Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi
Fen ve Mühendislik Dergisi
Cilt 19, Sayı 55 Ocak 2017

Dokuz Eylul University-Faculty of Engineering
Journal of Science and Engineering
Volume 19, Issue 55 January 2017

DOI: 10.21205/deufmd. *2017195514*

Mermerlerin CNC Makinesi ile İşlenmesinde Kesme Kuvvetleri ve Spesifik Kesme Enerjisinin İstatistiksel Analizi

Gencay SARIIŞIK*[1], Erkan ÖZKAN[2]

[1] Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06300, Şanlıurfa
[2] Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar

(Alınış / Received: 20.05.2016, Kabul / Accepted: 28.11.2016,
Online Yayınlanma / Published Online: 09.01.2017)

Anahtar Kelimeler
Mermerler,
CNC Makinesi,
Kesme Kuvvetleri,
Spesifik Kesme Enerjisi,
Fiziko-Mekanik Özellikler

Özet: Bu çalışmada, mermerlerin bilgisayar kontrollü makine (CNC) ile işlenmesinde kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, 7 tür mermer, 6.0 mm çapında parmak frezeli kesici uç, 1.2, 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliği, 2000, 2500 ve 3000 mm/dk ilerleme hızı parametreleri seçilmiştir. CNC makinesi ile yapılan işlenebilirlik deneylerinde kesme derinliği ve ilerleme hızına göre teğetsel kesme kuvveti (F_c), radyal kesme kuvveti (F_t) ve spesifik kesme enerji değerlerinin istatistiksel analizi (ANOVA) yapılmıştır. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisine olan etkileri doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Mermerlerin kesme kuvvet değerleri ve spesifik kesme enerji değerleri bakımından $p<0.001$ anlamlılık düzeyinde kesme derinliği ve ilerleme hızı arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre mermerlerin işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızı etkili olduğu görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla CNC makinelerinin verimliliğinin önceden tahmini için mermerlerin fiziko-mekanik özellikleri ve spesifik kesme enerjiye bağlı olarak regresyon denklemleri geliştirilmiştir.

Statistical Analysis of the Cutting Forces And Specific Cutting Energy with the Processing of Marbles by CNC Machine

Keywords
Marbles,
CNC Machine,
Cutting Forces,
Specific Cutting Energy,
Physico-Mechanical

Abstract: In the study, statistical analysis of the cutting forces and specific cutting energy with the pocessing of marbles by computer numerical controlled (CNC) machine has been performed. In test study, 7 type marble, 6.0 mm diameter end mill cutting tool with external lines and linear processing type, 1.2, 1.6 and 2.0 mm depth of cut and 2000, 2500 and 3000 mm/min feed speed parameters were selected. The effects of depth of cut and feed

Properties speed of processing equipment of CNC Machine on the processability of marbles were diagnosed cutting force (F_c), radial cutting force (F_t), and specific cutting energy values were analyzed statistically. In terms of cutting forces 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 marbles were depth of cut and feed speed. Accordingly, the processability of marbles processing type, depth of cut and feed speed was found that affected. With the data obtained from the tests, regression equations were developed in consideration of the physico-mechanical properties of marbles and the specific cutting energy equation for the prediction of the efficiency of CNC machines.

*Sorumlu Yazar: gsariisik@gmail.com

1. Giriş

Bilgisayar kontrollü makine (CNC), bilgisayar destekli imalat (CAM) programında tasarımı yapılan ürünün sayı, harf ve semboller ile tanımlanan sayısal kontrol (NC) kodlara verilen mantıksal işlem sırasına göre malzemeleri işleyen elektro mekanik sistemlerdir. Günümüzde, CNC makinesi ile üç boyutlu doğal taş tasarımları yüksek doğruluk ve hassasiyette seri olarak işlenebilmektedir [1-3].

Literatürde kayaçların fiziko-mekanik özelliklerine bağlı olarak dairesel testerelerde oluşan kesme kuvveti, spesifik enerji ve soketlerin modellenmesi [4-23], teorik talaş geometrilerinin tanımlanması [24], teğetsel kesme kuvveti ile talaş kalınlığı arasındaki bağıntılar, spesifik kesme enerjisinin belirlenmesi ve güç tüketimi [25], takım aşınması üzerine işleme parametrelerinin etkisi [26], elmas kesici takımlarla doğal taş kesme üzerine bir modelleme[27, 28] ve tarama mikroskobu altında talaş örneklerinin spesifik öğütme enerjisi ile ilişkilendirilmesi [29] konularında çalışmalar yapılmıştır. Doğal taş sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlayan karbür kaplı parmak freze uçlar ile kayaçların CNC makinesinde işlenebilirliğini etkileyen parametreler üzerine yapılan çalışmalar oldukça az ve kısıtlıdır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda içten soğutmalı kesici uçlar kullanarak, daha düşük devir hızı ve ilerleme hızında kesme kuvvetleri, spesifik enerji ve elmas kesici uçların aşınmaları belirlenmiştir [30,31].

Araştırmacılar tarafından bilgisayar kontrollü makine (CNC) ile karbür esaslı frezeli kesici uç takımları kullanılarak, mermerlerde işleme türü, kesme derinliği ve ilerleme hızı parametreleri seçilerek, Fz, Fc ve Ft kuvvet ve spesifik enerji değerleri istatistiksel olarak analizi yapılmıştır [32]. Bu çalışmada, farklı olarak mermerlerin CNC makinesinde işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjinin istatistiksel analizi ve kesme parametreleri ile fiziko-mekanik özellikler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel çalışmada kullanılan mermerler

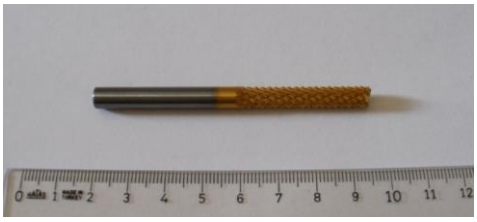
Deneysel çalışmalar için Afyon ilinde CNC makinesi ile doğal taş işleyen fabrikalarda yaygın olarak kullanılan metamorfik kökenli kayaçlar (mermer) seçilmiştir. Deneysel numunelerin boyutları, adedi ve yüzey özelliği Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan mermerlerin özellikleri

Mermer Ticari Adları	Kod	Boyut (mm)	Adet	Yüzey
Afyon Beyaz	M1			
Afyon Şeker	M2			
Afyon Gri	M3	300 × 300 × 30	15	Cilalı
Kütahya Siyahı	M4			
Uşak Beyazı	M5			
Afyon Menekşe	M6			
Afyon Kaplanpostu	M7			

2.2. Çalışmada kullanılan kesici uç takımı

Çalışmada CNC makinesi ile mermer işlenebilirlik deneyleri için karbür esaslı parmak frezeli kesici uç takımı kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneylerinde kesici uçların takım ömrü dikkate alınarak, 2 adet parmak frezeli kesici uç kullanılmıştır. Frezeli kesici uç takımın görünümü Şekil 1'de ve teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Freze kesici ucun görünümü

Tablo 2. Deneysel çalışmada kullanılan frezeli kesici ucun teknik özellikleri

Kod	MFR-6
Kesici Uç Çapı/d_1 (mm)	6
Sap Çapı/d_2 (mm)	6
Kesici Uzunluk/l_2 (mm)	25
Uç Uzunluk /l_1 (mm)	76
Kesici Ağız Sayısı (adet)	4
Helis Açısı (°)	25
Ağırlık (g)	26.15
Co (%)	12
WC (%)	88
Sertlik (HV30 ISO 3878)	1680
Yoğunluk (g/cm^3)	14.1
Kırılma Dayanımı (N/m^2)	3800
Ortalama Tane Boyutu (µm)	0.5

2.3. CNC makinesi

CNC makinesi malzemenin konulacağı çalışma tezgâhı, elektrik motoru, pnömatik veya hidrolik güç üniteleri, kontrol paneli ve yazılımdan oluşmaktadır. Deneysel çalışmaların yapıldığı CNC makinesi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bilgisayar kontrollü (CNC) makine

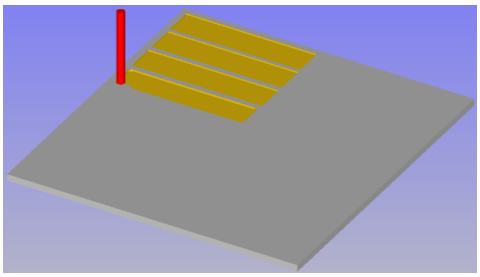
Bu çalışmada, Afyon Kocatepe Üniversitesi-Doğaltaş İşleme Laboratuvarında doğal taş sektörü için tasarlanmış olan Megatron Marka 4-Eksenli CNC makinesi kullanılmıştır. CNC makinesinin teknik özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. CNC makinesinin 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

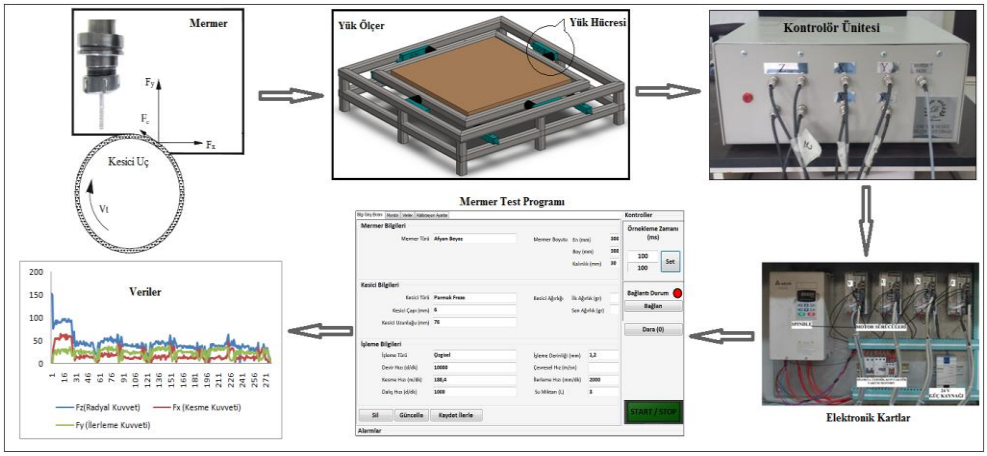
2.4. CNC makinesi ile işlenebilirlik deneyleri

CNC makinesinde kesme derinliği ve ilerleme hızı parametrelerine göre mermerlerin işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan mermerler üzerinde yapılacak işlemler ve kesim parametrelerinin belirlenmesinde Alpha CAM çizim programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada işlenecek numunenin 120×25 mm boyutundaki 18 adet dikdörtgenin tasarımı üç boyutlu olarak çizim programında oluşturulmuştur (Şekil 3). Deneylerde kesici uç takımı ile mermerlerin 120×25 mm boyutunda dikdörtgenin işleme süresi ortalama 40 s'dir. Tüm numunelerde toplam işleme süresi 84 dk olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Mermerlerin çizim programında modellenmesi

İşlenebilirlik deneylerinde CNC makinesinin tezgahına monte edilen güç ve yük ölçer test cihazı kullanılmıştır. Bu test cihazı ölçüm ünitesi, yük hücresi, kontrolör ünitesi ve Defne Lab Soft programından oluşmaktadır. Mermer numuneleri bu cihazın ölçüm ünitesine bağlama aparatları ile sıkıştırılmıştır. Test cihazında kuvvetlerin ölçümü için 4 tane Z ekseninde, 4 tanesi X ve Y ekseninde, toplam 8 adet yük hücresi bulunmaktadır. CNC makinesinden verilerin alınması için kullanılan üç yönlü yük ölçer ve güç analizörü bir kontrol ünitesine bağlıdır. Kontrol ünitesi bilgisayara bağlanarak bütün kontrol bilgisayardan yapılmaktadır. Makinenin otomasyon işlemi güç kontrol ünitesi, elektronik kartlar ve özel bir yazılım yardımı ile yapılmaktadır. Bilgi giriş ekranında mermer türü, boyutu, kesici bilgileri, işleme türü, devir hızı, kesme hızı, dalış hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, soğutma sıvısının debisi ve kesme genişliği gibi parametreler bilgisayar ortamında, bu özel yazılıma girilerek yapılmaktadır. Yük ölçer ve güç analizöründen elde edilen kesme kuvvetleri (N) ve güç tüketimi (W) verileri program ara yüzünden alınmaktadır. Şekil 4'de test düzeneğinin şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 4. Test düzeneğinin şematik görünümü

2.5. Deney parametreleri

Deneysel çalışmalarda işlenen mermerlerin için kullanılan CNC makinesi ile işleme test parametreleri Tablo 4'de verilmiştir. İşlenebilirlik deneylerinde bazı parametreler sabit tutulmuştur. Sabit parametreler; 6.0 mm kesici uç çapı, 1000 d/dk devir hızı, 1000d/dk dalış hızı ve 3.0 mm kesme genişliğidir.

Tablo 4. CNC makinesi ile işleme test parametreleri

İşleme Parametreleri	Değerler
Kesici Uç Çapı (mm)	6.0
Kesme Derinliği (mm)	1.20-1.60-2.00
Devir Hızı (d/dk)	10000
İlerleme Hızı (mm/dk)	2000-2500-3000
Dalış Hızı (d/dk)	1000
Kesme Hızı (m/dk)	188.4
Kesme Genişiliği (mm)	3.0

CNC makinesi ile işleme test parametrelerine bağlı olarak kesme hızının hesaplanması eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

V_c = Kesme hızı (m/dk)
n = Devir hızı (d/dk)
D = Kesici çapı (mm)

F_x kesme kuvveti eşitlik 2 ;

$$F_x = |F_{x1}| + |F_{x2}| \quad (2)$$

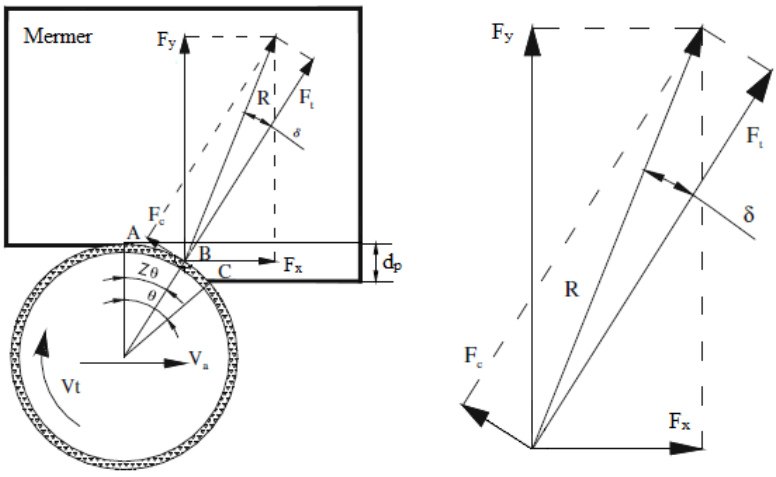
F_x=Kesme kuvveti (N)
F_{x1}= Mutlak ileri kesme kuvveti(N)
F_{x2}= Mutlak geri kesme kuvveti(N)

F_y kesme kuvveti eşitlik 3;

$$F_y = |F_{y1}| + |F_{y2}| \quad (3)$$

F_y=Kesme kuvveti (N)
F_{y1}= Mutlak ileri kesme kuvveti (N)
F_{y2}= Mutlak geri kesme kuvveti (N)

Deneysel olarak mermerlerin işlenmesi sırasında oluşan kuvvetlerin vektörel olarak gösterimi Şekil 5'de açıklanmıştır.



Şekil 5. İşleme sırasında oluşan kuvvetlerin vektörel gösterimi

R bileşke kuvveti, F_x ve F_y kesme kuvvetleri kullanarak, hesaplanması eşitlik 4;

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

R= Bileşke Kuvveti (N)
F_x= Kesme Kuvveti (N)
F_y= Kesme kuvveti (N)

R ve F_x arasındaki β açısı eşitlik 5;

$$\beta = tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (5)$$

Kesici uç (d) ile mermer arasındaki θ temas açısı eşitlik 6;

$$\theta = cos^{-1}\left(1 - \frac{2dp}{d}\right) \quad (6)$$

Kesme kuvvetinin teğetsel kuvveti F_c ve radyal kuvveti F_t bileşenleri, elde edilen R değeri ile hesaplanması eşitlik 7 ve eşitlik 8;

$$F_c = Rsin\delta \quad (7)$$

$$F_t = Rcos\delta \quad (8)$$

F_t ve F_c arasındaki δ açısı eşitlik 9;

$$\delta = \beta - Z\theta \quad (9)$$

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

Z parametresi eşitlik 10;

$$Z = \frac{AB}{AC} \quad (10)$$

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

$$S_k = \frac{F_c \times V_t}{V_a \times dp \times b} \quad (11)$$

F_c = Teğetsel kesme kuvveti (N)
V_t = Kesme hızı (m/dk)
V_a = İlerleme hızı (mm/dk)
d_p = Kesme derinliği (mm)
b = Kesme genişliği (mm)

2.6. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

CNC makinesi ile işlenebilirlik deneylerinde kullanılan mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuarında TS EN standartlarına uygun olarak yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Mermer Türü	BHA (kg/m³)	P (%)	SE (%)	KS	BD (MPa)	ED (MPa)	DD (MPa)	AD (cm³/50cm²)
M1	2690	0.42	0.96	131.14	59.85	9.03	24.00	37.09
M2	2700	0.38	0.88	135.76	62.16	9.28	25.00	36.35
M3	2705	0.36	0.75	137.89	64.85	9.46	26.00	35.73
M4	2710	0.35	0.71	141.52	66.85	9.86	27.00	34.87
M5	2715	0.33	0.68	143.78	68.75	9.98	28.00	34.05
M6	2720	0.32	0.66	145.78	70.45	10.12	29.00	33.85
M7	2730	0.28	0.52	155.45	77.04	10.94	31.00	31.85

BHA: Birim hacim ağırlık, kg/m³; P: Porozite, %; SE: Su emme, %; KS: Knoop sertlik, BD: Basınç dayanımı, MPa; ED: Eğilme dayanımı, MPa; DD: Darbe dayanımı, MPa; AD: Aşınma dayanımı, cm³/50cm²

3. Bulgular ve değerlendirmeler

3.1. Mermerlerin işlenebilirlilik deneylerinde kesme kuvvet değerlerinin analizi

İşlenebilirlilik deneylerinde kullanılan 7 mermer türü için, 3 kesme derinliği, 3 ilerleme hızı, 2 farklı kesme kuvvet ile ilişkisi varyans (ANOVA) yöntemi kullanarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada her bir mermer numunesinin işleme süresine göre kuvvet (N) ölçümlerinden 400 veri alınmıştır. Toplam (7 mermer türü × 3 kesme derinlik × 3 ilerleme hızı × 2 kesme kuvvet × 400 veri) 50400 veri kullanılmıştır. Mermer numunelerinde Fc ve Ft kesme kuvvet değerleri ile kesme derinliği ve ilerleme hızının $p<0.001$ anlamlılık düzeyinde etkili olduğu görülmüştür (Tablo 6).

Tablo 6. Mermerlerin kesme kuvvetlerinin kesme derinliği ve ilerleme hızına göre istatistiksel analizi

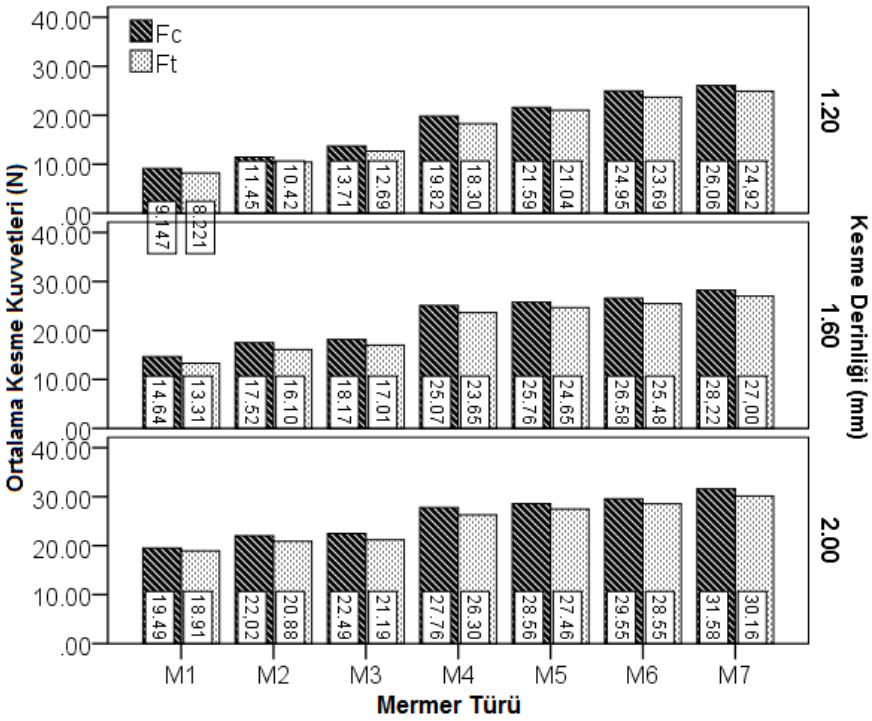
Kesme Kuvveti (N)	Kesme Derinliği (mm)		Ort. Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)				Alt Limit	Üst Limit
F_c	1.20	1.00	-4.1777	0.30700	<0.001	-4.9067	-3.4487
		2.00	-7.8195	0.30700	<0.001	-8.5486	-7.0905
	1.60	1.20	4.1777	0.30700	<0.001	3.4487	4.9067
		2.00	-3.6418	0.30700	<0.001	-4.3709	-2.9128
	2.00	1.20	7.8195	0.30700	<0.001	7.0905	8.5486
		1.60	3.6418	0.30700	<0.001	2.9128	4.3709
F_t	1.20	1.60	-3.9881	0.31846	<0.001	-4.7443	-3.2318
		2.00	-7.7388	0.31846	<0.001	-8.4951	-6.9825
	1.60	1.20	3.9881	0.31846	<0.001	3.2318	4.7443
		2.00	-3.7508	0.31846	<0.001	-4.5070	-2.9945
	2.00	1.20	7.7388	0.31846	<0.001	6.9825	8.4951
		1.60	3.7508	0.31846	<0.001	2.9945	4.5070
İlerleme Hızı (mm/dk)							
F_c	2000	2500	-2.0264	0.30700	<0.001	-2.7555	-1.2974
		3000	-3.5662	0.30700	<0.001	-4.2953	-2.8372
	2500	2000	2.0264	0.30700	<0.001	1.2974	2.7555
		3000	-1.5398	0.30700	<0.001	-2.2689	-0.8108
	3000	2000	3.5662	0.30700	<0.001	2.8372	4.2953
		2500	1.5398	0.30700	<0.001	0.8108	2.2689
F_t	2000	2500	-2.0397	0.31846	<0.001	-2.7959	-1.2834
		3000	-3.5558	0.31846	<0.001	-4.3120	-2.7995
	2500	2000	2.0397	0.31846	<0.001	1.2834	2.7959
		3000	-1.5161	0.31846	<0.001	-2.2724	-0.7599
	3000	2000	3.5558	0.31846	<0.001	2.7995	4.3120
		2500	1.5161	0.31846	<0.001	0.7599	2.2724

Mermerlerde kesme derinliği arttıkça mermerlerin işlenebilirliği sırası boyunca elde edilen ortalama F_c ve F_t kesme kuvvet değerlerinin arttığı Şekil 6'da gösterilmiştir. M1, M2 ve M3 mermerlerinin kesme kuvvet değerleri 1.2 mm kesme derinliğinde daha düşük değerler alırken, M6 ve M7 mermerlerinin kesme kuvvet değerleri 2.0 mm kesme derinliğinde daha yüksek değerler almaktadır.

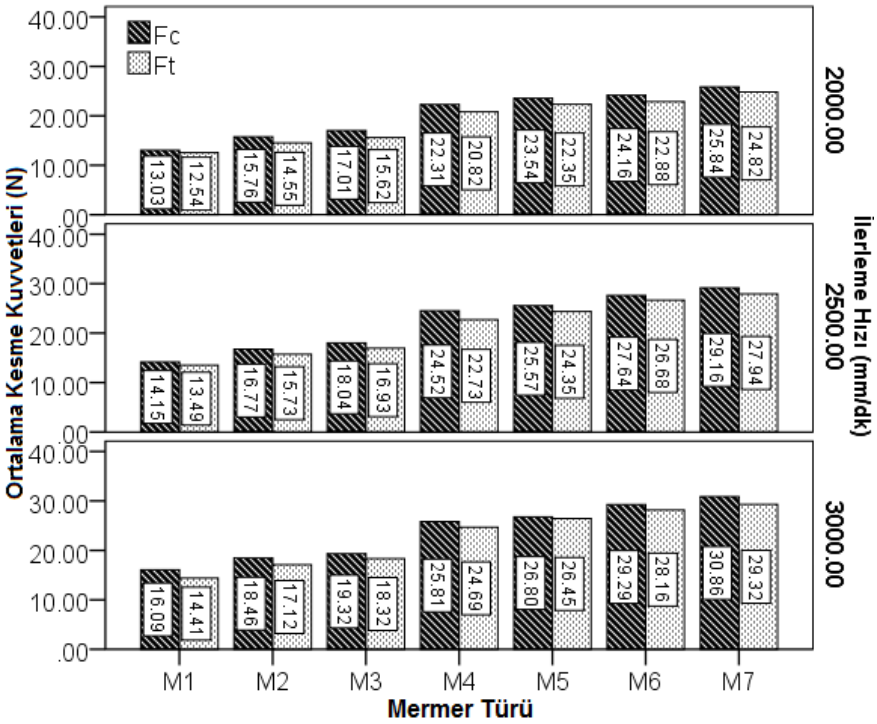
Şekil 7'de görüldüğü gibi mermerlerde ilerleme hızına arttıkça kesme kuvvet değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. M1, M2 ve M3 mermerlerinin kesme kuvvet değerleri 2000 mm/dk ilerleme hızında daha düşük değerler alırken, M6 ve M7 mermerlerinin kesme kuvvet değerleri 3000 mm/dk ilerleme hızında daha yüksek değerler almaktadır.

3.2. Mermerlerde spesifik kesme enerjisi analizi

İşlenebilirlilik deneylerinde kullanılan 7 mermer türü için, 3 kesme derinliği, 3 ilerleme hızı, spesifik kesme enerji ile ilişkisi varyans (ANOVA) yöntemi kullanarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada her bir mermer numunesinin işleme süresine göre güç tüketimi (W) ölçümlerinden 400 veri alınmıştır. Toplam (7 mermer türü × 3 kesme derinlik × 3 ilerleme hızı × 400 veri) 25200 veri kullanılmıştır. Mermer numunelerin spesifik kesme enerji değerleri bakımından $p<0,001$ anlamlılık düzeyinde işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızına etkili olduğu görülmüştür (Tablo 7).



Şekil 6. Mermerlerde kesme derinliğine göre kesme kuvvet değerleri



Şekil 7. Mermerlerde ilerleme hızına göre kesme kuvvet değerleri

Tablo 7. Mermerlerin spesifik kesme enerjilerinin kesme derinliği ve ilerleme hızına göre istatistiksel analizi

SKE (J/m^3)	Kesme Derinliği (mm)		Ort. Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
						Alt Limit	Üst Limit
Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken(I)	Bağımsız Değişken(J)					
S_k	1.20	1.00	1.6975	0.54093	<0.001	0.4129	2.9820
		2.00	3.0827	0.54093	<0.001	1.7982	4.3673
	1.60	1.20	-1.6975	0.54093	<0.001	-2.9820	-0.4129
		2.00	1.3853	0.54093	<0.001	0.1007	2.6698
	2.00	1.20	-3.0827	0.54093	<0.001	-4.3673	-1.7982
		1.60	-1.3853	0.54093	<0.001	-2.6698	-0.1007
İlerleme Hızı (mm/dk)							
S_k	2000	2500	-5.4645	0.54093	<0.001	-6.7490	-4.1799
		3000	-11.128	0.54093	<0.001	-12.412	-9.8436
	2500	2000	5.4645	0.54093	<0.001	4.1799	6.7490
		3000	-5.6637	0.54093	<0.001	-6.9482	-4.3791
	3000	2000	11.128	0.54093	<0.001	9.8436	12.4127
		2500	5.6637	0.54093	<0.001	4.3791	6.9482

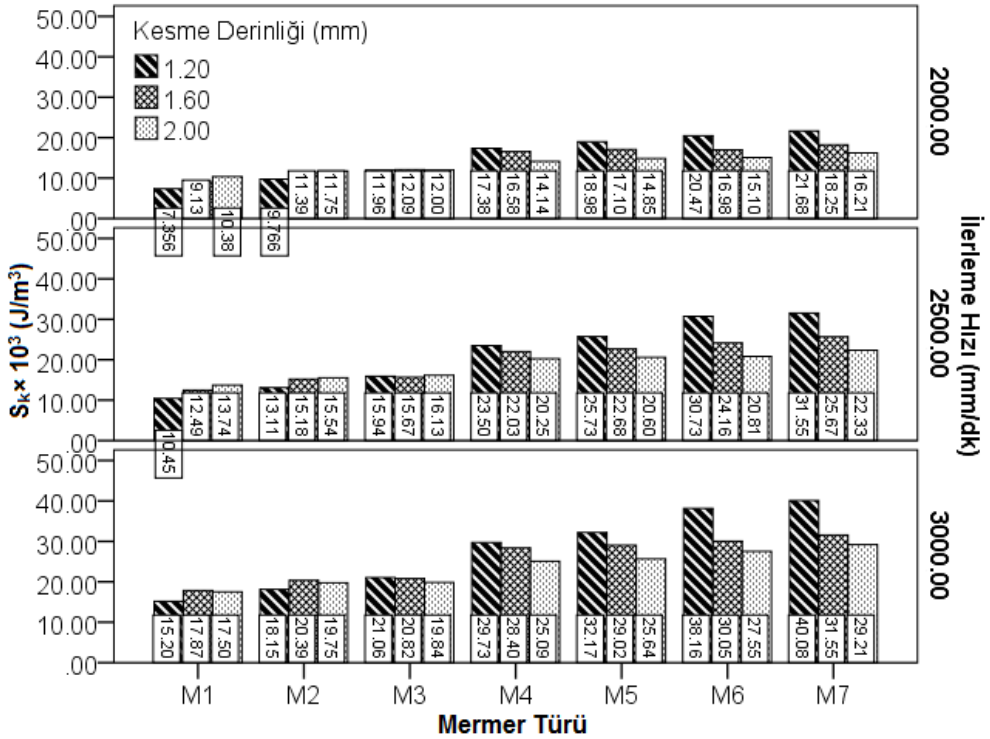
Mermerlerin 1,2 mm kesme derinliğinde spesifik kesme enerji değerlerinin 1.6 mm ve 2.0 mm'ye göre daha düşük olduğu, 3000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerlerinin 2500 ve 2000 mm/dk ilerleme hızına göre daha yüksek olduğu Şekil 8'de gösterilmiştir.

CNC'de kullanılan kesici ucun 2.0 mm kesme derinliğinde tüm mermerleri en uygun şekilde işlediği belirlenmiştir. M1, M2 ve M3 mermerlerinde 2000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri daha düşükken, M6 ve M7 mermerinde 3000 mm/dk ilerleme hızında spesifik kesme enerji değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir. Mermerlerde spesifik kesme enerji değerlerine göre 2000 mm/dk ilerleme hızı tercih edilmesi ön görülmüştür.

3.3. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme kuvvetlerine etkisi

Çalışmada kullanılan mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinden birim hacim ağırlık, porozite, su emme, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma dayanımının F_c ve F_t kesme kuvvetine olan etkileri doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da F_c ve F_t kesme kuvveti ile fiziksel ve mekanik özelliklerin arasındaki regresyon analizi modeli ve korelasyon katsayısı sonuçları verilmiştir.

Çalışmada yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucunda hesaplanan kesme kuvvet değerleri ile mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkilerin varlığı görülmüştür. Yapılan analizlerde, mermerlerde F_c kesme kuvveti belirlilik katsayısı (R^2=0.869-0.922) değerleri, F_t kesme kuvveti belirlilik katsayısı (R^2=0.866-0.920) değerleri elde edilmektedir. Bu değere göre kesme kuvvetler ile mermerlerde birim hacim ağırlığı, porozite, su emme, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre mermerlerde porozite, su emme ve aşınma dayanımı azaldıkça, kesme kuvvet değerleri artmakta, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı oranı arttıkça, kesme kuvvet değerleri artmaktadır. M1 mermer numunesinden M7 mermer numunesine doğru gidildikçe sertlik, darbe dayanımı ve basınç dayanımı artmasından dolayı kesme kuvvetler artmaktadır.

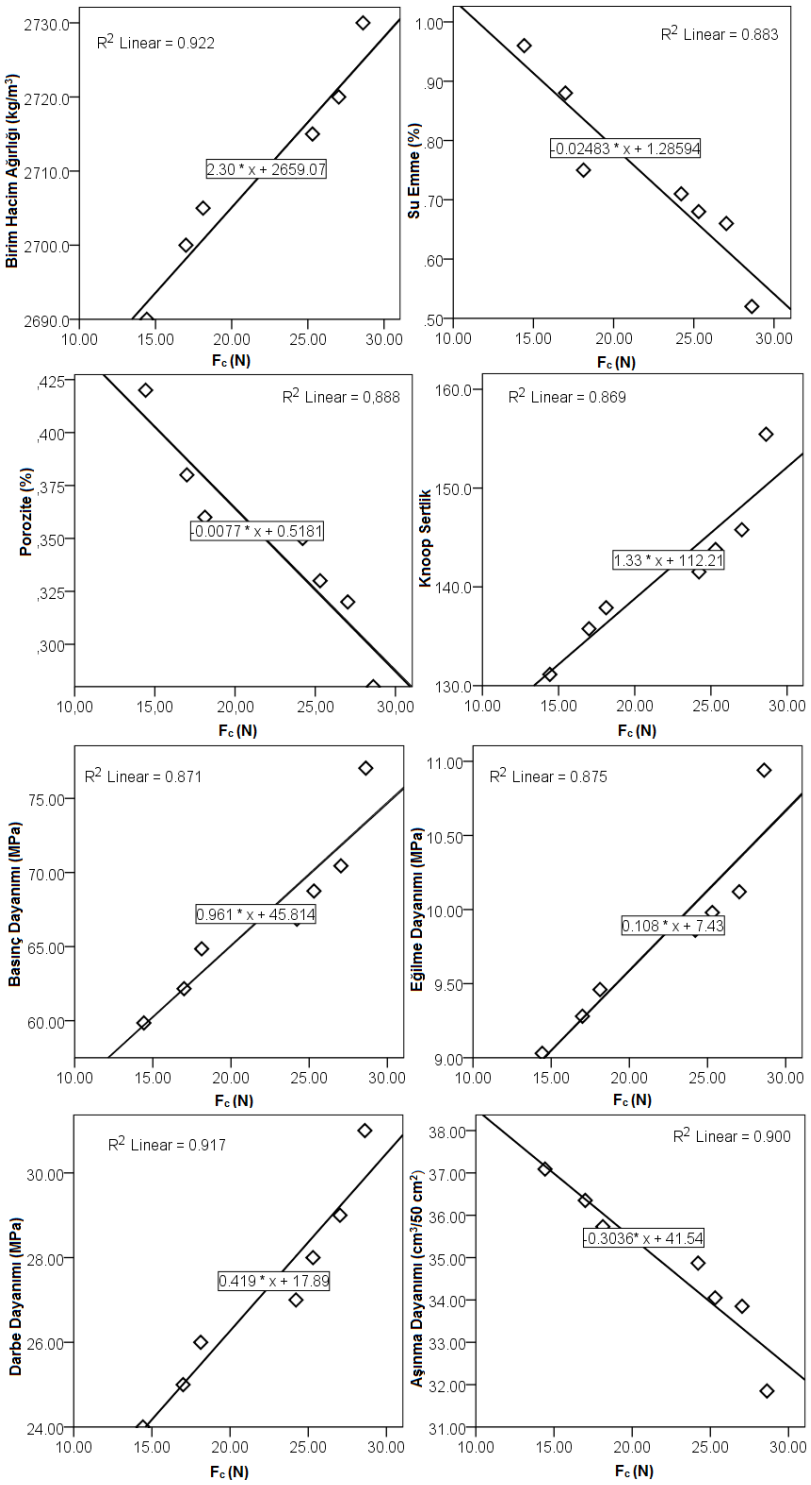


Şekil 8. Mermerlerde işlenebilirlilik deneylerinde kesme derinliğine göre spesifik kesme enerji değerleri

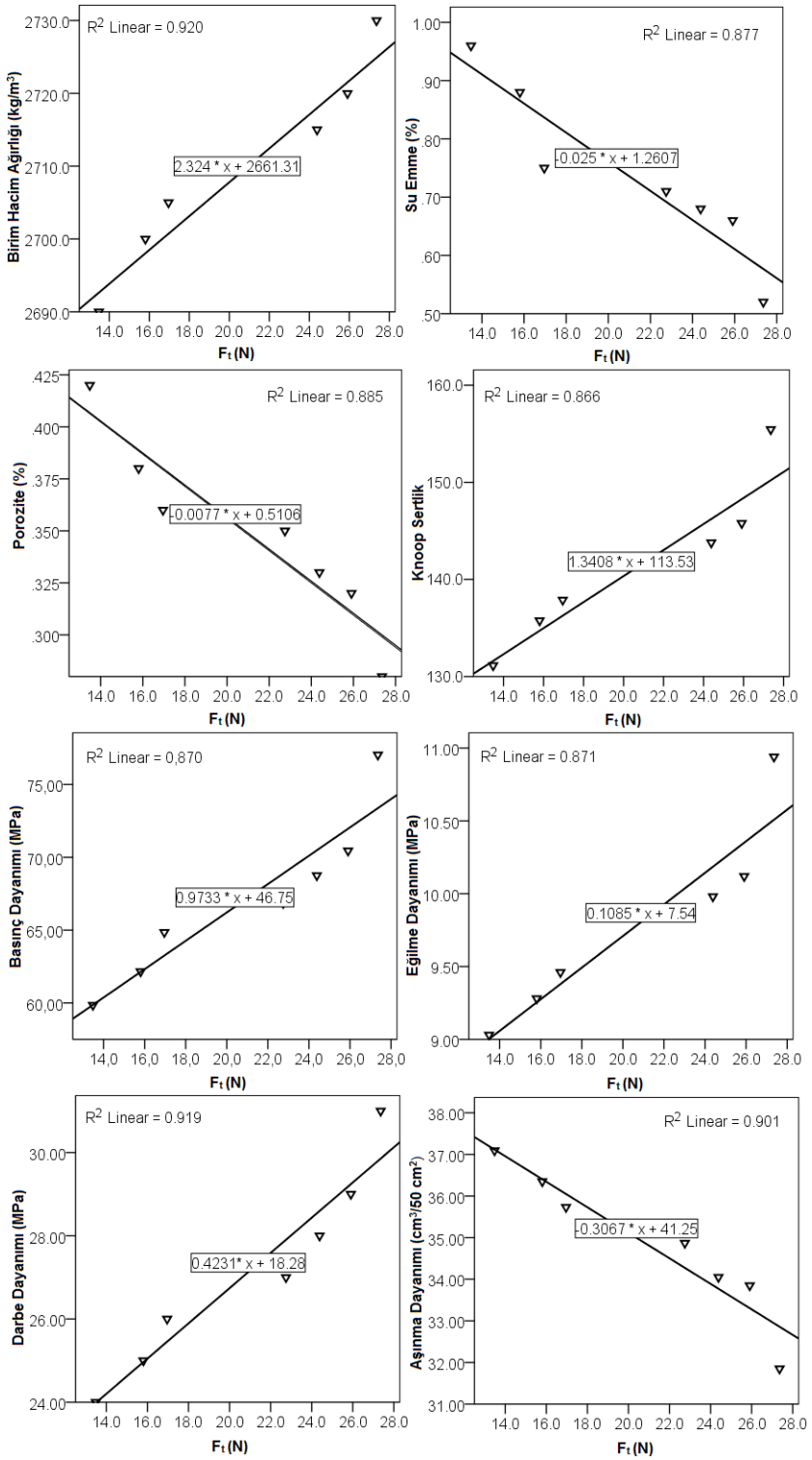
3.4. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin spesifik kesme enerjisine etkisi

Çalışmada kullanılan mermerlerin birim hacim ağırlığı, porozitesi, su emmesi, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma dayanımının spesifik enerjiye olan etkileri regresyon analizi ve korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Şekil 11'de spesifik kesme enerji ile fiziksel ve mekanik özelliklerin arasındaki regresyon analizi modeli sonuçları verilmiştir.

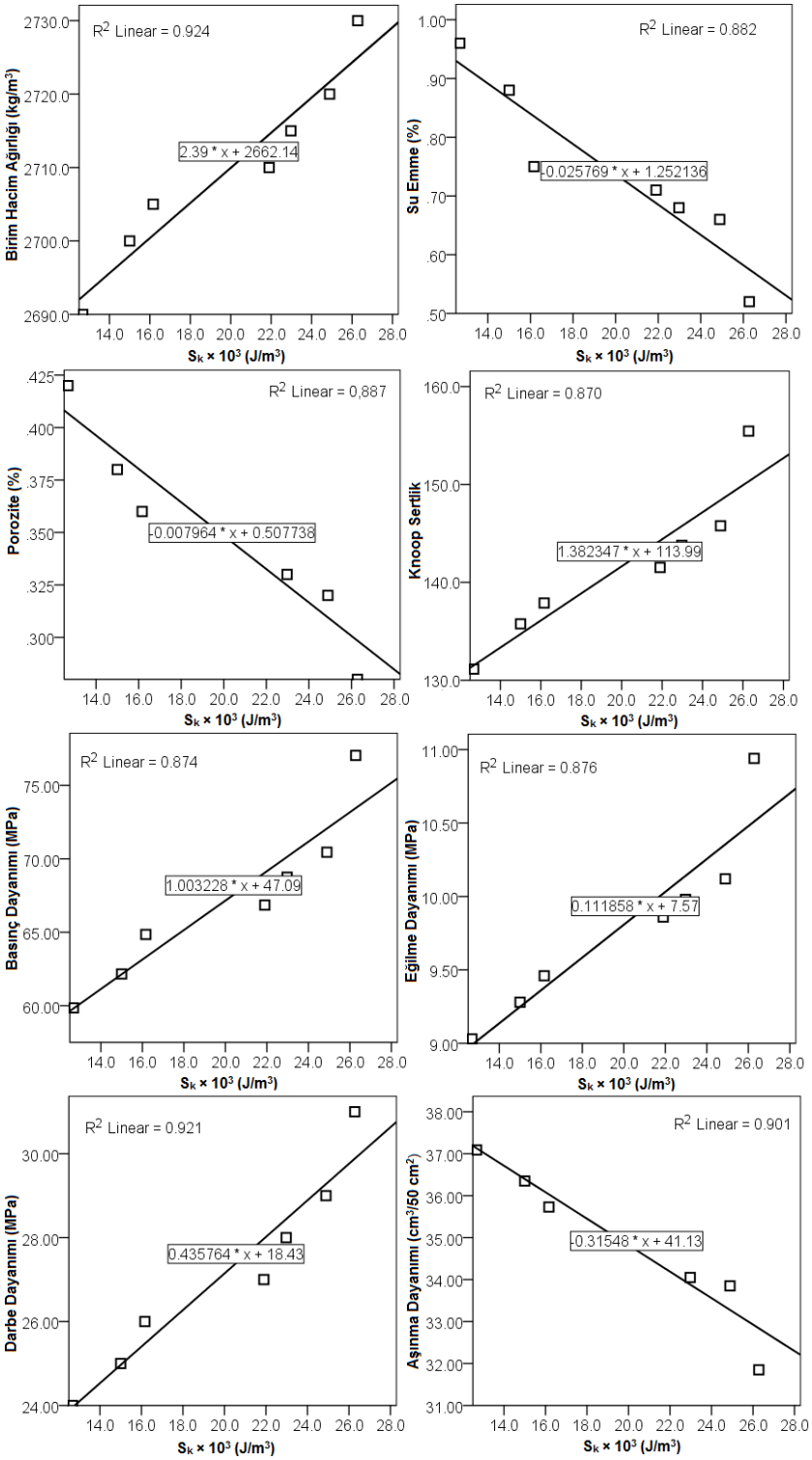
Çalışmada yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucunda hesaplanan spesifik kesme enerji değerleri ile mermerlerin fiziksel-mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkilerin varlığı görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla CNC makinelerinin verimliliğinin önceden tahmini için çeşitli regresyon denklemleri geliştirilmiştir. Bu regresyon denklemleri özellikle spesifik enerji tahmininde kullanılabilecektir. İşlenebilirlik deneylerine tabi tutulan mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile spesifik kesme enerji değerleri arasındaki ilişkiler görülmektedir. Yapılan analizlerde, mermerlerde belirlilik katsayısı (R^2=0.870-0.924) değerler elde edilmektedir. Bu değere göre spesifik kesme enerji ile mermerlerin birim hacim ağırlığı, porozitesi, su emmesi, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre mermerlerde porozite, su emme ve aşınma dayanımı azaldıkça, spesifik enerji artmakta, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı oranı arttıkça, spesifik kesme enerji değerleri artmaktadır. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerin spesifik kesme enerji değerinin tahmininde önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin F_c kesme kuvvetine etkisi



Şekil 10. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin F_t kesme kuvvetine etkisi



Şekil 11. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin spesifik kesme enerjisine etkisi

4. Sonuçlar

İstatistiksel analiz sonucunda, mermerlerin işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızının kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisi değerlerini anlamlı ölçüde etkilediği görülmüştür. Teğetsel ve radyal kesme kuvvet değerleri 2.0 mm kesme derinliği ve 3000 mm/dk ilerleme hızında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kesme derinliğinin 2.0 mm olduğu durumda kesici ucun birim zamanda kesmesi gereken mermer talaş miktarının artmasına bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinin artmasından dolayı işlenebilirlik zorlaşmaktadır. Spesifik kesme enerji değerleri 2.0 mm kesme derinliği ve 3000 mm/dk ilerleme hızında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Spesifik kesme enerji miktarının en yüksek olduğu işleme parametreleri, makinenin en çok zorlandığı anı göstermektedir. Kesme derinliği arttıkça spesifik kesme enerji değerleri artmakta, kesme verimliliği düşmektedir. Bunun nedeni kesici ucun mermerlerde kaldırılan talaş hacminin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle mermerlerde 2.0 mm kesme derinliğinde spesifik kesme enerji önemli ölçüde artmıştır.

Teğetsel ve radyal kesme kuvvet değerleri ile mermerlerin porozite, su emme ve aşınma dayanımı azaldıkça, kesme kuvvet değerleri artmakta, knoop sertliği, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı oranı arttıkça, kesme kuvvet değerleri artmaktadır. Spesifik kesme enerji değerleri ile mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkilerin varlığı görülmüştür. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarla CNC makinenin elektrik enerjisi maliyeti, kesici uç seçimi, optimum kesme parametreleri ve performans tahmini amaçlarına yönelik ön bir çalışma için kullanılabilir. Ayrıca mermerlerin işlenmesinde mermerlerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri bilindiği takdirde kesici uç seçiminde daha kolay karar verme durumu ortaya çıkmakta ve tüketilen elektrik enerjisi maliyetinin de önceden tahmin edilebileceği ön görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (proje numarası 13.GÜZSAN.01) ve Zafer Kalkınma Ajansı Sosyal Kalkınma Mali Destek Programları (proje numarası TR33/12/SKMDP/0104) tarafından desteklenmiştir. Katkıları için teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] Cevindik, M. 2009. Üç eksenli CNC ile mermer işlemede elektrik enerji tüketimine etki eden parametreler, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.

[2] Sarıışık, G., Oyman, E. 2009. Mermer atıklarının değerlendirilmesinde bilgisayar kontrollü doğal taş işleme makinaları (CNC) kullanımı ile yeni ürün geliştirme, mermer artıklarının değerlendirilmesi ve çevresel etkilerinin azaltılması, I. Mermer Artıklarının Değerlendirilmesi ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması Sempozyumu, 16-17 Ekim, Diyarbakır, 305-314.

[3] Sarıışık, G., Özkan, E. 2015. Bilgisayar kontrollü makineler (CNC) ile doğal taş artıklarının islenmesi ve modellenmesi, 7. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Mart, İstanbul, 367-375.

[4] Akdas, H., Yurdakul, M. 2014. Analysis of the Industrial Cutting Process of Natural Building Stones: Evaluation of Electric Power Consumption, *Journal of Testing and Evaluation*, Cilt. 42, No.4, s.1-11.

[5] Aslantaş, K., Özbek, O., Ucun, İ., Büyüksağiş İS. 2009. İnvestigation

of the effect of aixol cutting force on circular diamond sawblade used marble projesses, *Materials and Manufacturing Processes,* Cilt. 24, No.12, s.1423-1430.

[6] Bayram, F., Yasitli, N.E., Kulaksiz, S., Ozcelik Y. 2012. Optimization of limestone sawing using circular saws with reference to unit wear and energy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical* Engineering Science, Cilt. 227, No.5, s. 1069-1079.

[7] Bayram, F. 2013. Prediction of sawing performance based on index properties of rocks, *Arabian Journal of Geosciences,* Cilt. 6, No.11, s.4357-4362.

[8] Büyüksağiş, İ.S., Atıcı, Ü., Adem, E. 2003. Travertenlerde tabaka yönünün kesme verimi üzerine etkileri, IV. Mermer Sempozyumu, 18-19 Aralık, Afyon, 189-199.

[9] Han, Q.L., Li, Y., Xu, X.P. 2007. A comparativestudy of stone sawing with thin and normal blades, *Key Engineering Materials,* Cilt.329, s.687-692.

[10] Hu, S., Wang, C., Chen, B., Hu, Y. 2006. Dry-cutting concrete study of diamond saw blade with different segment width, *Materials Science Forum,* Cilt. 532-533, s.321-324.

[11] Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O. 2004. Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Cilt.41, No.7, s.1123-1131.

[12] Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K. 2013. 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,* Cilt. 227, No.2, s.286-300.

[13] Tönshoff, H.K., Hillmann-Apmann, H., Asche, J. 2012. Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications, *Diamond and Related Materials,* Cilt.11, s.736-741.

[14] Turchetta, S. 2009. Cutting force on a diamond grit in stone machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Cilt.44, No.9-10, s.854-861.

[15] Ucun, İ., Aslantaş, K., Büyükağiş, İ.S., Taşgetiren, S. 2011. An investigation of the effect of diamond concertration and matrix material couposition in the circular sowing process of granites. *J. of Proc IMECHE Portc: Journal of Mechanical Sience*, Cilt. 225, s.17-27.

[16] Ucun, İ., Aslantaş, K., Büyükağiş, İ.S., Taşgetiren, S. 2012. Micromechanical modelling of diamond debonding in couposite segments, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics,* Cilt. 50, No.2, s.609-626.

[17] Ucun, İ., Aslantaş, K., Büyükağiş, İ.S., Taşgetiren, S. 2013. Effect of cooling liguids on cutting process using diamond segmented disc of naturel Stones, *J. of Proc IMECHE Portc: Mechanical Engineering Science,* Cilt. 227, No.10, s.2315-2327.

[18] Yilmazkaya, E., Ozcelik, Y. 2015. The Effects of Operational Parameters on a Mono-wire Cutting System: Efficiency in Marble Processing*, Rock Mechanics and* Rock Engineering, Cilt. 49, No.2, s. 523–539.

[19] Yurdakul, M., Akdas, H. 2012. Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* Cilt. 53, s.38-44.

[20] Yu, Y.Q., Zhang, Y.F., Li, Y., Xu, X.P. 2006. Sawing of granite with side-

slotted diamond segments, *Key Engineering Materials,* Cilt.315-316, s.103-107.

[21] Xu, X., Li, Y., Yu, Y. 2003. Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade, *Journal of Materials Processing Technology,* Cil.139, s.281-285.

[22] Wang, C.Y., Hu, Y.N., Ding, H.N. 2004. Cutting forces in sawing process of reinforced concrete, *Materials Science Forum,* Cil.471-472, s.292-297.

[23] Ersoy, A., Atıcı, U. 2005. Specific energy prediction for circular diamond saw in cutting different types of rocks using multivariable linear regression analysis, *Journal of Mining Science,* Cilt.41, No.3, s.240-260.

[24] Jerro, H.D., Pamg, S.S., Yang, C., Mirshams, R.A. 1999. Kinematics analysis of the chipping process using the circular diamond saw blade, *Transactions of ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Cilt.121, s.257-264.

[25] Brach, K., Pai, D.M., Ratterman, E., Shaw, M.C. 1988. Grinding forces and energy, *Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry* Cilt.110, s.25-31,

[26] Asche, J., Tönshoff, H.K., Friemuth, T. 1999. Cutting Principles, wear and applications of diamond tools in the stone and civil engineering industry, Proceedings of Diamond tools Conference, s.151–157.

[27] Tönshoff, H.K., Warnecke, G. 1982. Research on stone sawing, in: P. Daniel (Ed.), Advances in Ultrahard Materials Applications Technology, Vol. 1, Hornbeam, England, s.36-49.

[28] Konstanty, J. 2002. Theoretical analysis of stone sawing with diamonds, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt.123, s.146–154.

[29] Pai, D.M., Ratterman, E., Shaw, M.C. 1989. Grinding swarf, *Wear,* Cilt.131, s.329–339.

[30] Polini, W., Turchetta, S. 2004. Force and specific energy in stone cutting by diamond mill, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Cilt.44, s.1189-1196.

[31] Turchetta, S. 2012. Cutting force and diamond tool wear in stone machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Cilt.61, s.441–448.

[32] Sarıışık, G., Özkan, A. 2016. Determination of cutting force and specific energy the processability of marbles with computer numerical controlled (CNC) machine, *AKU J. Sci. Eng.,* Cilt 16, s.420-430.