik, ilerleme hızı, kesme hızı parametrelerine bağlı olarak işlenmiştir. Frezeleme sonrasında kireçtaşı numunesinin yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Klasik deney tasarımı ile Taguchi tasarımı karşılaştırılarak, Taguchi tasarımının uygulanabilirliği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Klasik yöntemle yapılan 27 deney ve Ra pürüzlülük ölçüm değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün en küçük değerde olması istendiği için Taguchi'nin Eşitlik 1'deki "daha küçük-daha iyi" amaç fonksiyonu ile S/N oranları hesaplanmıştır. L9 ortogonal dizinine göre 9 deney sonucunda Ra yüzey pürüzlülük değerleri ve hesaplanan S/N oranı değerleri Tablo 8'de gösterilmiştir.



Tablo 7. Klasik yöntemle göre parametrelerin deney tasarımı ve pürüzlülük ölçüm değerleri

Deney No:	Derinlik	Kesme hızı	İlerleme hızı	Ra	Deney No:	Derinlik	Kesme hızı	İlerleme hızı	Ra
1	1	9000	2000	4,25	15	2	10000	3000	4,90
2	1	9000	2500	4,54	16	2	11000	2000	4,53
3	1	9000	3000	3,56	17	2	11000	2500	5,15
4	1	10000	2000	4,51	18	2	11000	3000	4,35
5	1	10000	2500	4,75	19	3	9000	2000	5,43
6	1	10000	3000	3,57	20	3	9000	2500	5,28
7	1	11000	2000	5,33	21	3	9000	3000	4,75
8	1	11000	2500	5,64	22	3	10000	2000	5,60
9	1	11000	3000	3,47	23	3	10000	2500	5,37
10	2	9000	2000	5,33	24	3	10000	3000	4,72
11	2	9000	2500	4,43	25	3	11000	2000	5,44
12	2	9000	3000	4,78	26	3	11000	2500	4,74
13	2	10000	2000	5,14	27	3	11000	3000	4,75
14	2	10000	2500	4,41					

Tablo 8. Ra ve S/N oranı değerleri

<u>a</u>	V	<u>f</u>	Ra	S/N-Ra
<u>mm</u>	<u>m/dk</u>	<u>m/dk</u>		
1	169	2000	4,26	-12,59
1	188	2500	4,73	-13,50
1	207	3000	3,44	-10,94
2	169	2500	4,46	-12,99
2	188	3000	4,90	-13,80
2	207	2000	4,52	-13,10
3	169	3000	4,77	-13,57
3	188	2000	5,63	-15,01
3	207	2500	4,74	-13,52

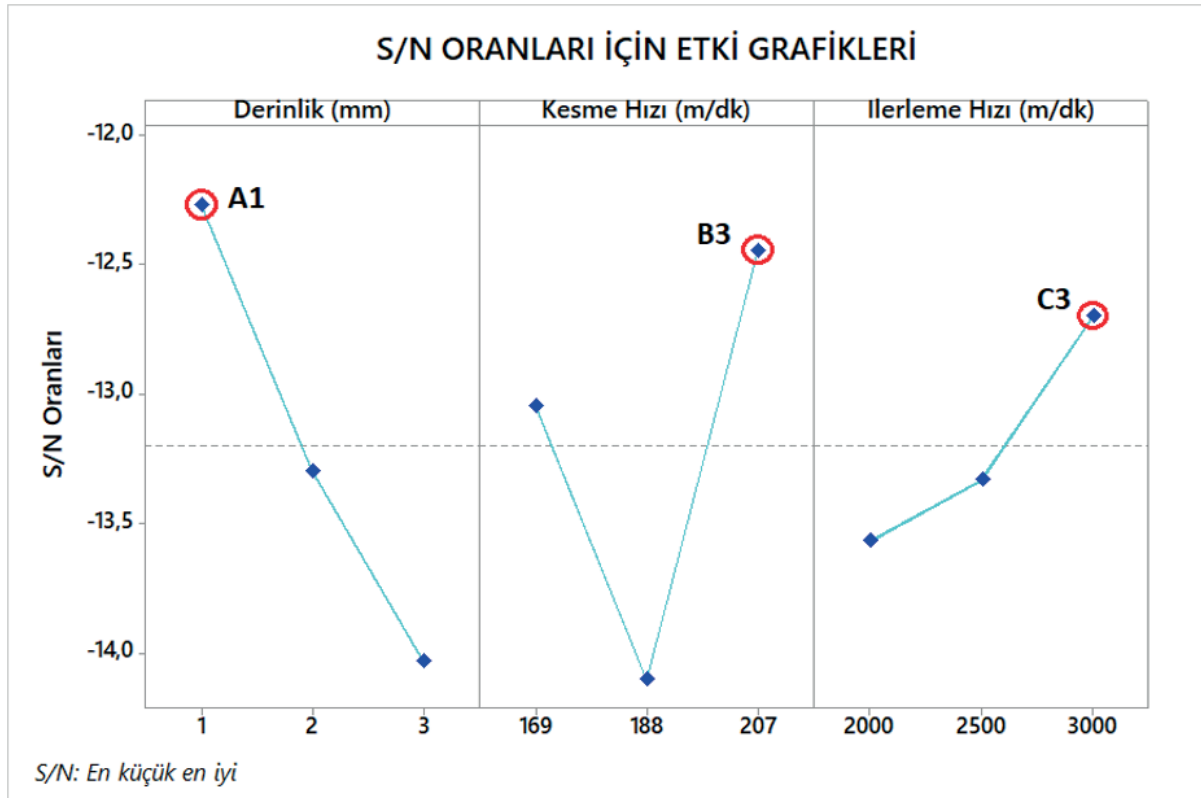
### 3.1. İstatistiksel Analiz

Yüzey kalitesini artırmak için uygun olan işleme parametre ve seviyelerinin kombinasyonlarının tespiti için istatistiksel analizler yapılmıştır. Ra pürüzlülük faktörünün işleme parametrelerine göre S/N yanıt tablosu ve parametrelerin etki dereceleri belirlenmiş ve bu değerler Tablo 9'da gösterilmiştir. İşleme parametrelerinin her bir seviyesi için verilen Delta değerlerinin en yüksek olduğu parametre pürüzlülük üzerinde en büyük etkiye sahiptir ve Rank değeri ise her bir parametrenin etki derecesini göstermektedir.

Tablo 9. Ra faktörü için ortalama S / N oranı yanıt tablosu

Level	Derinlik	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	-12,28	-13,06	-13,57
2	-13,30	-14,11	-13,34
3	-14,04	-12,46	-12,70
Delta	1,76	1,65	0,87
Rank	1	2	3

En düşük Ra pürüzlülük değerine ulaşabilmek için olası parametre kombinasyonun 1 mm derinlik, 207 m/dk kesme hızı ve 3000 m/dk ilerleme hızı (A1:B3:C3) olduğu tespit edilmiştir. Ra pürüzlülük değeri için işlem parametrelerine göre S/N tepki grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Grafiklerde eğimlerin en yüksek olduğu yer parametrelerin etkili olduğu seviyeleri göstermektedir.



Şekil 5. S/N oranları için etki grafikleri

İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğündeki etkililik oranlarını belirleyebilmek için varyans analizi yapılmıştır. F hipotezine göre yapılan analizde F oranı, her faktörün etkisini gösterir. Parametre seviyelerinin serbestlik derecesine göre belirlenen F oranı değeri, varyans analiziyle hesaplanan sonuçla kıyaslanarak parametrelerin yüzey pürüzlülüğündeki etkinlik değerini göstermektedir. Her bir parametrenin Ra pürüzlülük değeri üzerindeki etkililik oranı, F hipotezi ve regresyon sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Ra faktörü için varyans ve regresyon analiz sonuçları

Faktörler	Serbestleşme derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	% Etki	F
Derinlik	2	4,6908	2,3454	44,69	11,61
Kesme Hızı	2	4,1886	2,0943	39,91	10,37
İlerleme Hızı	2	1,2120	0,6060	11,55	3,00
Hata	2	0,4039	0,2019	3,85	
Total	8	10,4952		100	
S	R-Kare	R-Kare (Düzeltilmiş)			
0,4494	96,15%	84,61%			

F hipotezi analizinde, işlem parametre seviyelerinin serbestlik derecesine göre F değeri  $F_{0,05;2;8}=4.46$ 'dır ve hesaplanan F değerleri 4,46'dan büyük olan parametreler yüzey pürüzlülüğünde etkili olmaktadır. Analiz sonucunda %44,69 ile derinlik ve %39,91 ile kesme hızı faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü oluşumunda etkin parametre olmaktadır.

### 3.2. Onay Testi

Onay testi, S / N oranı analizlerine göre tahmin edilen parametre kombinasyonlarının gerçek çalışma koşulları altında doğruluğunu kontrol etmek amacıyla yapılır. Onay testi, deneylerin uygulanabilirliğini ve elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için önemlidir. S / N oranı sonucunda belirlenen en uygun parametre kombinasyonları ile kontrol deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılır. Onay deneyleri sonucunda tahminlere dayanan koşullar elde edilen gerçek sonuçlara yakın olmalıdır. Test sonuçları tahmin değerlerine yakınsa, deneysel koşulların geçerliliğini ve kontrol faktörlerinin uygulanabilirliğini doğrular. Bu, tahmin edilen parametre kombinasyonlarının uygulanabilir olduğunu gösterir (Öktem ve ark., 2006; Taguchi and Tsai, 1995; Yuvaraj and Suresh, 2019).

Tahmini değerlerin (SF) belirlenmesi Eşitlik 2 ile gerçekleştirilmiştir (Yuvaraj and Suresh, 2019).

$$n_{opt} = n_m + \sum_{i=1}^f \bar{n}_i - n_m \quad (2)$$

$n_m$  = S/N oranının genel ortalaması

$n_i$  = her faktörünün i seviyesinin S/N oranlarının ortalaması

f = faktör sayısı

Tablo 11. Onay testi sonuçları

Doğal taş	En düşük pürüzlülük elde edilen seviyeler	Tahmini Ra değerleri	Doğrulama deneyleri
Limra	A1B3C3	3,52	3,44

Limra kireçtaşının onay testi sonuçları Tablo 11'de gösterilmiştir. Doğrulama deney sonuçları karşılaştırıldığında parametre değerlerinin Limra kireçtaşının içerisinde makro fosil olmaması ve mineral tane boyunun ince olmasından dolayı iyi tahmin edildiği sonucuna varılmıştır.

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, doğal taş sektöründe dekoratif ve sanatsal ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan Limra kireçtaşının işlenmesi sonrasında yüzey kalitesi araştırılmış, işleme koşullarını, üretim performansını ve ürün kalitesini etkileyen parametrelerden en uygun olanı belirlenmeye çalışılmıştır. Örneklenen kireçtaşı için, kullanılan CNC frezeleme makinesinde gerçekleştirilen çalışma koşullarında elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Taguchi yönteminin Limra kireçtaşında, farklı seviyelerde farklı parametrelerin uygun kombinasyonunu belirlemek için uygulanabilir olduğu görülmüştür. Metodun, Limra kireçtaşının frezelenmesi sonucu ortaya çıkan ürünün yüzey kalitesinin belirlenmesinde ve analizinde sistematik, etkin ve verimli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. 3 parametre ve 3 seviyenin faktöriyel tasarımının klasik kombinasyonu 27 adet deney gerektirirken Taguchi

ortogonal dizin (L9) ile 9 adet deneye indirilmiştir. Klasik deneysel metotlar yerine ortogonal dizin kullanılmasıyla deney sayısı, zaman ve maliyet en aza düşürülerek CNC ile işleme performansı arttırılmış ve elde edilen ürünlerin kalitesi iyileştirilmiştir. Taguchi yöntemini kullanarak, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen ana faktörün kesme derinliği, ikincil faktörün ise kesme hızı olduğu belirlenmiştir.

Limra kireçtaşı doğal taş olduğundan mineralojik özellikleri, kristal yapıları, tane boyutları yüzey kalitesini belirleyen yapısal özelliklerdir. Karbür kesici uç frezeleme işlemini tane kopartarak gerçekleştirdiğinden ince tane boyutlu ve mikrokristalin yapıları Limra kireçtaşı'nın düşük kesme derinliği, yüksek kesme ve ilerleme hızlarında frezelenmesinin kolaylıkla gerçekleştiği görülmüştür. Kesme derinliğindeki artış ile kesici ucun yanal yüzeyindeki temas mesafesi arttığından yüzeyden daha fazla tane kopartıldığı ve çıkan ince talaşın yeterince uzaklaştırılmadığı görülmüş, bu durumun kötü yüzeylerin oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Varyans analizi sonucu elde edilen sonuçlara göre Ra pürüzlülük değerinde en etkili parametrelerin %44,69 kesme derinliği ve %39,91 kesme hızı olduğu sonucuna varılmıştır. İlerleme hızındaki değişimlerin yüzey pürüzlülüğüne önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Düşük kesme derinliği ve yüksek kesme ve ilerleme hızlarında frezeleme yapıldığında yüzey kalitesinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Taguchi tahminine dayalı belirlenen en uygun işleme kombinasyonunun doğrulama deneyleri yapılarak metodun doğruluğu test edilmiştir. Onay testi sonucunda; tahmini belirlenen en uygun parametre kombinasyonlarının iyi tahmin edildiği ve gerçek çalışma koşullarında uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Doğaltaşlar, mineral dokusu ve tane boyutuna göre farklılık gösterir ve bu nedenle, gelecekteki çalışmalarda daha büyük bir veri tabanı kullanılması önerilir.

## **KAYNAKLAR**

Alauddin, M., El Baradie, M.A., Hashmi, M.S.J., 1995. Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. *Journal of Materials Processing Technology*. 55(2), 123-127. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01795-X

Altintas, Y., 1994. Direct adaptive control of end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 34(4), 461-472. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90078-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90078-7)

Arunramnath, R., Thyla, P.R., Mahendrakumar, N., Ramesh, M., Siddeshwaran, A., 2019. Multi-attribute optimization of end milling epoxy granite composites using TOPSIS. *Materials and Manufacturing Processes*. 34(5), 530-543. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1566960>

Çalışkan, M.A., Yavuz, H., 2019. Mermer Ocaklarında Kullanılan Zincirli Kesme Makinelerinin Performansının Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 23, 108-118.

Erol, A., 2008. Finike Yöresi (Batı Toroslar) Limra Mermerlerinin Jeolojisi Ve Ekonomik Potansiyeli. Yüksek lisans tezi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir, Türkiye.

Geofrey, B., 1989. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. New York, Basel, Marcel Dekker Inc.

Gálos, M., Gyurika, I.G., 2014. Quality measuring numbers of milled edges of granite surfaces. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 58(2), 121–129. <https://doi.org/10.3311/PPci.2158>

Gyurika, I.G., 2018. Researching the Effects of Feedrate and Diamond Grain Size on Edge Chipping of Milled Granite. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*. 25(1), 49-55. <https://doi.org/10.17559/tv-20160504130353>

Gyurika, I.G., Szalay, T., 2019. The examination of the effect of variable cutting speeds on the surface and edge qualities of milled granite materials. *Advances in Mechanical Engineering*. 11(7), 1-12. <https://doi.org/10.1177/1687814019836319>

Herz, N., 1988. Geology of Greece and Turkey: potential marble source regions. *Classical Marble: Geochemistry. Technology. Trade, Springer*. 7-10.

Kenda, J., Kopač, J., 2009. Diamond Tools for Machining of Granite and Their Wear. *Journal of Mechanical Engineering*. 12(55), 775-780.

Lee, T.S., Lin, Y.J., 2000. A 3D predictive cutting-force model for end milling of parts having sculptured surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 16(11), 773-783. <https://doi.org/10.1007/s001700070011>

Lou, M.S., Chen, J.C., Li, C.M., 1998. Surface roughness prediction technique for CNC end-milling. *Journal of industrial technology*. 15(1), 1-6.

Teruo, M., 2011. *Taguchi Methods Benefits, Impacts, Mathematics, Statistics, and Applications*. New York, USA.

Nagode, M., Fajdiga, M., 1995. Experiment Design for Structures Loading State Determination. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. 41, 257-262.

Öktem, K., Erzurumlu, T., Çöl, M., 2006. A study of the Taguchi optimization method for surface roughness in finish milling of mold surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 28, 694-700. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2435-6>

Özkan, E., Saruışık, G., Ceylan, S., 2014. Application and productivity analysis of new channel opening method in natural stone quarries with diamond wire cutting machine. *Arabian Journal of Geosciences*. 8(2), 1089-1098. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1230-9>

Özkan, E., Öz, O., 2020. Determination of appropriate cutting parameters depending on surface roughness by taguchi method in milling of marbles. *Arabian Journal of Geosciences*. 13, 532, <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05380-0>

Özkan, E., Öz, O., 2021. The effect of characterization of carbide end milled limestones on optimal parameters. *Arabian Journal of Geosciences*. 14, 1181. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07538-w>

Polini, W., Turchetta, S., 2004. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44(11), 1189-1196. <https://doi.org/10.1016/j>

ijmachtools.2004.04.001

Sarıışık, G., Özkan, E., 2016. Bilgisayar kontrollü makine (cnc) ile mermerlerin işlenebilirliğinde kesme kuvveti ve spesifik enerjinin belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 16(2), 420-430. <https://doi.org/10.5578/fmbd.27592>

Sarıışık, G., Özkan, E., 2017. Mermerlerin CNC makinesi ile işlenmesinde kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisinin istatistiksel analizi. Journal of Science and Engineering. 19(55), 178-193. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195514>

Sarıışık, G., Özkan, E., 2018. Effects of natural rock properties on cutting forces, specific energy and specific cutting energy by four-axis machine. Arabian Journal of Geosciences. 11(84), <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3424-7>

Şengün, N., Altındağ, R., Demirdağ, S., 2013. Dairesel testerele kesme işleminde testere devir sayısının ve gürültü seviyesi değişimlerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 19(3), 121-126.

Taguchi, G., Phadke, M.S., 1984. Quality engineering through design optimization," IEEE Global Telecommunications Conference. Atlanta.

Taguchi, G., Tsai, S.C., 1995. Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology. IEEE Transactions on Reliability. 44(2), 225-229. <https://doi.org/10.1109/24.387375>

Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y., 2004. Taguchi's quality engineering handbook, New York, Wiley-Interscience.

Turchetta, S., Polini, W., Buyuksagis, I.S., 2009. Investigation on stone machining performance using force and specific energy. Advances in Mechanical Engineering. 175817. <https://doi.org/10.1155/2009/175817>.

Turchetta, S., 2012. Cutting force and diamond tool wear in stone machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 61, 441-448. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3717-4>

Yuvaraj, T., Suresh, P., 2019. Analysis of EDM Process Parameters on Inconel 718 Using the Grey-Taguchi and Topsis Methods. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering. 65(10), 557-564. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6194>

Wang, F., Liu, S., Guo, Z., Cao, L., 2020. Analysis of cutting forces and chip formation in milling of marble. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 108, 2907-2916. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05575-5>

Zhao, M., Lang, X., 2010. Experimental research on cutting force with diamond mill cutting granite. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536843>