



**HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ**

***HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING***

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

---

# **İstatistiksel K-Ortalamlar Kümeleme Analizi ile Doğal Taşların Yeni İşlenebilirlik İndeksi**

*A new processability index of natural stones with statistical K-means clustering analysis*

**Yazar(lar) (Author(s)):** Gencay SARIŞIK, Ahmet Sabri ÖĞÜTLÜ

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sarıışık G., Öğütlü S. A., “ İstatistiksel K-Ortalamlar Kümeleme Analizi ile Doğal Taşların Yeni İşlenebilirlik İndeksi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 156-165, (2018).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>

# İstatistiksel K-Ortalamalar Kümeleme Analizi ile Doğal Taşların Yeni İşlenebilirlik İndeksi

**Gencay Sarıışık, Ahmet Sabri Öğütü**

Harran Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

e-posta: gsariisik@harran.edu.tr, sogutlu@harran.edu.tr

Geliş Tarihi: 14.12.2018

Kabul Tarihi: 28.12.2018

## Özet

Bu çalışmada doğal taşların işlenebilirliğini etkileyen kesme kuvveti ( $F_c$ ,  $F_t$ ) ve spesifik enerjisini ( $S_k$ ,  $S_e$ ) belirlemek için dört eksenli bilgisayar kontrollü makine kullanılmıştır. Toplam 17 doğal taş türü jeolojik formasyonlarına göre kategorize edilmiştir. Bu çalışma üç bölümden oluşmaktadır: (1) dört eksenli bir makine ve 6.0 mm çapında kesici uç kullanarak doğal taşların işlenmesinden ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin deneysel ölçümü; (2) kesme kuvveti, spesifik kesme enerjisi ve spesifik enerjisi değerlerinin hesaplanması; ve (3) parametrelerin istatistiksel analizinden oluşmaktadır. Doğal taşların kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerjisi ve spesifik enerji değerleri bakımından  $p < 0.001$  anlamlılık düzeyinde kesme derinliği ve ilerleme hızı bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğal taşların işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızı etkili olduğu görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla doğal taşların kesme kuvveti, spesifik kesme enerjisi ve spesifik enerjileri istatistiksel K ortalama kümeleme yöntemi ile işlenebilirlik indeksi belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Doğal taş, kesme kuvveti, spesifik enerjisi, K ortalama kümeleme analizi, işlenebilirlik indeksi

## A new processability index of natural stones with statistical K-means clustering analysis

### Abstract

This study used a four-axis computer controlled machine to determine the cutting forces ( $F_c$ ,  $F_t$ ) and specific energy ( $S_c$ ,  $S_e$ ) affecting the processability of natural stones. A total of 17 types of natural rocks were categorized according to their geological formations. This study consisted of three parts: (1) experimental measurement of cutting forces resulting from processing natural rocks using a 6.0-mm diameter end mill cutting tool and a four-axis machine; (2) calculation of cutting forces, specific cutting energy and specific energy values; and (3) statistical analysis of the parameters. In terms of cutting forces, specific cutting energy and specific energy values, a statistically significant difference ( $P < 0.001$ ) was observed among depth of cut and feed speed. It was found that the parameters that affected processability of natural stones were depth of cut and feed speed. Accordingly, the processability of natural stones processing type, depth of cut and feed speed was found that affected. With the data obtained from the tests, the processability index of the cutting forces, specific cutting energy and specific energy of natural stones was determined by the statistical K-means clustering method.

**Keywords:** Natural stone, cutting forces, specific energy, K means clustering method, processability index

### 1. Giriş

Araştırmacılar tarafından doğal taşların dairesel testereli makinelerde kesimi esnasında performanslarını etkileyen parametreler kesme kuvveti, teğetsel kesme kuvveti, testeredeki soketlerin modellenmesi, spesifik kesme enerji, spesifik enerji ve güç tüketimi belirlenmesi, talaş geometrilerinin tanımlanması, kesici uçların aşınmasını etkileyen işleme parametreleri ve elmas kesici uçlarla modelleme konularında çalışmalar yapılmıştır [1-17].

Bilgisayar kontrollü makineler ile doğal taşlardan 3-boyutlu ürünlerin işlenmesinde daha verimli bir üretim yapabilmek için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir [18-20]. Doğal taşların işlenmesinde kullanılan kesici uçların bilgisayar kontrollü (CNC) makinelerde işlenebilirliğini etkileyen işleme parametreleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda farklı geometriye sahip kesici uçlar (içten soğutmalı) kullanılarak, farklı devir ve ilerleme hızlarında kesme kuvvetleri, spesifik enerji ve elmas kesici uçların belirlenmiştir. CNC makinesinde kesici uçlar

kullanılarak, doğal taşların işleme parametreleri (işleme türü, kesme derinliği ve ilerleme hızı) belirlenmiş, kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerjisi ve spesifik enerji değerlerinin istatistiksel olarak analizi yapılmıştır [20-24].

Doğal taş işleme atölyelerinde CNC makinelerde karbür kaplı parmak freze uçların kullanımı ile üç boyutlu tasarımlı nihai ürünlerin işlenmesi yapılmaktadır. Doğal taşların işlenebilirliğinin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek için kesici uçların doğru seçimi ve performans tahmini yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, kesici uçların uygun seçimi ve performans tahmini, işlenebilirlik verimliliğinin artırılmasında ve maliyetlerin azaltılması için doğal taşların CNC makinesinde işlenmesinde oluşan spesifik kesme enerjinin istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile işlenebilirlik derecesi belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bilgisayar kontrollü makinelerde işlenebilirlik deneyleri için kullanılması planlanan doğal taşlar Afyon ilindeki fabrikalardan temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak örneklerin ticari ismi, kodu, petrografik ismi, ana bileşeni, boyutu, sayısı ve yüzey işleme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan doğal taşların teknik özellikleri.

Ticari İsmi	Traverten	Mermer	Kıraçtaşı
Numune Kodu	T1-T5	M1-M7	K1-K5
Petrograf İsim	Sedimanter	Metamorfik	Sedimanter
Ana Bileşen		Kalsit	
Boyut (mm)		300 × 300 × 30	
Sayı		2	
Yüzey İşleme		Cilalı	

Bilgisayar kontrollü makineler ile işlenebilirlik deneylerinde 6 mm çapında kesici uçlar kullanılmıştır. Deneylerde kesici uçların takım ömrü dikkate alınarak, 2 adet kesici uç kullanılmıştır. Kesici ucun çapı 6 mm, sap çapı 6 mm, kesici uzunluğu 25 mm, uç uzunluğu 76 mm, kesici ağız sayısı 4, helis açısı 25°, Ağırlık 26,15 g, Co %12, WC % 88, sertlik 1680 (HV30 ISO 3878), yoğunluk 14.1 g/cm<sup>3</sup>, kırılma dayanımı 3800 N/m<sup>2</sup>, ve ortalama tane boyutu 0.5 µm olarak tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici ucun görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kesici ucun görünümü

Bilgisayar kontrollü makine tezgâh, motor, güç ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Deneylerin yapıldığı Megatron Marka 4-Eksenli bilgisayar kontrollü (CNC) makinenin görünümü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bilgisayar kontrollü (CNC) makine

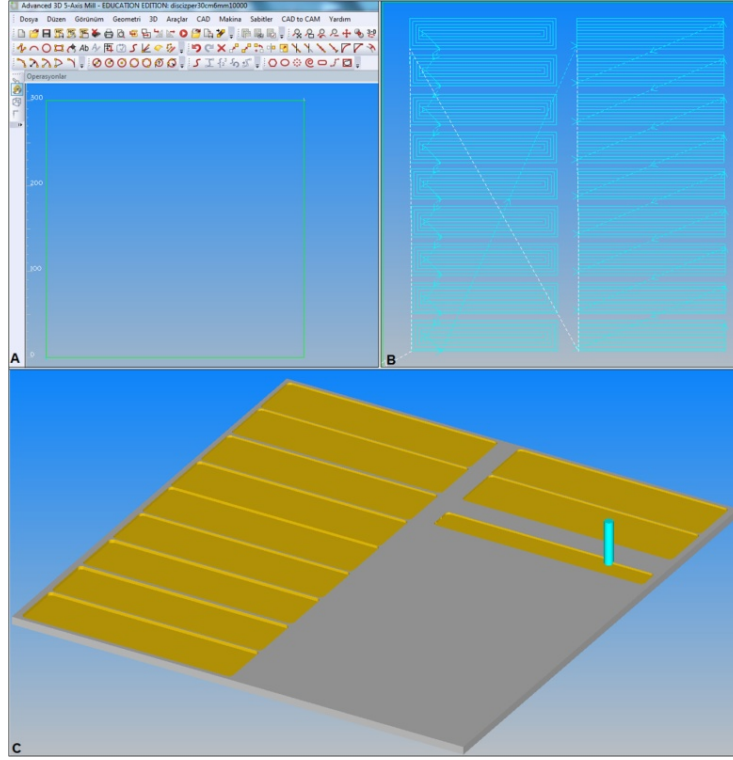
Deneylerin yapıldığı bilgisayar kontrollü (CNC) makinenin teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Bilgisayar kontrollü (CNC) makinenin teknik özellikleri

İşleme özellikleri	Birim	Değerler
Spindle motor	kW	9
Eksen sayısı	adet	4
Motorun devri	rpm	24000
İşlem devri	rpm	24000
X ilerleme hızı	mm/dk	80000
Voltaj	V	380
İşleme boyu	mm	4000-4500
İşleme eni	mm	2000-2500
İşleme yüksekliği	mm	500-600
Tezgâh yüksekliği	mm	700-750
Tezgâh boyu	mm	2500-3000
Soğutma suyu	l/dk	3
Otomatik takım	adet	8

Bilgisayar kontrollü (CNC) makinelerde farklı işleme parametrelerine göre doğal taşların deneyleri yapılmıştır. Deneyde işleme parametrelerinin belirlenmesinde Alphacam programı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak örnekler 12×2.5 cm boyutlarında 18 adet dikdörtgen (3.0 x 3.0 = 9.0

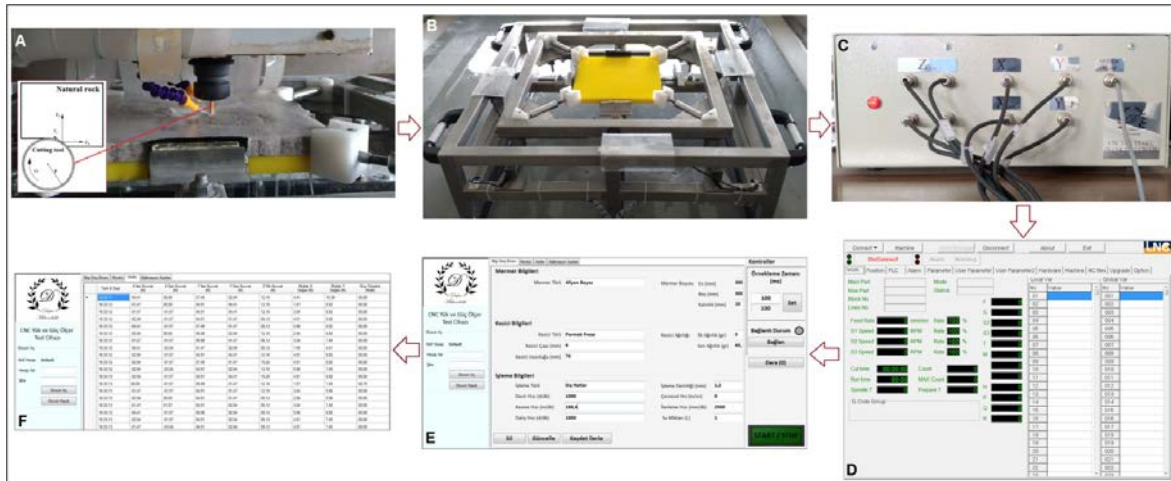
mm) Alphacam programında modellenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Test örnekleri a) Alpha CAM çizim programı b) modelleme c) simülasyonu

Deneylerde verilerin elde edilebilmesi için bilgisayar kontrollü (CNC) makinenin tezgahına sabitlenen güç ve yük ölçer test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz yük hücreleri, ölçüm ve kontrol ünitesi ve Defne Lab-Soft programından oluşmaktadır. Deney örnekleri cihazın üzerine bağlama aparatları ile sabitlenmiştir. Cihazda kuvvet ölçümü için 8 adet yük hücresi (4 tane Z ekseninde, 4 tanesi X ve Y ekseninde) kullanılmıştır. Defne Lab-Soft programının ara yüzünde örnek türü, boyutu ve tüm işleme parametreleri bulunmaktadır. Alphacam çizim programında alınan NC kodları Recon programı arayüzü ile CNC makinesine aktarılmıştır. Kesici uç

pens takım tutucuya takılarak, CNC makinesinin motoruna sabitlenmiştir. Kesici uç kontrol ünitesindeki fonksiyon ve operasyon tuşları ile deney numunesinin yüzeyi üzerinde referans noktasına yönlendirilerek, sıfırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kontrol ünitesinde fonksiyon ve operasyon tuşların yardımıyla NC kodu seçilip, başla tuşu ile deneyde ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Doğal taş soğutma işleminde 1 l/d debisi olan su ile farklı işleme parametrelerine bağlı olarak her bir ölçümden saniyede 100 veri alınacak şekilde 120x25 mm boyutunda dikdörtgenlerin her biri 40 sn sürede işlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. İşlenebilirlik deneyinde kullanılan işler a) Kesici ucun kuvvetlerinin vektör gösterimi b) güç ve yük ölçer test cihazı c) kontrol ünitesi d) Defne Lab Soft test programı arayüzü e) Recon programı arayüzü f) Defne Lab Soft programındaki verilerin görüntülenmesi

İşlenebilirlik deneylerinde elde edilen spesifik kesme enerji değerleri kullanılarak K ortalamalar kümeleme yöntemi kullanılacaktır. K ortalamalar hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemidir. Özellikle sınıflandırılacak birim sayısı çok fazla olduğunda kullanışlıdır. Bu yöntemde sınıflama yapılacak küme sayısı önceden belirlenmektedir [25]. Bu yöntem Lloyd algoritması olarak bilinmektedir. Bu bir lokal arama algoritmasıdır ve n tane veri noktasını k tane kümeye şu şekilde sınıflandırır: k tane başlangıç küme merkezi belirlenir ve her veri noktası kendisine en yakın merkeze atanır. Daha sonra yeni merkezler kendilerine atanan noktaların ortalaması olarak yeniden hesaplanır. Veri noktalarını atama ve merkezleri tekrar belirleme süreci algoritma kararlı hale gelene kadar tekrarlanır [26].

K ortalamalar algoritması Rd de n tane noktadan oluşan bir X kümesini k tane kümeye sınıflandırır. Başlangıçta Rd de k tane küme merkezi belirlenir. Daha sonra her veri noktası, merkezi kendisine en yakın olan kümeye atanır. Bir merkezin yeni pozisyonu kendisine atanan noktaların ortalaması olarak hesaplanmıştır.

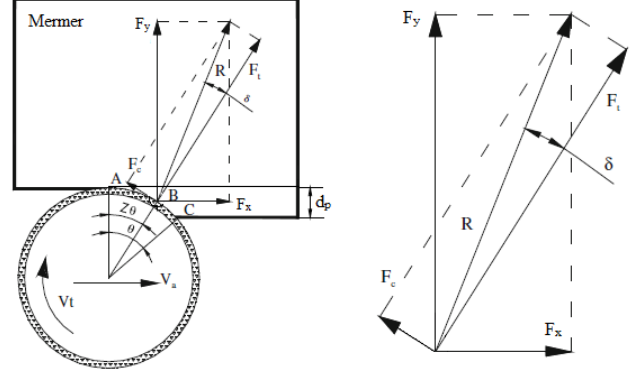
Algoritmanın adımları şu aşamalardan oluşmaktadır;

- K tane başlangıç merkezi  $c_1, c_2, \dots, c_k$  keyfi olarak seçilmiştir.
- Her bir  $1 \leq i \leq k$  için  $C_i$  kümesini  $C_i$  ye diğer merkezlerden daha yakın olan X deki noktaların kümesi olarak belirlenmiştir.
- Her bir  $1 \leq i \leq k$  için  $C_i$  'deki noktaların kütle merkezini (ortalamasını)  $c_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x$  ile hesaplayarak yeni merkezleri belirlenmiştir.
- 4  $C_i$  kümeleri ve  $C_i$  merkezleri değişmez duruma gelene kadar 2. ve 3. adımları tekrarla. Böylece X,  $C_1, C_2, \dots, C_k$  kümelerine sınıflanmıştır.

Deneylerde doğal taş örnekleri için kullanılan sabit parametreler kesici uç 6.0 mm çapı, devir hızı 10000 d/dk, dalış hızı 1000d/dk ve kesme genişliği 3.0 mm, değişken parametreler kesme derinliği 1.20, 1.60 ve 2.00 mm, ilerleme hızı 2000, 2500 ve 3000 mm/dk olarak alınmıştır.

Deneyisel olarak doğal taşların işlenmesi sırasında oluşan kuvvetlerin ( $F_x, F_y, F_c$  ve  $F_t$ ), kesme hızının ( $V_t$ )

ve ilerleme hızı ( $V_a$ ) vektörel olarak gösterimi Şekil 5'de açıklanmıştır.



Şekil 5. Kesme kuvvetlerinin vektörel görünümü

işleme parametrelerine göre  $F_x$  kesme kuvvetinin hesaplanması eşitlik 1'de verilmiştir.

$F_x$  kesme kuvveti eşitlik 1 ;

$$F_x = |F_{x1}| + |F_{x2}|$$

$F_x$ =Kesme kuvveti (N)

$F_{x1}$ = Mutlak ileri kesme kuvveti(N)

$F_{x2}$ = Mutlak geri kesme kuvveti(N)

$F_y$  kesme kuvveti eşitlik 2;

$$F_y = |F_{y1}| + |F_{y2}|$$

$F_y$ =Kesme kuvveti (N)

$F_{y1}$ = Mutlak ileri kesme kuvveti (N)

$F_{y2}$ = Mutlak geri kesme kuvveti (N)

R bileşke kuvveti,  $F_x$  ve  $F_y$  kesme kuvvetleri hesaplanması eşitlik 3;

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

R= Bileşke Kuvveti (N)

$F_x$ = Kesme Kuvveti (N)

$F_y$ = Kesme kuvveti (N)

R ve  $F_x$  arasındaki  $\beta$  açısı eşitlik 4;

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{F_y}{F_x} \right)$$

Kesici uç (d) ile mermer arasındaki  $\theta$  temas açısı eşitlik 5;

$$\theta = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2dp}{d} \right)$$

Teğetsel kuvveti  $F_c$  ve radyal kuvveti  $F_t$  bileşenleri ile elde edilen R değeri ile hesaplanması eşitlik 6 ve eşitlik 7;

$$F_c = R \sin \delta$$

$$F_t = R \cos \delta$$

$F_t$  ve  $F_c$  arasındaki  $\delta$  açısı eşitlik 8;

$$\delta = \beta - Z\theta$$

Z parametresi, kesici uçla örnek arasındaki temas AC yayı üzerindeki R bileşke kuvvetinin uygulama noktasının konumuna bağlıdır.

Z parametresi eşitlik 9;

$$Z = \frac{AB}{AC}$$

İşleme parametrelerine bağlı olarak kesme hızının hesaplanması eşitlik 10'de gösterilmiştir.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

$V_c$  = Kesme hızı (m/dk)

n = Devir hızı (d/dk)

D = Kesici çapı (mm)

Teğetsel kuvvete ve kesme hızına bağlı olarak spesifik kesme enerjisi eşitlik 11 'de gösterilmiştir.

$$S_k = \frac{F_c \times V_t}{V_a \times dp \times b}$$

$F_c$  = Teğetsel kesme kuvveti (N)

$V_t$  = Kesme hızı (m/dk)

$V_a$  = İlerleme hızı (mm/dk)

$dp$  = Kesme derinliği (mm)

b = Kesme genişliği (mm)

Talaş hacmi eşitlik 12'de gösterilmiştir.

$$Q_w = b \times l \times d_{b(1,2,3)}$$

$Q_w$  = Talaş hacmi (mm<sup>3</sup>)

b = Numunenin boyu (mm)

l = Numunenin eni (mm)

$d_{p(1,2,3)}$  = Kesme derinliği (mm)

Spesifik enerji eşitlik 13'de gösterilmiştir.

$$S_e = \frac{\sum_{j=1}^n x \sum_{j=1}^n t_j}{n Q_{w(1,2,3)}}$$

$S_e$  = Spesifik enerji (J/mm<sup>3</sup>)

P = Güç tüketimi (W)

t = Toplam zaman (s)

$Q_w$  = Talaş hacmi (mm<sup>3</sup>)

### 3. Bulgular ve Tartışma

Deneylerde 17 adet doğal taş işleme parametreleri ile kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerjisi ve spesifik enerji arasındaki ilişki istatistiksel (ANOVA) analiz edilmiştir. Deneylerde örnekler için işleme süresine göre kesme kuvveti ve güç tüketimi (W) ölçümlerinden 4000, toplamda 1.224.000 elde edilmiştir.

Doğal taş örneklerinde kesme kuvvetleri bakımından  $p < 0.001$  anlamlılık düzeyinde işleme parametreleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğal taşların işlenebilirliğinde işleme parametreleri etkili olduğu görülmüştür (Tablo 3).

Tablo 3. Doğal taşların kesme kuvvetlerinin istatistiksel (ANOVA) analizi

N	Kesme Derinliği (mm)		Ortalama Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlık Düzeyi	95% Güven Aralığı		
	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)				Alt Limit	Üst Limit	
F <sub>c</sub>	1,20	1,00	-3,8214*	,27897	<0,001	-4,4787	-3,1642	
		2,00	-7,4694*	,27897	<0,001	-8,1267	-6,8122	
	1,60	1,20	3,8214*	,27897	<0,001	3,1642	4,4787	
		2,00	-3,6480*	,27897	<0,001	-4,3052	-2,9907	
	2,00	1,20	7,4694*	,27897	<0,001	6,8122	8,1267	
		1,60	3,6480*	,27897	<0,001	2,9907	4,3052	
	F <sub>t</sub>	1,20	1,00	-3,7896*	,27690	<0,001	-4,4420	-3,1372
			2,00	-7,5726*	,27690	<0,001	-8,2250	-6,9202
1,60		1,20	3,7896*	,27690	<0,001	3,1372	4,4420	
		2,00	-3,7830*	,27690	<0,001	-4,4354	-3,1306	
2,00		1,20	7,5726*	,27690	<0,001	6,9202	8,2250	
		1,60	3,7830*	,27690	<0,001	3,1306	4,4354	
<b>İlerleme Hızı (mm/dk)</b>								
F <sub>c</sub>		2000	2500	-2,2064*	,27897	<0,001	-2,8637	-1,5491
	3000		-3,7687*	,27897	<0,001	-4,4259	-3,1114	
	2500	2000	2,2064*	,27897	<0,001	1,5491	2,8637	
		3000	-1,5623*	,27897	<0,001	-2,2195	-,9050	
	3000	2000	3,7687*	,27897	<0,001	3,1114	4,4259	
		2500	1,5623*	,27897	<0,001	,9050	2,2195	
	F <sub>t</sub>	2000	2500	-2,1094*	,27690	<0,001	-2,7618	-1,4570
			3000	-3,3713*	,27690	<0,001	-4,0236	-2,7189
2500		2000	2,1094*	,27690	<0,001	1,4570	2,7618	
		3000	-1,2619*	,27690	<0,001	-1,9142	-,6095	
3000		2000	3,3713*	,27690	<0,001	2,7189	4,0236	
		2500	1,2619*	,27690	<0,001	,6095	1,9142	

Doğal taş örneklerinde spesifik kesme enerji değerleri bakımından  $p < 0.001$  anlamlılık düzeyinde işleme parametreleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğal taşların işlenebilirliğinde işleme parametreleri etkili olduğu görülmüştür (Tablo 4).

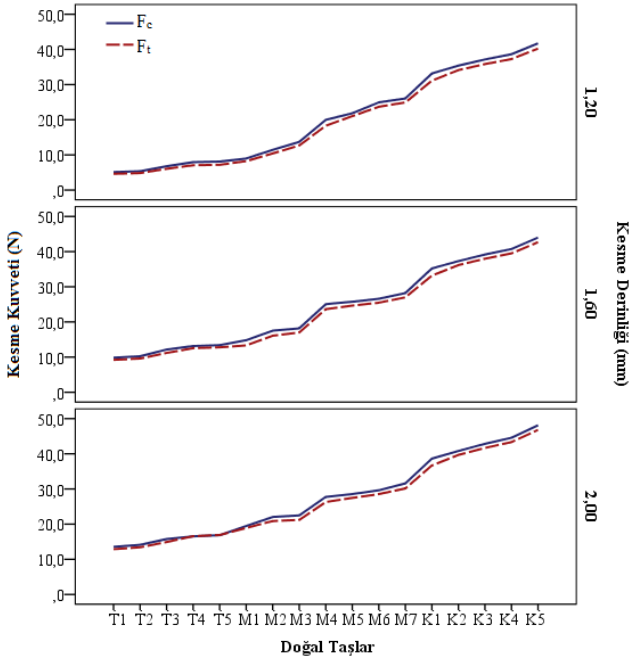
**Tablo 4.** Doğal taşların spesifik kesme enerjilerinin istatistiksel (ANOVA) analizi

$S_k$ (J/mm <sup>3</sup> ) 10 <sup>3</sup> Bağımlı Değişken	Kesme Derinliği (mm)		Ortalama Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)				Alt Limit	Üst Limit
$S_k$	1,20	1,00	7,2898*	,70556	<0,001	5,6275	8,9521
		2,00	10,9091*	,70556	<0,001	9,2468	12,5714
	1,60	1,20	-7,2898*	,70556	<0,001	-8,9521	-5,6275
		2,00	3,6193*	,70556	<0,001	1,9569	5,2816
	2,00	1,20	-10,9091*	,70556	<0,001	-12,5714	-9,2468
		1,60	-3,6193*	,70556	<0,001	-5,2816	-1,9569
<b>İlerleme Hızı (mm/dk)</b>							
$S_k$	2000	2500	4,5448*	,70556	<0,001	2,8825	6,2071
		3000	9,5051*	,70556	<0,001	7,8427	11,1674
	2500	2000	-4,5448*	,70556	<0,001	-6,2071	-2,8825
		3000	4,9603*	,70556	<0,001	3,2980	6,6226
	3000	2000	-9,5051*	,70556	<0,001	-11,1674	-7,8427
		2500	-4,9603*	,70556	<0,001	-6,6226	-3,2980

Doğal taş örneklerinde spesifik enerji değerleri bakımından  $p < 0.001$  anlamlılık düzeyinde işleme parametreleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğal taşların işlenebilirliğinde işleme parametreleri etkili olduğu görülmüştür (Tablo 5).

**Tablo 5.** Doğal taşların spesifik enerjilerinin istatistiksel (ANOVA) analizi

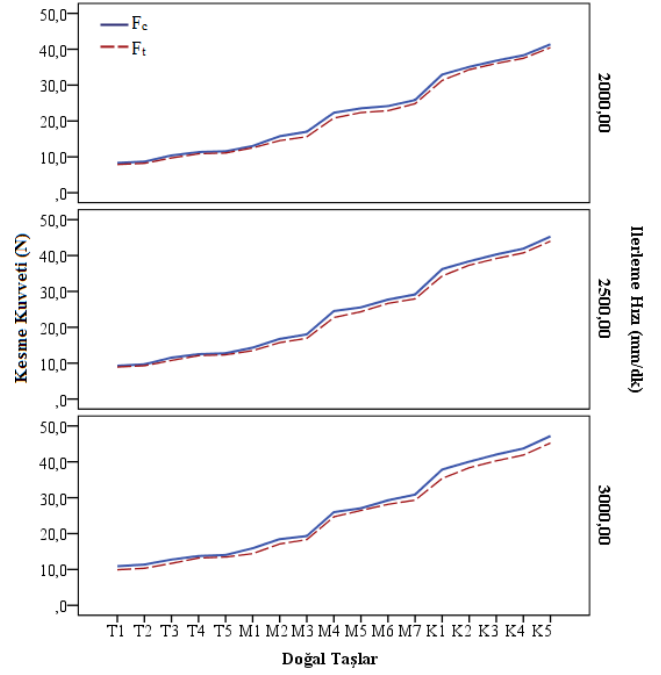
$S_e$ (J/mm <sup>3</sup> ) Bağımlı Değişken	Kesme Derinliği (mm)		Ortalama Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)				Alt Limit	Üst Limit
$S_e$	1,20	1,00	1,4306*	,02501	<0,001	1,3717	1,4895
		2,00	2,2882*	,02501	<0,001	2,2293	2,3471
	1,60	1,20	-1,4306*	,02501	<0,001	-1,4895	-1,3717
		2,00	,8576*	,02501	<0,001	,7987	,9165
	2,00	1,20	-2,2882*	,02501	<0,001	-2,3471	-2,2293
		1,60	-,8576*	,02501	<0,001	-,9165	-,7987
<b>İlerleme Hızı (mm/dk)</b>							
$S_e$	2000	2500	,6738*	,02501	<0,001	,6149	,7327
		3000	1,1899*	,02501	<0,001	1,1310	1,2488
	2500	2000	-,6738*	,02501	<0,001	-,7327	-,6149
		3000	,5160*	,02501	<0,001	,4571	,5749
	3000	2000	-1,1899*	,02501	<0,001	-1,2488	-1,1310
		2500	-,5160*	,02501	<0,001	-,5749	-,4571



Şekil 6. Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde kesme derinliğine göre kesme kuvveti değerleri

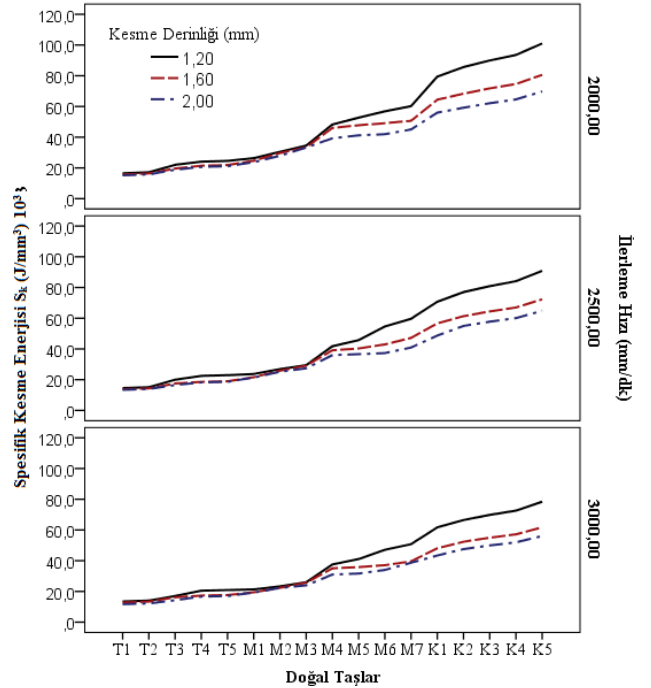
Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde farklı kesme derinliğinde kesme kuvveti değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Doğal taşların farklı kesme derinliklerine göre Fc kesme kuvvetinin Ft kesme kuvveti değerlerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. T1, T2 ve T3 travertenlerde 1,2 mm kesme derinliğinde kesme kuvvet değerleri daha düşükken, K4 ve K5 kireçtaşlarında 2.0 mm kesme derinliğinde kesme kuvvet değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir.

Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde farklı ilerleme hızında kesme kuvveti değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Doğal taşların ilerleme hızına göre Fc kesme kuvvetinin Ft kesme kuvveti değerlerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. T1, T2 ve T3 travertenlerde 2000 mm/dk ilerleme hızında kesme kuvveti değerleri daha düşükken, K4 ve K5 kireçtaşlarında 3000 mm/dk ilerleme hızında kesme kuvveti değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde ilerleme hızına göre kesme kuvveti değerleri

Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde farklı kesme derinliği ve ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri Şekil 8'de verilmiştir.

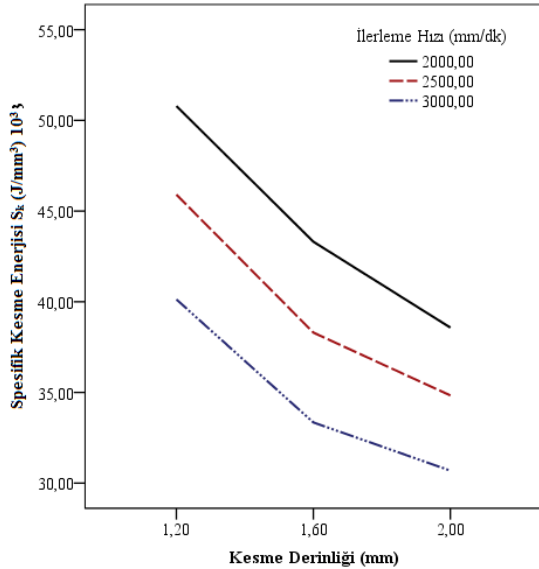


Şekil 8. Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde spesifik kesme enerji değerleri

Doğal taşların 1,2 mm kesme derinliği 1.6 mm ve 2.0 mm'ye göre spesifik kesme enerji değerleri daha yüksek, 3000 mm/dk ilerleme hızında 2500 ve 2000 mm/dk ilerleme hızına göre spesifik kesme enerji değerleri daha düşük olduğu tespit edilmiştir. T1, T2

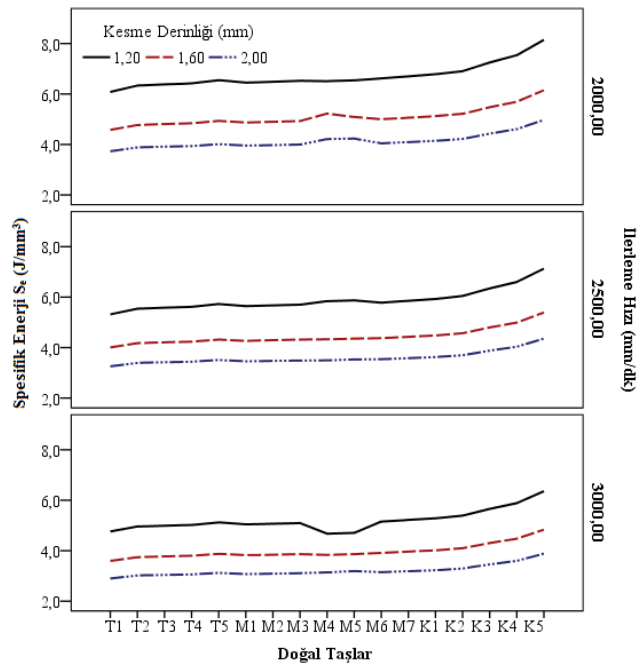


ve T3 travertenlerde 2000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri daha düşükken, K4 ve K5 kireçtaşlarında 3000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir. İşlenebilirlik deneylerinde farklı kesme derinliği ve ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. İşlenebilirlik deneylerinde kesme derinliği ve ilerleme hızına göre spesifik kesme enerji değerleri

Spesifik kesme enerjisi değerlerine göre 2.0 mm kesme derinliği ve 3000 mm/dk ilerleme hızı tercih edilmesi ön görülmüştür. Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde farklı kesme derinliği ve ilerleme hızında spesifik enerji değerleri Şekil 10'da verilmiştir.

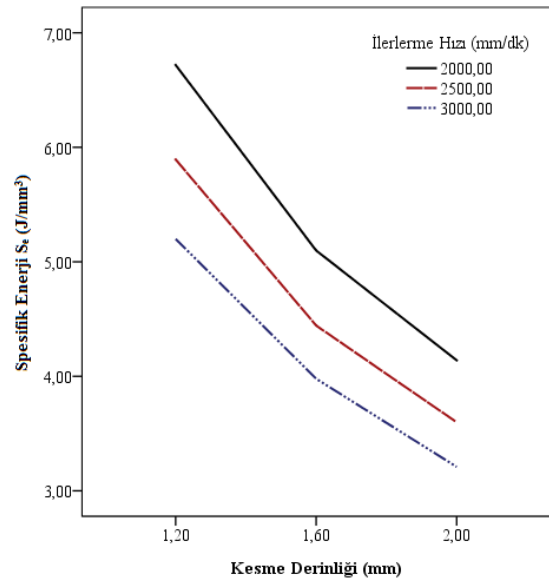


Tablo 8. Doğal taşların K ortalamalar kümeleme yöntemi ile belirlenen işlenebilirlik indeksi

Şekil 10. Doğal taşlarda işlenebilirlik deneylerinde spesifik enerji değerleri

Doğal taşların 1,2 mm kesme derinliği 1.6 mm ve 2.0 mm'ye göre spesifik enerji değerleri daha yüksek, 3000 mm/dk ilerleme hızında 2500 ve 2000 mm/dk ilerleme hızına göre spesifik enerji değerleri daha düşük olduğu tespit edilmiştir. T1, T2 ve T3 travertenlerde 2000 mm/dk ilerleme hızında spesifik enerji değerleri daha düşükken, K4 ve K5 kireçtaşlarında 3000 mm/dk ilerleme hızında spesifik enerji değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir. İşlenebilirlik deneylerinde farklı kesme derinliği ve ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri Şekil 11'de verilmiştir.

Spesifik enerjisi değerlerine göre 2.0 mm kesme derinliği ve 3000 mm/dk ilerleme hızı tercih edilmesi ön görülmüştür.



Şekil 11. İşlenebilirlik deneylerinde kesme derinliği ve ilerleme hızına göre spesifik kesme enerji değerleri

Bağımlı Değişken	Kod	İşlenebilirlik İndeksi Aralığı Fc, Ft (N)	İşlenebilirlik Derecesi
Fc	C1	< 12.0	İyi
	C2	12.0-25.0	Orta
	C3	25.0-40.0	Zayıf
	C4	> 0.40	Çok Zayıf
Ft	T1	< 11.0	İyi
	T2	11.0-24.0	Orta
	T3	24.0-39.0	Zayıf
	T4	> 39.0	Çok Zayıf
Bağımlı Değişken	Kod	İşlenebilirlik İndeksi Aralığı Se (J/mm3)	İşlenebilirlik Derecesi
Se	E1	< 3.75	İyi
	E2	3.75-5.15	Orta
	E3	5.15-6.60	Zayıf
	E4	> 5.60	Çok Zayıf
Bağımlı Değişken	Kod	İşlenebilirlik İndeksi Aralığı Sk (J/mm3) 103	İşlenebilirlik Derecesi
Sk	K1	< 21.0	İyi
	K2	21.0-48.0	Orta
	K3	48.0-75.0	Zayıf
	K4	> 75.0	Çok Zayıf

İşlenebilirlik deneylerinde kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerji ve spesifik enerji değerleri kullanılarak K ortalamalar kümeleme yöntemi ile 4 küme değeri ve işlenebilirlik indeksi belirlenmiştir. Doğal taş numunelerinde kesme kuvvetleri, spesifik kesme enerji ve spesifik enerji değerlerine göre belirlenen işlenebilirlik indeksi aralığı ve derecesi Tablo 8'de verilmiştir.

Doğal taşların K ortalama kümeleme analizi ile belirlenen işlenebilirlik derecesine göre sınıflandırması yapılmıştır. Spesifik enerjisine göre işlenebilirlik indeksi aralığı 2.0 mm kesme derinliğinde ve 3000 mm/dk ilerleme hızında doğal taş örnekleri 3.75-5.15 J/mm<sup>3</sup> arasında olduğu için E2 sınıfı içinde yer almaktadır. E2 sınıflandırmasında yer alan travertenlerin spesifik enerjisine göre işlenebilirlik derecesi orta olduğu tespit edilmiştir. Doğal taş örnekleri 1.6 mm kesme derinliğinde ve 2500 mm/dk ilerleme hızında spesifik enerjisine değerleri 5.15-6.60 J/mm<sup>3</sup> arasında olduğu için E3 sınıfı içinde yer almaktadır. E3 sınıfında yer alan doğal taşların spesifik enerjisine göre işlenebilirlik derecesi zayıf düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Doğal taş örnekleri 1.2 mm kesme derinliğinde ve 2000, 2500 mm/dk ilerleme hızında spesifik enerjisine değerleri 6.60 J/mm<sup>3</sup>'den büyük olduğu için E4 sınıfı içinde yer almaktadır. E4 sınıfında yer alan doğal taşların spesifik enerjisine göre işlenebilirlik derecesi çok zayıf düzeyde olduğu tespit edilmiştir. E4 sınıfında yer alan doğal taşların spesifik enerjisine göre işlenebilirlik derecesi çok zayıf düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik indeksi aralığı traverten örnekleri 21 J/mm<sup>3</sup>'den küçük olduğu için K1 sınıfı içinde yer almaktadır. K1 sınıflandırmasında yer alan travertenlerin spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik derecesi iyi olduğu tespit edilmiştir. Mermer örnekleri 2.0 mm kesme derinliğinde spesifik kesme enerjisine değerleri 21-48 J/mm<sup>3</sup> arasında olduğu için K2 sınıfı içinde yer almaktadır. K2 sınıfında yer alan mermerlerin spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik derecesi orta düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Kireçtaşı örnekleri 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliğinde spesifik kesme enerjisine değerleri 48-75 J/mm<sup>3</sup> arasında olduğu için K3 sınıfı içinde yer almaktadır. K3 sınıfında yer alan kireçtaşların spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik derecesi zayıf düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Kireçtaşı örnekleri 1.2 mm kesme derinliğinde ve 2000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerjisine değerleri 75 J/mm<sup>3</sup>'den yüksek olduğu için K4 sınıfı içinde yer almaktadır. K4 sınıfında yer alan kireçtaşların spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik derecesi çok zayıf düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Doğal taşların spesifik kesme enerjisi değerleri istatistiksel analiz edilerek, K ortalamalar kümeleme yöntemi ile işlenebilirlik indeksi belirlenmiştir. Bu çalışmadaki doğal taşlar, belirlenen istatistiksel analizlere göre spesifik kesme enerjisi değerleri dikkate alınarak işlenebilirlik indeksine göre sınıflandırılmıştır. İstatistiksel analiz sonucunda,

doğal taşların işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızının spesifik kesme enerjisi değerlerini anlamlı ölçüde etkilediği görülmüştür. Spesifik kesme enerji değerleri 1.2 mm kesme derinliği ve 2000 mm/dk ilerleme hızında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Spesifik kesme enerji ve spesifik enerji miktarının en yüksek olduğu durumlarda CNC makinesinin güç tüketiminin arttığı, zorlandığı ve kesici uç ömrünün azaldığı görülmektedir. Kesme derinliği arttıkça spesifik kesme enerji değerleri azalmakta kesme verimliliği artmaktadır. Bu nedenle fiziksel ve mekanik özelliklerine göre daha sert ve dayanıklı olan doğal taşlarda 1.2 mm kesme derinliğinde spesifik kesme enerji önemli ölçüde artmıştır. Özellikle kireçtaşı örnekleri 1.2 ve 1.6 mm kesme derinliği, 2000 ve 2500 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerjisi değerleri 48-75 J/mm<sup>3</sup> arasında olduğu için spesifik kesme enerjisine göre işlenebilirlik derecesi zayıf düzeyde olduğu için 2.0 mm kesme derinliği ve 3000 mm/dk ilerleme hızı tercih edilmelidir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Zafer Kalkınma Ajansı Sosyal Kalkınma Mali Destek Programları (proje numarası TR33/12/SKMDP/0104) tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] I. Karakurt, G. Aydın, and K. Aydiner. "Experimental and statistical analysis of cutting force acting on diamond sawblade in sawing of granitic rocks," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227(2), pp. 286-300, 2013.
- [2] E. Yilmazkaya, and Y. Ozcelik. "The effects of operational parameters on a mono-wire cutting system: efficiency in marble processing," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 49(2), pp. 523-539, 2016.
- [3] S.N. Almasi, R. Bagherpour, R. Mikaeil and Y. Ozcelik. "Developing a new rock classification based on the abrasiveness, hardness, and toughness of rocks and PA for the prediction of hard dimension stone sawability in quarrying," *Geosystem Engineering*, pp. 1-16. 2017.
- [4] M. Yurdakul and H. Akdas. "Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 53, pp. 38-44, 2012.
- [5] S. Turchetta and W. Polini. "Cutting force in stone lapping," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 57 (5-8), pp. 533-539, 2011.
- [6] G. Gelfusa and S. Turchetta. "Cutting force and tool wear of single diamond-coated bead," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72 (5-8), pp. 1063-1072, 2014.
- [7] H. Akdas and M. Yurdakul. "Analysis of the industrial cutting process of natural building stones: evaluation of electric power consumption," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 42(4), pp. 931-941, 2014.
- [8] M. Yurdakul, K. Gopalakrishnan and H. Akdas. "Prediction of specific cutting energy in natural stone cutting processes using the neuro-fuzzy methodology," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 67, pp. 127-135, 2014.
- [9] G. Aydın, I. Karakurt and K. Aydiner. "Development of predictive models for the specific energy of circular diamond sawblades in the sawing of granitic rocks," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.46, pp. 767-783, 2013.
- [10] S. Turchetta, L. Sorrentino and C. Bellini. "A method to optimize the diamond wire cutting process," *Diamond and Related Materials*, vol.71, pp. 90-97, 2017.
- [11] G. Gelfusa and S. Turchetta. "Cutting force and tool wear of single diamond-coated bead," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.72 (5-8), pp. 1063-1072, 2014.
- [12] S. Turchetta, W. Polini, G. Gelfusa and E. Venafro. "A new sawing machine by diamond wire," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 70(1-4), pp. 73-78, 2014.
- [13] Q. Sun, J. Zhang, Z. Wang, H. Zhang and J. Fang. "Segment wear characteristics of diamond frame saw when cutting different granite types," *Diamond and Related Materials*, vol..68, pp. 143-151, 2016.
- [14] H.K. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann and J. Asche. "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications," *Diamond and Related Materials*, vol.11(3), pp. 736-741, 2002.
- [15] B. Bulut, O. Tazegul, M. Baydogan and E.S. Kayali. "The comparison of the sintering methods for diamond cutting tools," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 76(1), pp. 30-35, 2016.
- [16] J. Konstanty. "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds," *Journal of materials processing technology*, vol.123(1), pp. 146-154, 2002.
- [17] Polini W. and S. Turchetta. 2004. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44(11):1189-1196.
- [18] M. Cevindik. "Üç eksenli CNC ile mermer işlemede elektrik enerji tüketimine etki eden parametreler," Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2009.

- [19] G., Sarıışık and E. Oyman, "Mermer atıklarının değerlendirilmesinde bilgisayar kontrollü doğal taş işleme makinaları (CNC) kullanımı ile yeni ürün geliştirme, mermer artıklarının değerlendirilmesi ve çevresel etkilerinin azaltılması," *1. Mermer Artıklarının Değerlendirilmesi ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması Sempozyumu*, 16-17 Ekim, Diyarbakır, pp. 305-314, 2009.
- [20] G., Sarıışık and E. Özkan, "Bilgisayar kontrollü makineler (CNC) ile doğal taş artıklarının işlenmesi ve modellenmesi," *7. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, 3-4 Mart, İstanbul, pp. 367-375, 2015.
- [21] S. Turchetta. "Cutting force and diamond tool wear in stone machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 61(5-8), pp. 441-448, 2012.
- [22] G. Sarıışık and E. Özkan, "Mermerlerin CNC Makinesi ile İşlenmesinde Kesme Kuvvetleri ve Spesifik Kesme Enerjisinin İstatistiksel Analizi," *Journal of Science and Engineering*, vol. 19(55), 2017.
- [23] G. Sarıışık and E. Özkan. "Bilgisayar Kontrollü Makine (CNC) ile Mermerlerin İşlenebilirliğinde Kesme Kuvveti ve Spesifik Enerjinin Belirlenmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* vol. 16, pp. 420-430, 2016.
- [24] G. Sarıışık and E. Özkan. "Effects of natural rock properties on cutting forces, specific energy and specific cutting energy by four-axis machine," *Arabian Journal of Geosciences* vol.11(5), pp. 84, 2018.
- [25] J.F.J. Hair, W.C. Black, B.J. Babin and R.E. "Anderson. Multivariate Data Analysis Seventh Edition Prentice Hall," 2010.
- [26] A. Vattani. "K-means requires exponentially many iterations even in the plane," *Discrete & Computational Geometry*, vol. 45(4), pp. 596-616, 2011.