



**MERMERLERİN VAKUMLA SERT LEHİMLENMİŞ
ELMAS KAPLAMALI FREZE TAKIMLARLA
İŞLENMESİNİN OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Oğuzhan ÖZ

Danışman

Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2025

Bu tez çalışması 23.FEN.BİL.06 numaralı proje ile AKÜ - BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

MERMERLERİN VAKUMLA SERT LEHİMLENİMİŞ ELMAS
KAPLAMALI FREZE TAKIMLARLA İŞLENMESİNİN
OPTİMİZASYONU

Oğuzhan ÖZ

Danışman

Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2025

ÖZET

Doktora Tezi

MERMERLERİN VAKUMLA SERT LEHİMLENMİŞ ELMAS KAPLAMALI FREZE TAKIMLARLA İŞLENMESİNİN OPTİMİZASYONU

Oğuzhan ÖZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

Doğal taş bloklar, levhalar ve plakalar, CNC' de (bilgisayarlı sayısal kontrol) kullanılan farklı takımlarla işlenerek dekoratif ürünler oluşturulabilmektedir. Verimli ve uzun ömürlü kullanım sağlayan vakum lehimleme yöntemiyle üretilen elmas kaplamalı freze takımlarının optimum parametrelerle aşınma mekanizmasının belirlenmesi bu çalışmanın amacıdır. Bu amaçla, dekoratif ürünlerde sıkça tercih edilen metamorfik kökenli 6 farklı mermer CNC'de işlenmiştir. Çalışma ön deneyler ve ana deneyler olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Ön deney aşamasında daha önceki çalışmalardan elde edilmiş tecrübelerle işlem parametreleri olarak; 1 mm kesme derinliği, 1500, 2250 ve 3000 mm/dk ilerleme hızları ile 6000, 9000 ve 12000 dev/dk iş mili devirleri seçilmiştir. Frezeleme deneyleri tam kesme işlemi şeklinde, yani takımının tamamının malzemeye girerek takım çapına eşit bir kesme genişliğinde talaş kaldırmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı elmas tane boyutlarına sahip T301, T405 ve T602 kodlu takımlar kullanılmıştır. Bu takımlar, özgül enerji (SE), yüzey pürüzlülüğü (Ra), normal kuvvet (Fz) ve radyal kuvvet (Fr) kriterleri açısından değerlendirilmiştir. İlk aşama deney sonuçlarına göre, T602 kodlu takımın diğer takımlara kıyasla üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle ana deneylerde T602 (50/60 mesh) kodlu takımlar ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uygulamalarda tam kesme yerine sürekli kesme işlemi yapıldığından, iri ve ince tane boyutuna sahip mermerler üzerinde uygun kesme genişliği belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri esas alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, kesici takım çapının %40'ına karşılık gelen 2,4 mm kesme genişliği uygun bulunmuştur. Ön deneylerden elde edilen bulgular doğrultusunda, tam

faktöriyel deney tasarımı uygulanmış ve toplam 16 deney modeli oluşturulmuştur. Frezeleme sırasında kesme eksenlerinde oluşan kuvvetler, özgül enerji, yerdeğiştirme, gürültü seviyeleri ve frezeleme sonrası yüzey pürüzlülüğü ile tane boyutu analizleri yapılmıştır. Deney verilerinin optimizasyonu için Stat-Ease 360 yazılımı kullanılarak yüzey yanıt yöntemi (RSM) uygulanmıştır. Frezeleme performansının optimize edilmesinde, nihai yüzey kalitesini belirleyen yüzey pürüzlülüğü (Ra), yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir parametre olan normal kuvvet (Fz), enerji verimliliği ve üretkenlik açısından kritik olan için özgül enerji (SE) ile malzeme kaldırma oranı (MRR) parametreleri dikkate alınmıştır. Her bir mermer türü için en uygun işlem parametreleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler doğrultusunda elmas freze takımının aşınma durumlarını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla 1, 3, 5, ve 7 m²'lik adımlarla aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sırasında, SEM ve Dino-Lite dijital mikroskop kullanılarak takım yüzeyinde oluşan aşınma türleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Genel olarak, aşınma türlerinin kenar-köşe aşınma, kırılma ve parçalanma şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Takımlardaki aşınma oranı, ince taneli mermerlerde %30-48 arasında iken, iri taneli mermerler de bu oran %54-61 olarak tespit edilmiştir. En hızlı aşındırıcı etki %54 oranıyla Marmara Beyaz mermerde gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm mermerler için referans olabilecek optimum işleme parametreleri (12000 dev/dk, 3000 mm/dk) belirlenmiş ve bu parametrelerle Afyon Gri mermer için aşınma durumu karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, referans parametrelerle %48 oranında daha fazla aşınma meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mermerlerin karakteristik özelliklerinin yalnızca optimum işlem parametrelerinin belirlenmesinde değil, aynı zamanda işlem verimliliği ve takım ömrü üzerinde de kritik bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Vakumla lehimleme yöntemiyle üretilmiş elmas kaplamalı takımların, geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük aşınma oranları ve daha yüksek işleme performansı sunduğunu ortaya koymuştur.

2025, xvii + 128 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mermer, Vakumla sert lehimlenmiş elmas kaplamalı takım, Özgül enerji, Yüzey pürüzlülüğü, Yüzey yanıt yöntemi, Aşınma türleri.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

OPTIMIZATION OF MARBLE MACHINING WITH VACUUM BRAZED DIAMOND-COATED MILLING TOOLS

Oğuzhan ÖZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erkan ÖZKAN

Natural stone blocks, slabs, and plates can be processed using various tools in CNC (Computer Numerical Control) systems to create decorative products. The aim of this study is to determine the wear mechanism of diamond coated milling tools produced by vacuum brazing method, which provides efficient and long-lasting use, with optimum parameters. For this purpose, six different metamorphic-origin marbles, commonly used in decorative products, were processed on a CNC machine. The study consists of two stages: preliminary experiments and main experiments. In the preliminary experiments, based on previous studies and experiences, the processing parameters were selected as follows: a cutting depth of 1 mm, feed rates of 1500, 2250, and 3000 mm/min, and spindle speeds of 6000, 9000, and 12000 rpm. The milling experiments were carried out as a full cutting operation, i.e. with the entire tool entering the material and removing chips with a cutting width equal to the tool diameter. Tools with different diamond grain sizes, coded as T301, T405, and T602, were used in the experiments. These tools were evaluated based on specific energy (SE), surface roughness (Ra), normal force (Fz), and radial force (Fr) criteria. According to the results of the preliminary experiments, the T602-coded tool demonstrated superior performance compared to the other tools. Therefore, the main experiments were conducted using T602 (50/60 mesh) coded tools. Additionally, since continuous cutting was performed instead of full slotting in the applications, an appropriate cutting width was determined for marbles with coarse and fine grain sizes. Based on surface roughness measurements, a cutting width corresponding to 40% of the tool diameter, or 2.4 mm, was found to be suitable. Based on the findings from the preliminary experiments, a full factorial experimental design was applied, and a total of

16 experimental models were created. During milling, forces occurring on the cutting axes, specific energy, displacement, noise levels, and post-milling surface roughness and grain size analyses were conducted. To optimize the experimental data, the Response Surface Methodology (RSM) was applied using the Stat-Ease 360 software. In optimizing milling performance, parameters such as surface roughness (Ra), which determines the final surface quality, normal force (Fz), which significantly affects surface roughness, and specific energy (SE) and material removal rate (MRR), which are critical for energy efficiency and productivity, were considered. The optimal processing parameters for each type of marble were determined individually. Based on these parameters, wear tests were conducted at intervals of 1, 3, 5, and 7 m² to examine the wear behavior of the diamond milling tools in detail. During the wear tests, the wear types on the tool surface were analyzed in detail using SEM and Dino-Lite digital microscopy. In general, the observed wear types included edge/corner wear, fracture, and chipping. The wear rate of the tools ranged between 30-48% for fine-grained marbles, while it was determined to be between 54-61% for coarse-grained marbles. The most abrasive effect was observed in Marmara White marble, with a wear rate of 54%. Additionally, optimal processing parameters (12000 rpm spindle speed and 3000 mm/min feed rate), which could serve as a reference for all marbles, were determined, and the wear behavior of Afyon Gray marble was compared under these parameters. According to the results, a 48% higher wear rate was observed under the reference parameters. In conclusion, it was found that the characteristic properties of marbles are critical not only for determining the optimal processing parameters but also for processing efficiency and tool life. The study revealed that diamond-coated tools produced using the vacuum brazing method provide lower wear rates and higher machining performance compared to traditional methods.

2025, xvii + 128 pages

Anahtar Kelimeler: Marble, Vacuum Brazed Diamond-Coated Tool, Specific Energy, Surface Roughness, Response Surface Methodology, Wear Types.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Erkan ÖZKAN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ ve Doç. Dr. Fatih BAYRAM'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Ayrıca desteklerinden dolayı Selahattin HASTÜRK'e teşekkür ederim.

'Mermerlerin Vakumla Sert Lehimlenmiş Elmas Kaplamalı Freze Takımlar Kullanılarak Bilgisayar Kontrollü Makinelerde Yüzey Frezeleme İşleminin Optimizasyonu' isimli tezime ve 23.FEN.BİL.06 numaralı projeye yapılan desteklerden dolayı BAPK' ya teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Oğuzhan ÖZ

Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Doğal Taşların CNC Frezeleme İşlemlerinin İncelenmesi	4
2.2 Doğaltaş Frezeleme Süreçlerinin Modellenmesi	9
2.3 CNC ve Frezeleme İşlemleri.....	11
3. MATERYAL ve METOT	13
3.1 Deneysel Donanım ve Cihazlar	13
3.2 Deney Numuneleri ve Karakteristik Özellikleri	18
3.3 Deney Tasarımı.....	23
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
4.1 Ön Çalışma Sonuçları ve Değerlendirmeler	28
4.2 Tam Faktöriyel Deney Tasarımı ve Uygulama Süreci	35
4.3 Seçilen Frezeleme Parametreleri ile Deney Sonuçları.....	37
4.3.1 Afyon Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri	38
4.3.2 Afyon Gri Mermerin Frezeleme Verileri	39
4.3.3 Bursa Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri	40
4.3.4 Marmara Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri	41
4.3.5 Muğla Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri	42
4.3.6 Uşak Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri	43
5. KESME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU	44
5.1 Yanıt Yüzey Modelinin (RSM) Oluşturulması.....	44
5.1.1 Afyon Beyaz Mermer için Model Analizi	46
5.1.2 Afyon Gri Mermer için Model Analizi	49
5.1.3 Bursa Beyaz Mermer için Model Analizi	52

5.1.4 Marmara Beyaz Mermer için Model Analizi	56
5.1.5 Muğla Beyaz Mermer için Model Analizi	59
5.1.6 Uşak Beyaz Mermer için Model Analizi	62
5.1.7 Metamorfik Kökenli Mermerler için Genel Bir Model Analizi.....	65
5.2 Tahmin Fonksiyonları.....	68
5.3 Optimum Parametrelerin Belirlenmesi	90
6. FREZE TAKIMLARIN AŞINMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ	96
6.1 Afyon Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	97
6.2 Afyon Gri Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	100
6.3 Bursa Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	103
6.4 Marmara Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	106
6.5 Muğla Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	109
6.6 Uşak Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi	112
6.7 AG Mermerin Referans Optimum Parametreye göre Aşınmanın İncelenmesi .	115
7. TARTIŞMA ve SONUÇ	117
8. KAYNAKLAR.....	121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

a_e	Kesme Genişliği
a_p	Kesme Derinliği
AB	Afyon Beyaz
AG	Afyon Gri
ANN	Yapay Sinir Ağı
BB	Bursa Beyaz
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
ED	Elektrolize Kaplamalı Elmas
f	İlerleme Hızı
Fr	Radyal Kuvvet
Ft	Teğetsel Kuvvet
Fz	Normal Kuvvet
GA	Genetik Algoritma
KOP	Karakteristik Optimum Parametresi
MARB	Marmara Beyaz
MRR	Malzeme Kaldırma Oranı (Talaş Kaldırma Oranı)
MUB	Muğla Beyaz
PCD	Polikristal Elmas
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
ROP	Referans Optimum Parametresi
RSM	Yüzey Yanıt Yöntemi
SE	Özgül Enerji
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UB	Uşak Beyaz
VBD	Vakumla Sert Lehimlenmiş Elmas
Vc	Devir
WC	Tungsten Karbür

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Yapılan işlemlerin akış şeması.....	27
Şekil 4.1 Ön Çalışma Sürecinin Şematik Gösterimi.	28
Şekil 4.2 Kuvvetlerin vektörel gösterimi.	29
Şekil 4.3 Farklı VBD takımların özgül enerji değerlerinin grafik gösterimi.	31
Şekil 4.4 Farklı VBD takımların Fr, Fz ve titreşim değerlerinin grafik gösterimi.....	31
Şekil 4.5 Farklı VBD takımların Ra ve d50 değerlerinin grafik gösterimi.	32
Şekil 4.6 Frezeleme deneyine ait adımların şematik gösterimi.....	36
Şekil 5.1 Optimizasyon yönteminin uygulama aşamaları.	45
Şekil 5.2 AB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.	48
Şekil 5.3 AB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.	48
Şekil 5.4 AB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	49
Şekil 5.5 AG için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.....	51
Şekil 5.6 AG için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.	51
Şekil 5.7 AG için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	52
Şekil 5.8 BB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.	54
Şekil 5.9 BB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.	55
Şekil 5.10 BB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.....	55
Şekil 5.11 MARB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.....	58
Şekil 5.12 MARB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.	58
Şekil 5.13 MARB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	59
Şekil 5.14 MUB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.	61

Şekil 5.15 MUB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.....	61
Şekil 5.16 MUB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	62
Şekil 5.17 UB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.	64
Şekil 5.18 UB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.	64
Şekil 5.19 UB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	65
Şekil 5.20 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	67
Şekil 5.21 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	67
Şekil 5.22 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.	68
Şekil 5.23 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği. .	70
Şekil 5.24 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği..	71
Şekil 5.25 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği. .	72
Şekil 5.26 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği. .	73
Şekil 5.27 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği..	74
Şekil 5.28 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği..	75
Şekil 5.29 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği...	77
Şekil 5.30 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği. .	77
Şekil 5.31 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği. .	78
Şekil 5.32 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.	80
Şekil 5.33 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.	80
Şekil 5.34 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.	81

Şekil 5.35 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.	83
Şekil 5.36 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.	83
Şekil 5.37 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.	84
Şekil 5.38 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği. .	86
Şekil 5.39 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği. .	86
Şekil 5.40 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği. .	87
Şekil 5.41 Metamorfik kökenli mermerlerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon analiz grafiği.	88
Şekil 5.42 Metamorfik kökenli mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon analiz grafiği.	89
Şekil 5.43 Metamorfik kökenli mermerlerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon analiz grafiği.	90
Şekil 5.44 AB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	92
Şekil 5.45 AG için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	93
Şekil 5.46 BB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	93
Şekil 5.47 MARB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	94
Şekil 5.48 MUB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	94
Şekil 5.49 UB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.	95
Şekil 6.1 Elmas tanelerin yüzey alanı ölçümleri.	96
Şekil 6.2 AB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.	99
Şekil 6.3 AG mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.	102

Şekil 6.4 BB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.	105
Şekil 6.6 MUB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.....	111
Şekil 6.7 UB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.	114



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Mermerlerin mineralojik ve petrografik özellikleri.	20
Çizelge 3.2 XRF analiz sonuçları (TS EN 15309).	24
Çizelge 3.3 Numunelerin fiziko-mekanik özellikleri.	23
Çizelge 3.4 İşlem parametre ve seviyeleri.	24
Çizelge 4.1 Farklı VBD takımlarla yapılan ön deney çalışmalarının sonuçları.	30
Çizelge 4.2 Farklı kesme genişliğine göre pürüzlülük değerleri.	33
Çizelge 4.3 Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri.	35
Çizelge 4.4 Tam faktöriyel deney tasarımı.	36
Çizelge 4.5 AB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	38
Çizelge 4.6 AG mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	39
Çizelge 4.7 BB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	40
Çizelge 4.8 MARB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	41
Çizelge 4.9 MUB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	42
Çizelge 4.10 UB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.	43
Çizelge 5.1 AB mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.	46
Çizelge 5.2 AB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	47
Çizelge 5.3 AG mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.	49
Çizelge 5.4 AG için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	50
Çizelge 5.5 BB mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.	52
Çizelge 5.6 BB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	53
Çizelge 5.7 MARB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.	56

Çizelge 5.8 MARB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	57
Çizelge 5.9 MUB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.....	59
Çizelge 5.10 MUB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	60
Çizelge 5.11 UB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.	62
Çizelge 5.12 UB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.	63
Çizelge 5.13 Metamorfik kökenli mermerler için modelin regresyon analiz sonuçları.	65
Çizelge 5.14 Metamorfik kökenli mermerler için modelin varyans analiz sonuçları. ...	66
Çizelge 5.15 AB mermer için tahmin fonksiyonları.	69
Çizelge 5.16 AB mermer için tahmin değerleri.	69
Çizelge 5.17 AB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.....	70
Çizelge 5.18 AB mermer SE için yapılan F testi sonucu.	71
Çizelge 5.19 AB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.	72
Çizelge 5.20 AG mermer için tahmin fonksiyonları.	72
Çizelge 5.21 AG mermer için tahmin değerleri.	73
Çizelge 5.22 AG mermer Fz için yapılan F testi sonucu.....	74
Çizelge 5.23 AG mermer SE için yapılan F testi sonucu.	74
Çizelge 5.24 AG mermer Ra için yapılan F testi sonucu.	75
Çizelge 5.25 BB mermer için tahmin fonksiyonları.....	76
Çizelge 5.26 BB mermer için tahmin değerleri.....	76
Çizelge 5.27 BB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.	77
Çizelge 5.28 BB mermer SE için yapılan F testi sonucu.	78
Çizelge 5.29 BB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.....	78

Çizelge 5.30 MARB mermer için tahmin fonksiyonları.	79
Çizelge 5.31 MARB mermer için tahmin değerleri.	79
Çizelge 5.32 MARB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.....	80
Çizelge 5.33 MARB mermer SE için yapılan F testi sonucu.....	81
Çizelge 5.34 MARB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.	81
Çizelge 5.35 MUB mermer için tahmin fonksiyonları.....	82
Çizelge 5.36 MUB mermer için tahmin değerleri.	82
Çizelge 5.37 MUB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.	83
Çizelge 5.38 MUB mermer SE için yapılan F testi sonucu.....	84
Çizelge 5.39 MUB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.....	84
Çizelge 5.40 UB mermer için tahmin fonksiyonları.	85
Çizelge 5.41 UB mermer için tahmin değerleri.	85
Çizelge 5.42 UB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.....	86
Çizelge 5.43 UB mermer SE için yapılan F testi sonucu.	87
Çizelge 5.44 UB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.	87
Çizelge 5.45 Metamorfik kökenli mermerler için geliştirilen tahmin fonksiyonları.	88
Çizelge 5.46 Metamorfik kökenli Fz değerleri için F testi analizi.....	88
Çizelge 5.47 Metamorfik kökenli mermerlerin SE değerlerin için F testi analizi.	89
Çizelge 5.48 Metamorfik kökenli mermerlerin Ra değerleri için F testi analizi.....	90
Çizelge 5.49 Parametre kısıtları.	91
Çizelge 5.50 Mermerlerin en uygun işlem koşulları.	91
Çizelge 6.1 Elmas açma süreci.....	97

Çizelge 6.2	AB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.	97
Çizelge 6.3	AB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.....	98
Çizelge 6.4	AB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.	99
Çizelge 6.5	AG mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.	100
Çizelge 6.6	AG mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.	101
Çizelge 6.7	AG mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.	102
Çizelge 6.8	BB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.	103
Çizelge 6.9	BB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.....	104
Çizelge 6.10	BB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.....	105
Çizelge 6.11	MARB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.	106
Çizelge 6.12	MARB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.	107
Çizelge 6.13	MARB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.	108
Çizelge 6.14	MUB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.....	109
Çizelge 6.15	MUB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.	110
Çizelge 6.16	MUB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.....	111
Çizelge 6.17	UB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.	112
Çizelge 6.18	UB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.	113
Çizelge 6.19	UB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.	114
Çizelge 6.20	AG için ROP sonucu aşınma görüntüleri ve ölçümleri.....	116
Çizelge 7.1	Optimum parametreler ile mekanik dayanım verileri.	118

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi.....	13
Resim 3.2 Vakumla sert lehimlenmiş elmas kaplamalı freze takımlar.	14
Resim 3.3 CNC Makinesindeki yük ölçer sehpa.	14
Resim 3.4 Yük ölçen veri toplama cihazı.	15
Resim 3.5 Defne Lab soft yazılımı.	15
Resim 3.6 Hioki yüksek hassasiyetli enerji analizörü.....	16
Resim 3.7 Hioki Software yazılımı.....	16
Resim 3.8 Unit UT315A titreşim ve Unit UT 352 gürültü ölçüm cihazları.	17
Resim 3.9 Mitutoyo SJ-210 model pürüzlülük cihazı.....	18
Resim 3.10 Nikon Eclipse 2V100POL elektron mikroskop ile ince kesit analizi.	18
Resim 3.11 İnce kesit görüntüleri.	19
Resim 3.12 ImageJ programında görüntü analizinin gösterimi.	21
Resim 3.13 Freze işleminde tam kesim gösterimi.	23
Resim 3.14 Yük hücrelerinin ölçüm doğruluklarının kontrollerine ait görseller.....	25
Resim 3.15 AlphaCAM ile modelleme (Sol), frezeleme sonrası oluşan yüzey (Sağ)..	25
Resim 3.16 T301, T405, T602 takımların SEM görüntüleri.....	26
Resim 4.1 Tam kesim ile frezelenmiş yüzey (üst), yüzeyin yakın görüntüsü (alt).....	33
Resim 4.2 Bursa Beyaz mermer kesme genişliği deney sonucu.	34
Resim 4.3 Marmara Beyaz mermer kesme genişliği deney sonucu.....	34
Resim 4.3 AlphaCAM’ de oluşturulan deney modeli.	37

1. GİRİŞ

Mermerler iç ve dış mekânda sadece yapı malzemesi olarak kullanılmaz, bununla birlikte doğal renkleri ve albenisi ile dekoratif ürün olarak da kullanılır. Geçmişten günümüze dekoratif ürün olarak kullanılan mermerlerin beyaz ve açık gri renkte seçilmesinin en önemli nedeni doğanın saflığını ve bütünlüğünü temsil etmesindendir. Eski çağlardan Sanayi Devrimi'ne kadar insanlar mermerleri el aletleri ve su gücü ile işlemişlerdir (Rockwell 1993, Prikryl ve Török 2010, Schulz 2020). Sanayi Devrimi'nden bilgi toplumuna geçişte bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) makineler malzemelerin verimlilik ve yüksek hassasiyetle işlenmesini sağlamıştır. CNC frezeleme makineleri ile doğal taşların iki ve üç boyutlu şekillendirilmesinde farklı takımlarla işleme yapılabilmektedir (Özkan ve Öz 2023, Özkan vd. 2023).

Mermerin doğrudan kesilmesi için daha çok elmas kaplamalı diskler, elmas soketli testereleler, elmas soketli lamalar veya elmas tel kesme takımları kullanılmaktadır. Doğal taş ve mermerde frezeleme işlemi çoğunlukla tungsten karbür (WC, Tungsten Carbide), elektro kimyasal yöntemle elmas kaplama (Electroplated Diamond (ED)), vakumla sert lehimlenmiş elmas kaplama (Vacuum Brazed Diamond (VBD)) ve polikristal elmas (Polycrystalline Diamond (PCD)) takımlarla gerçekleştirilmektedir. Mermerde kullanılan freze takımlar mermerin şekillendirilmesi, yüzeyinin işlenmesi ve detaylı işlemlerde tercih edilmektedir. Ancak mermerde kullanılan freze takımların temel amacı tasarımı yapılan ürünün yüzey topoğrafyasını işlemektir. ED freze takımlar ile VBD freze takımlar arasında üretim yöntemleri, elmas tanelerin bağlanma şekli, performans özellikleri ve kullanım alanları açısından birbirlerinden belirgin şekilde ayrılmaktadırlar. Daha düşük maliyetli olan ED ve WC freze takımları, bu çalışmada kullanılan VBD takımlara göre düşük kuvvet gerektiren uygulamalar için uygundur. ED genel kesme ve kaba işler için tercih edilirken, WC kaba kesme ve düşük hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. VBD ise mikro kesme ve hassas işler için tercih edilmektedir. ED freze takımlarıyla yapılan işlemlerde takım ömrünün düşük olduğu gözlemlenmiştir. (Yel 2024, Sarıışık ve Özkan 2016, 2017, 2018, Chattopadhyay 2017, Altıntaş 2012). WC takımlarla işlemede yüksek devir ve ilerleme hızlarında takımın kırıldığı gözlemlenmiştir (Öz 2018, Tuğral 2019). Bu nedenle daha yüksek frezeleme devri ve ilerleme hızlarında

daha uzun ömürlü ve verimli işleme yapan VBD takımlar bu çalışmada seçilmiştir. VBD takımlarda elmas taneleri, metal gövdeye kaplama malzemesiyle vakumlu ortamda lehimlenir. Bu süreç, oksitlenmeyi önler ve yüksek sıcaklık sayesinde güçlü bir bağ oluşturur. Elmas taneleri, iş parçasının yüzeyine nüfuz ederek mikro kesim yapar ve böylece yüzey pürüzlülüğünü en aza indirir. Mikro kesme işlemi, yüzeyde pürüzlülüğü azaltır. Özellikle dekoratif ürünler veya hassas yüzeyler gerektiren uygulamalarda tasarımın ortaya çıkabilmesi için yüzey pürüzlülüğü önemlidir. Bununla birlikte VBD freze takımlarla doğal taşların işlenmesi konusunda daha önce yapılmış çalışma bulunmamaktadır.

Optimum parametrelerin tahmin edilmesinde deneysel veriye ve matematiksel modele dayalı olan Taguchi ile Yanıt Yüzey Metodu (RSM, Response Surface Method) en çok kullanılan modellerdir. Kullanılan diğer yöntemleri ise sezgisel yöntemler olan Genetik Algoritmalar (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO, Particle Swarm Optimization) (()) ile model bazlı Yapay Sinir Ağları (ANN, Artificial Neural Network)' dır. Hibrit yöntemler (GA-RSM, PSO-ANN, Taguchi-ANN) daha iyi sonuçlar elde etmek için kullanılmakla birlikte hibrit bir yöntemi tasarlamak ve uygulamak uzmanlık gerektirebilir (Khuri 2005, Montgomery 2020, Rao 2010). Bu çalışmada kullanılan RSM, malzemelerin işlenmesinde en çok kullanılan yöntem olması nedeniyle seçilmiştir.

RSM'de, girdi değişkenleri (bağımsız değişkenler) olarak kesme hızı (V_c , freze takımının iş parçası üzerindeki dönme hızı, dev/dak), ilerleme hızı (f , freze takımının iş parçası boyunca ilerleme miktarı, mm/dk), kesme genişliği (a_e), kesme derinliği (a_p), takım türü (ED, VBD, WC, PCD) ve soğutma sıvısı kullanılmaktadır. Çıktı yanıtları yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm), normal kuvvet (F_z , N), spesifik enerji (SE , J/cm^3) ve talaş kaldırma (MMR , cm^3/dk) kullanılmıştır. RSM, yanıt yüzeyini görselleştirerek yüzey grafikleri ile girdi değişkenleri ve çıktı yanıtı arasındaki ilişkiyi anlamayı kolaylaştıran optimizasyonu güçlü ve çok yönlü bir araç olarak geleneksel deney tasarımı yöntemlerinden pozitif şekilde ayrışmaktadır. Radyal kuvvet (F_r), kesici takımın mermer yüzeyine yatay olarak uyguladığı ve takımın dengesini sağlayan kuvvetken, teğetsel kuvvet (F_t) kesme işlemi sırasında malzemenin kesilmesini sağlayan paralel kuvvettir. F_z kuvveti mermer yüzeyine doğrudan uygulandığı için elmas taneler ile kesme işleminin etkinliğini

belirlemesi nedeniyle yüzeyin düzgün bir şekilde işlenmesini sağlayan kuvvet olmasından dolayı çıktı yanıtı olarak kullanılmıştır (Box and Draper 2007, Khuri 2005, Montgomery 2020, Rao 2020).

Mermerlerden yapılan dekoratif ürünlerde en önemli sorun işleme yapılan kayaca uygun takımın seçilmesi ve bu takıma uygun işleme parametrelerinin seçimidir. Dekoratif ürünler üretmek için CNC makinelerini kullanan firmalar, doğal taşların işleme parametrelerini ve kullanılacak takımı deneme yanılma yöntemiyle seçerler. Frezeleme işleminde kullanılan takıma ve kayacın türüne göre optimum parametreler değişmektedir. Değişen bu parametrelere göre takımın aşınması ve takım ömrü farklılık göstermektedir. Takım ömrünün değişmesi sonucu kalite maliyetleri ve değişken maliyetleri artırmaktadır. CNC ile üretilen heykel ve rölyefler, genellikle tek renkli, homojen yapıda ve kırık veya çatlak içermeyen doğal taşlar kullanılarak işlenir. Elmas tanelerin kesim yaptığı takımlarda kayacın dokusu ve özellikleri ile kesilen mineral ve elmas yüzey etkileşiminden dolayı optimum parametrelere göre aşınmanın hızını ve şeklini değiştirebilmektedir. Frezelemenin işleme koşullarını oluşturan ilerleme hızı ve freze dönme hızı, freze kesim çapı, titreşim, gürültü ve su tüketiminin elmas kaplı takımlarda aşınma türleri üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Aşınma türlerini etkileyen işleme koşulları; frezenin kesim çapı, elmas tane boyutu, elmas miktarı ve elmasların tutunmasını sağlayan kaplama etkileyebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı kullanılan VBD frezeleme takımlar ile mermerlere göre optimum parametrelerin belirlenmesi ve seçilen optimum parametreye göre takımda oluşan aşınmaların incelenmesinden oluşmaktadır. Optimum parametreler doğrultusunda frezeleme işlemi sırasında takımlarda meydana gelen aşınma türleri ve hızları takım ömrünü etkileyerek üretim sürecindeki maliyetleri artırabileceğinden bu çalışma büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte seçilen mermere göre optimum parametreler ile kesim yapılması işleme verimliliğini, maliyetleri ve ürün kalitesini etkilemesinden dolayı önemlidir. Mermerden yapılan dekoratif ürünlerin üretiminde, uygun takım seçimi ve işleme parametrelerinin belirlenmesi, nihai ürünün kalitesini ve estetiğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, çalışmanın sonucunda mermer işleme sektöründe daha etkin ve verimli üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Doğal Taşların CNC Frezeleme İşlemlerinin İncelenmesi

CNC makineleri ile yapılan frezeleme işlemleri, metal alaşımlı malzemelerin işlenmesinde etkin ve verimli bir şekilde kullanılan işleme operasyonlarından biridir. CNC makineleri, dekoratif ürün imalatında el işçiliğine göre daha hassas, kaliteli, hızlı ve üç boyutlu oldukları için daha çok tercih edilmektedir. Bu sebeple doğal taş sektöründe CNC makinelerin kullanımı gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Fakat doğal taş sektöründe mermerlerin CNC kullanılarak işlenmesi çok yeni bir alandır. Bu alanda yapılan çalışmalar hem ulusal hem de uluslararası olarak çok az olup sektörün ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır.

Cserta ve Gyurika (2021) granit yüzeylerinin frezelemesi sırasında granit minerallerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Granit numuneleri ortalama tane boyutuna göre sınıflandırılmış ve her referans doğaltaş grubunda yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Granitlerdeki minerallerin mikro sertliği, yönelimi ve numunedeki yüzdesel bileşimi gibi faktörlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Özkan ve Öz (2021) CNC ile kireçtaşlarının yüzey kalitesini iyileştirmek için Taguchi deney tasarımıyla en uygun işleme parametrelerini belirlemeyi amaçlamışlardır. a_p 'nin yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen parametre olduğunu, mineral tane boyutu ve çatlak genişliğinin yüzey kalitesini etkilediğini ifade etmişlerdir.

Sarıışık (2021) CNC tezgâhında 3D mermer ürünlerin işlenmesinde işlenebilirlik indeksini incelemiş ve parametrelerin malzeme özellikleriyle ilişkisi araştırılmıştır. Kesme kuvvetleri ve özgül enerji istatistiksel olarak modellenmiş, K-Ortalamalar Kümeleme Analizi (K Means Clustering) yöntemiyle işlenebilirlik indeksi belirlenmiştir. a_p ve f parametreleri işlenebilirliği en çok etkileyen faktörlerdir. İnce taneli ve mikro gözenekli mermerlerin düşük enerjiyle verimli şekilde işlenebildiği sonucuna varılmıştır.

Yin vd. (2021) taş kesme ve robotik işleme makinelerinin (Stone Cutting and Robotic

Machining (SCRM)) zayıf rijitlikten kaynaklanan frezeleme hatalarını tahmin ederek bir hata düzeltme yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada SCRM'nin küresel rijitlik ve frezeleme kuvveti modeli ile işleme hatası ve frezeleme derinliği çoklu iterasyon ile tahmin edilmiştir. Bir hata düzeltme stratejisi ile mermer frezeleme hataları azaltılmıştır.

Lu vd. (2020) çalışmalarında, çok katmanlı elmas kaplamalı bir kesici takım kullanılarak beyaz mermer kesimi sırasında takım aşınmalarındaki sorunları araştırmıştır. Çok katmanlı elmas kaplama, sıcak filamentli kimyasal buhar biriktirme (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) yöntemiyle karbürden yapılmış küresel uçlu frezeleme takımının yüzeyine uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık kesme verimliliğini düşürmüş olup elektrolize kaplanmış takımlar daha çabuk aşınırken, sinterlenmiş takımlarda dayanıklı malzeme kullanımı önerilmiştir.

Özkan ve Öz (2020) CNC ile mermer işleme sırasında yüzey kalitesini iyileştirmek için Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak uygun işleme parametrelerini belirlemişlerdir. S/N oranı ve varyans analizi ile parametrelerin etkileri incelenmiştir. a_p ve f yüzey kalitesini en çok etkileyen parametreler olmuştur. Düşük a_p 'nin genelde en iyi yüzey kalitesini sağladığını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2020a) farklı matris kompozisyonlarına sahip iki elmas segmentin aşınma özelliklerini iki farklı kesim modu (salınlı ve yatay doğrusal) altında karşılaştırarak incelemiş ve aşınma mekanizmalarını araştırılmıştır. Çalışmada, salınlı kesim modu, kesim uzunluğunu ve süresini azaltmış, bununla birlikte elmas parçacıklarının kırılması ve kopması ana aşınma mekanizmasını oluşturulmuştur. Kobalt bazlı segmentler, elmas parçacıklarını daha sıkı bağlayarak aşınmayı azaltmış ve parçacıkların daha uzun süre çalışması sağlanmıştır.

Wang vd. (2020b) mermerin kaplamalı karbür küresel takımlar ile yüksek hızlı frezeleme sürecinde farklı V_c ve f değerlerinin F_x , F_y , F_z , talaş oluşumu ve MRR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. F_x , F_y , F_z değerleri f arttıkça artarken, V_c arttıkça azalmıştır. Talaş parçacık boyutu, f 'le artarken, V_c ile azalmıştır. F_x , F_y , F_z ile talaş oluşumu arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmuştur.

Arunramnath vd. (2019) çalışmalarında epoksi granit kompozitlerin yüksek hızlı çelik (HSS, High Speed Steel) freze takımı ile işlenmesi sırasında işleme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Fr, Ft ve yüzey pürüzlülüğü analiz edilerek optimal işleme parametreleri TOPSIS yöntemiyle belirlenmiştir. Taguchi yöntemi her çıktı için farklı optimal parametreler sunarken, TOPSIS yöntemi tüm çıktılar için tek bir optimal çözüm sağlamıştır. Parametre optimizasyonunda TOPSIS yönteminin belirsizliği azaltarak daha tutarlı sonuçlar sunduğunu göstermişlerdir.

Gyurika ve Szalay (2019) frezeleme sırasında değişken kesme hızının granit yüzeylerin kenar kalitesine etkisini ve yüzey pürüzlülüğü ile kenar kırılma oranı arasındaki ilişkiyi tespit etmeye çalışmışlardır. Farklı kesme hızlarında frezeleme sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kenar kırılma oranındaki değişimleri analiz etmişlerdir. Kesme hızındaki değişikliklerin, yüzey pürüzlülüğündeki değişimle paralel olduğunu ortaya koymuşlardır.

Gyurika (2018) granit yüzeylerinin kenarlarında frezeleme işlemi sırasında oluşan kırılma hasarlarını en aza indirmek için öneriler geliştirmişlerdir. Farklı f ve elmas tane boyutlarında freze takımlarla işlenen granitlerin kenar kırılmaları analiz edilmiştir. Elmas tane boyutunun küçülmesi kenar kırılmalarını azaltırken, ilerleme hızındaki azalma belirli bir limite kadar kırılmayı düşürmüştür ancak bu limitin altına inildiğinde kırılma oranında artma meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Li vd. (2018) kaya ile kesici arasındaki etkileşimi inceleyerek kaya kesme süreçlerinin verimliliğini artırmaya çalışmışlardır. Parçacık Tabanlı Sayısal Manifold Yöntemi (Particle-Based Numerical Manifold Method) kullanılarak kaya kesme işlemleri farklı kesme derinliklerinde simüle edilmiştir. Kaya kesme verimliliğinin kesme derinliğiyle artırılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Sarıışık ve Özkan (2018) doğal taşların işlenebilirliğini etkileyen kuvvet değerleri, SE ve spesifik kesme enerjisi (Sc) üzerindeki kesme parametreleri ve fiziksel-mekanik özelliklerin etkisini araştırmışlardır. a_p ve f ile fiziksel-mekanik özelliklerin kuvvet değerleri, Se ve Sc üzerinde anlamlı ilişkiler olduğunu belirtmişlerdir.

Sarıışık ve Özkan (2017) CNC ile mermerlerin işlenmesinde kesme parametreleri ile mermerlerin fiziksel-mekanik özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Farklı mermer türlerinde karbür kesici takımlarla deneyler yapılarak, ANOVA ve regresyon analizleri uygulanmışlardır. a_p ve f parametrelerinin mermerlerin işlenmesinde F_r , F_t , spesifik kesme enerjisini anlamlı şekilde etkilediği belirtmişlerdir.

Guangyu vd. (2016) çalışmalarında, doğal taşların frezeleme sürecinde kesme kuvvetlerini optimize etmek amacıyla Deform-3D yazılımı kullanılarak bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. V_c , f ve a_p gibi parametrelerin kesme kuvvetine olan etkisi analiz edilmiştir. Yüksek V_c ve f değerleri ile düşük a_p , kesme kuvvetlerini (F_x , F_y , F_z) azaltarak yüzey kalitesini arttırdığını ve oluşturulan simülasyon modeli ile kesme kuvvetlerini doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir.

Sarıışık ve Özkan (2016) işleme türü, a_p ve f parametrelerinin frezeleme süresince, mermerlerin işlenebilirliği, kesme kuvvetleri ve SE üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 5 farklı mermer türünde karbür parmak freze kullanılarak deneyler yapılmış, ANOVA analizi ile sonuçlar değerlendirilmiştir. İşleme türü, a_p ve f değişkenlerinin mermerlerin işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemiştir. a_p arttıkça SE azalırken, işlenebilirlik zorlaşmıştır.

Uhlmann ve Manthei (2015) doğal taşların frezelemesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, talaş oluşumu ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Carrara Mermeri, kesme parametreleri yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumunu etkilemiş olduğunu, düşük f ve a_p 'nin daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Postaer Kumtaşı, yapısı nedeniyle işlem parametrelerinden etkilenmediğini belirtmişlerdir.

Gálos ve Gyurika (2014) granitlerin frezelenirken kenar kırılmalarını ölçen ve sınıflandıran bir sistem geliştirmişlerdir. Lazer tarayıcılar kullanılarak kenar kırılma derinliği ve hacim kaybı ölçülmüş, frezeleme sonucu oluşan kırık parçaların geometrik şekilleri yüksek doğrulukla tanımlanmıştır.

Zhao vd. (2014) CVD kompozit kaplamalı takım ile mermerlerin yüksek hızlı frezeleme sürecinde F_x , F_y , F_z ve takım aşınma mekanizmaları incelenmiştir. F_x , F_y , F_z

değerlerinin a_p ve f arttıkça yükseldiği, iş mili hızı arttıkça ise azaldığı belirlenmiştir. a_p nin F_x , F_y , F_z üzerinde en büyük etkiye sahip olmuştur. Aşınma türleri; mekanik kayıp, oksidasyon aşınması ve yapışma aşınması olarak tanımlanmıştır.

Turchetta (2012) doğal taşların işlenmesinde elmas kaplı kesici diskler için F_r , F_t ve enerji tahmini yapabilen modeller geliştirilmiştir. F_r , F_t , enerji ve talaş kalınlığı arasındaki ilişkiler analiz etmişlerdir. Geliştirilen modelin, F_r , F_t ve enerji bileşenlerini tahmin edebildiği, takım aşınmasına göre kesme koşullarını optimize etmek için uygulanabilir olduğu ortaya koyulmuştur.

Kenda ve Kopač (2009) doğal taşların işlenmesinde kullanılan elmas takımların yapısı, takım aşınması ile performans etkilerini incelemiştir. Elmas taneleri, matris sertliği, su soğutma ve işleme sürecinin kalite ve verimliliğe etkilerini analiz edilmiştir. Elmas tanelerinin kısa sürede kopması, bağlayıcıda ciddi aşınmalara neden olduğunu, zamanında ayrılmasının ise takımın verimliliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Turchetta vd. (2009) doğaltaş frezelemede F_r , F_t ve enerji ile talaş boyutu arasındaki ilişkiyi inceleyerek işleme süreçlerini optimize etmek için bir model geliştirmiştir. Elektrolize elmas freze takım kullanılarak geliştirilen model, kesme enerjisi ve proses parametreleri arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde tanımlamış ve farklı taş türleri için kesme koşullarını optimize etmede kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Doğaltaş işleme alanında, özellikle mermerlerin frezelemesi, takım seçimi ve performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatür incelendiğinde, frezeleme işlemlerinde yaygın olarak tungsten karbür kaplamalı veya elektrolize yöntemle kaplanmış elmas takımların kullanıldığı görülmüştür. Mevcut takımlar doğaltaşın zorlu yapısına karşı belirli bir dayanım gösterse de, sektörün artan kalite ve verimlilik talepleri doğrultusunda yeni alternatiflere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de ilk kez bu alanda uzmanlaşmış bir firma tarafından vakumlu sert lehimleme yöntemiyle üretilen elmas freze takımlar kullanılarak bu takımların kesme performansının detaylı olarak incelenmiştir. Mermerlerin frezeleme operasyonlarında yeni imal edilen takımların dayanıklılığını, kesme hassasiyetini ve genel performansını, kesimlerin daha doğru ve

istenen ölçülere uygun olmasını sağlamak ve kesme mekanizmasını daha iyi anlamak amacıyla etkileri araştırılmıştır.

2.2 Doğaltaş Frezeleme Süreçlerinin Modellenmesi

Mermer işleme teknolojilerinin endüstriyel uygulamaları yaygınlaşmasına rağmen, literatürde mermer frezeleme işlemlerinin modellenmesini inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Özellikle frezeleme parametrelerinin optimizasyonu ve modellenmesi konusunda az sayıda çalışma olduğu görülmüştür.

Yin ve Zhang (2024) doğal taş rölyeflerinin işlenmesinde kontur hatasını azaltmak amacıyla V_c , f , a_p ve a_e gibi işleme parametrelerini optimize etmeye çalışmışlardır. Çalışmada, RSM ile kontur hatası tahmini için regresyon modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca, rölyefin farklı kontur özelliklerine göre dört işleme özelliği tanımlanmış ve her biri için ayrı parametre optimizasyonu yapılmıştır. Önerilen yöntem, geleneksel yöntemlere göre kontur hatasını azaltırken, işleme süresini bir miktar artırmıştır.

Yin vd. (2022) doğaltaşların robotik taşlama işlemi sırasında R_a için tahmin modelleri oluşturulmuş ve işleme parametrelerini optimize etmişlerdir. Grid Search ve Balina Optimizasyon Algoritması ile optimize edilen modeller karşılaştırılarak işleme performansları değerlendirilmiştir. Çalışmada geliştirilen R_a için tahmin modelleri yüksek doğrulukla başarılı bulunmuştur.

Wu vd. (2022) doğal taş-plastik kompozitlerin işleme kalitesini artırmak için RSM, ikili analiz ve mikro analiz yöntemleri kullanılarak frezeleme parametrelerini optimize etmiştir. Minimum R_a elde etmek hedeflenmiş ve yüzey hasar oranı ile R_a arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. RSM kullanılarak geliştirilen tahmin modeli, R_a değerini başarıyla tahmin etmiştir.

Wu vd. (2021) doğal taş-plastik kompozitlerin işleme verimliliğini artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için RSM kullanılarak, F_x , F_y ve kesme sıcaklığını analiz ederek optimal kesme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Kesme kuvvetleri ve sıcaklık

için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kesme kuvvetleri iş mili hızı ve ön açısı arttıkça azalırken; ilerleme hızı ve kesme derinliği arttıkça yükselmiştir. RSM analizi sonucunda, matematiksel modeller yüksek doğruluk sağlamış ve optimum parametreler belirlenmiştir.

Zhu vd. (2020a) doğal taş-plastik kompozitin helisel frezeleme sırasında yüzey pürüzlülüğü ve hasar mekanizmalarını inceleyerek optimal işleme koşullarını belirlemeye çalışmışlardır. RSM kullanılarak R_a ile kesme parametreleri arasındaki ilişki modellenmiş ve varyans analizi ile faktörlerin etkileri değerlendirilmiştir. R_a 'nın f ve a_p ile pozitif, helisel açısı ve V_c ile ters orantılı bir ilişkili olduğu bulunmuştur.

Zhu vd. (2020b) doğal taş-plastik kompozitin işlenmesinde elmas kesici, takım geometrisi ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, RSM kullanılarak helisel açısı, V_c , f ve a_p faktörlerinin kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkileri matematiksel modellerle analiz edilmiş, varyans analizi ile faktörlerin etkileri değerlendirilmiştir. Oluşturulan modeller doğrulanmış ve optimum işleme parametreleri belirlenmiştir.

Zhu vd. (2020c) doğaltaş-plastik kompozitlerin konik frezeleme sırasında kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, RSM ile bu değişimlerin analizi yapılmış ve matematiksel modeller geliştirilerek doğrulanmıştır.

Mermer frezeleme işlemlerinde, işleme kalitesini artırmak, üretim maliyetlerini düşürmek ve işleme verimliliğini optimize etmek amacıyla çeşitli modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Literatürde, özellikle RSM ve regresyon modelleri işlem parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkilerini analiz etmek ve optimal işleme koşullarını belirlemek amacıyla tercih edilmiştir. Güncel araştırmalar incelendiğinde, özellikle kesici takım performansının değerlendirilmesinde, kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve takım ömrü gibi kritik performans parametrelerinin modellenmesinde RSM'nin başarıyla uygulandığı görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan freze takımlar, mermer işleme teknolojisinde önemli bir yeniliği temsil etmektedir. Bu yenilikçi üretim yöntemiyle elde edilen freze takımının performans

karakteristiklerinin belirlenmesi ve optimal çalışma koşullarının tespit edilmesi hem akademik literatür hem de endüstriyel uygulamalar açısından kritik öneme sahiptir. Çalışmada, VBD takımlar ile yapılan mermer frezeleme işlemlerinin RSM ile modellenmesi, mermer frezeleme işlemlerinin modellenmesi ve optimizasyonu konusunda bilimsel ve uygulamaya yönelik pratik çözümler sunulmuştur.

2.3 CNC ve Frezeleme İşlemleri

CNC, bilgisayarın makine takımının (freze, torna, matkap vb.) bir veya daha fazla ekseninin hareketini elektronik olarak kontrol ettiği sistemdir. CNC teknolojisi, 1950'lerde ABD Hava Kuvvetleri tarafından jet uçak parçalarının karmaşık üretim ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle, CNC daha esnek ve çok eksenli hareket kabiliyeti sağlayarak 2D ve 3D kontürleme yetenekleri kazanmıştır. CNC makineleri, pozisyonlama, delme, çizgi kesme, yay kesme, yüzey temizleme, cep boşaltma, kontur kesme gibi çeşitli işleme döngüleri sunar. Ayrıca, ölçekleme, yansıtma ve döndürme gibi işlevlerle parça özelliklerinin tekrarlanmasını sağlar. CNC üretimi, özellikle seri üretimdeki basit parçalar ve çok eksenli hareket gerektiren karmaşık parçalar için avantajlıdır. CNC makineleri, tasarımlarındaki rijitlik, güçlü motorlar, yüksek basınçlı soğutma sistemleri, otomatik takım değiştiriciler ve dijital prob sistemleriyle modern üretimde yüksek verimlilik sağlar. Bununla birlikte, yüksek başlangıç maliyeti, büyük alan ve elektrik gereksinimleri, artan bakım maliyetleri ve programlama becerisi ihtiyacı gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, CNC makinelerinin doğruluğu, makinenin yaşı, tasarımı ve bileşen seçimi gibi faktörlere bağlıdır (Bagnal 2022, Ford 2016, Haynes 2015, Nee 2015, Altintas 2012).

Endüstrinin amacı, düşük maliyetlerle yüksek kaliteli ürünler üreterek pazarda rekabet avantajı sağlamaktır. CNC tezgâhlar, hızlı, kaliteli ve düşük maliyetli üretim imkânı sunarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Frezeleme, dönme hareketiyle talaş kaldırma işlemi olup, tezgâh, takım ve iş parçası açısından farklılıklar gösterir. CNC tezgâh seçimi, frezeleme yönteminde kritik bir öneme sahiptir. Tezgâhın tipi, gücü, kapasitesi ve uygulanacak yöntem gibi faktörler doğru seçimde dikkate alınmalıdır. Yanlış tezgâh seçimi, işlem süresini uzatarak yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. CNC

tezgâh seçiminde, yapılacak imalata uygun, teknolojik olarak güncel ve özellikleri gelişmiş tezgâhlar tercih edilmelidir. Tezgâhların yazılımlarla uyumlu, bakım ve teknik destek konusunda güvenilir, ayrıca optimizasyona ve geliştirmeye açık olması önemlidir. Frezeleme, takımın dönme hareketiyle sabit bir malzeme üzerinden talaş kaldırma işlemidir. CNC tezgâhları, düz yüzeyler, şekilli yüzeyler ve kanallar gibi işlemleri bilgisayar programlarıyla otomatik olarak gerçekleştirebilir. CNC makineleri; delme, torna, freze, ahşap oyma gibi birçok işlem yapabilir ve genellikle en az 3 ekseninde çalışır. Frezeleme işlemleri, genel olarak çevresel frezeleme (peripheral milling) ve alın frezeleme (face milling) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Çevresel frezeleme işlemlerinde, takımın ekseni işlenen yüzeye paralel konumda bulunur ve kesme işlemi freze bıçağının dış çevresiyle gerçekleştirilir. Alın frezeleme (face milling) işlemlerinde ise takımın ekseni işlenen yüzeye dik konumdadır ve kesme işlemi hem bıçağın uç kısmındaki hem de çevresindeki kesici dişlerle gerçekleştirilir. Frezeleme işlemleri, modern üretim süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Çevresel freze ve alın frezesi gibi farklı türleri, çeşitli uygulamalara ve iş parçası gereksinimlerine göre esneklik sunar. Her bir frezeleme türü, belirli bir amaca hizmet ederken, iş parçasının boyutu, şekli ve malzemesi gibi faktörler de makine seçiminde önemli bir etken olarak öne çıkar. Bu nedenle, uygun frezeleme yöntemi ve makinesi seçimi hem verimliliği artırmak hem de kaliteli sonuçlar elde etmek için hayati öneme sahiptir. Sonuç olarak, frezeleme teknolojisinin sürekli gelişimi, endüstride daha karmaşık ve hassas parçaların üretilmesine olanak tanımakta ve bu alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır (Bagnal 2022, Chattopadhyay 2017, Ford 2016, Haynes 2015, Nee 2015, Altintas 2012).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deneysel Donanım ve Cihazlar

Bu çalışmada, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü bünyesindeki doğal taş sektöründe yaygın olarak kullanılan Megatron Marka 4 Eksenli Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi kullanılmıştır. İşleme makinesine ait görsel Resim 3.1’de, verilmiştir. CNC makinesi 9 kW’lık motor gücüne, 24000 dev/dk motor devrine sahiptir. İşleme alanı 2000x3000x600 mm ebatlarındadır.

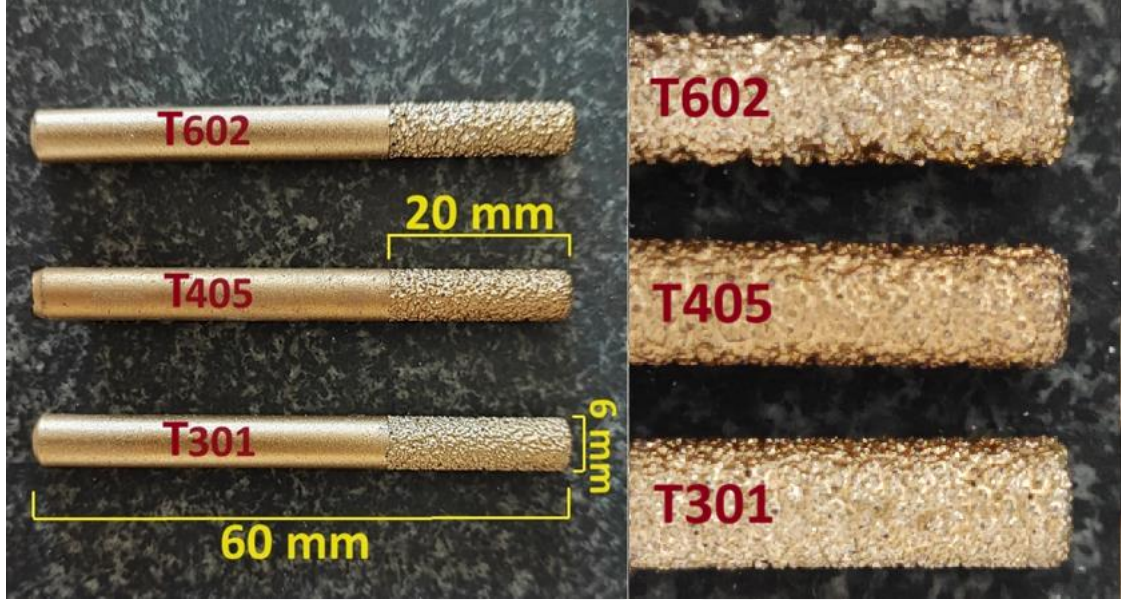


Resim 3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi.

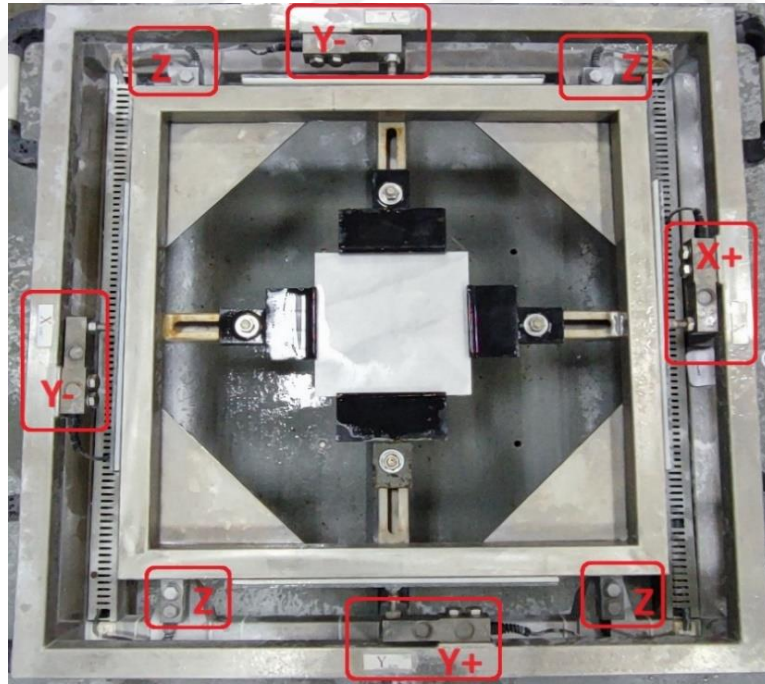
CNC doğal taş işleme makinesindeki deneyler için vakum lehimleme teknolojisi ile yeni bir ürün olarak geliştirilen VBD freze takımları kullanılmıştır. Bu takımlar 6 mm çapında olup toplam uzunluğu 60 mm olan takımın 20 mm’lik kısmı elmas ile kaplıdır. Deneylerde elmas tane büyüklükleri 40/50 mesh (T301 kodlu takım), 35/45 mesh (T405 kodlu takım) ve 25/35 mesh (T602 kodlu takım) olan üç farklı takım kullanılmıştır. Freze takımların görseli Resim 3.2’de verilmiştir.

Frezeleme işlemi süresince kuvvet verilerinin alınması CNC yük ölçer test cihazı ile eş zamanlı çalışan Defne Lab Soft programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu verilerin toplanma sistemi, CNC Makinesindeki deney sehpası (Resim 3.3) üzerinde yerleşik olarak bulunan

yük hücreleri ve veri toplama cihazı (Resim 3.4) ile Defne Lab Soft programından oluşmaktadır.



Resim 3.2 Vakumla sert lehimlenmiş elmas kaplamalı freze takımlar.



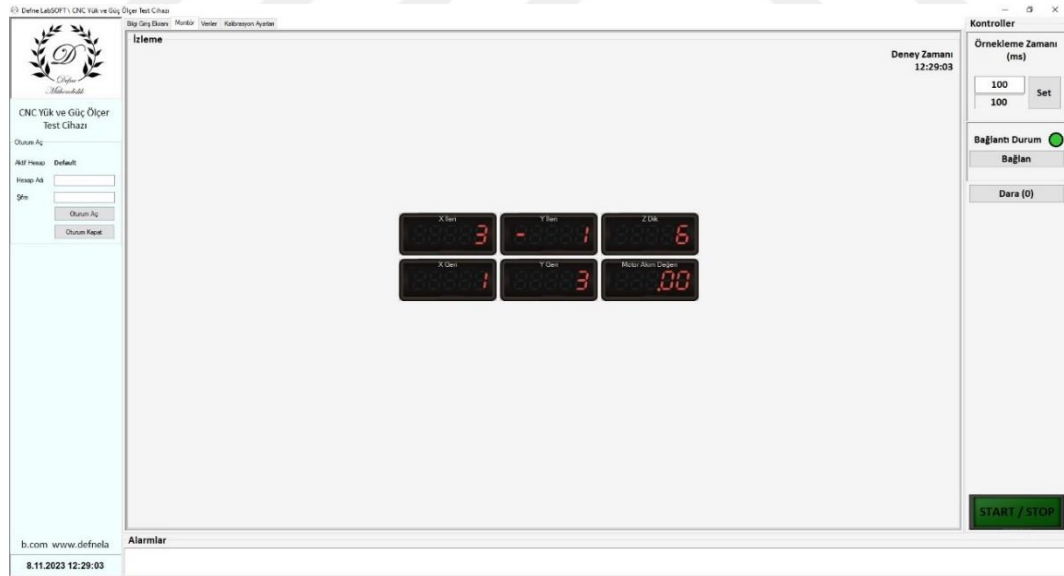
Resim 3.3 CNC Makinesindeki yük ölçer sehpa.

Test cihazında kuvvetlerin tespiti amacıyla deney sehpası üzerinde bulunan 4 tane Z eksenindeki kuvvetlerin ölçülmesi, 4 tane de X ve Y eksenlerindeki kuvvetlerin ölçülmesi için toplam 8 adet yük hücresi (ESİT BS model dinamometre) kullanılmıştır.



Resim 3.4 Yük ölçen veri toplama PLC cihazı.

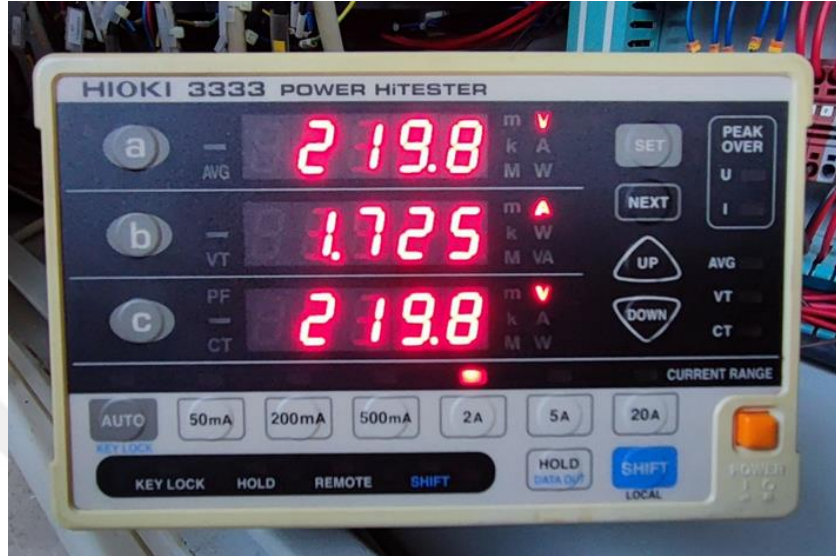
PLC cihazından gelen işlenmiş bilgiler Defne Lab soft (Resim 3.5) CNC yazılımına aktarılmaktadır. Ölçümlerden düzgün ve sağlıklı sonuçlar alınabilmesi için yapılacak tüm işlemler oldukça dikkatli ve sistemli bir şekilde yapılmıştır.



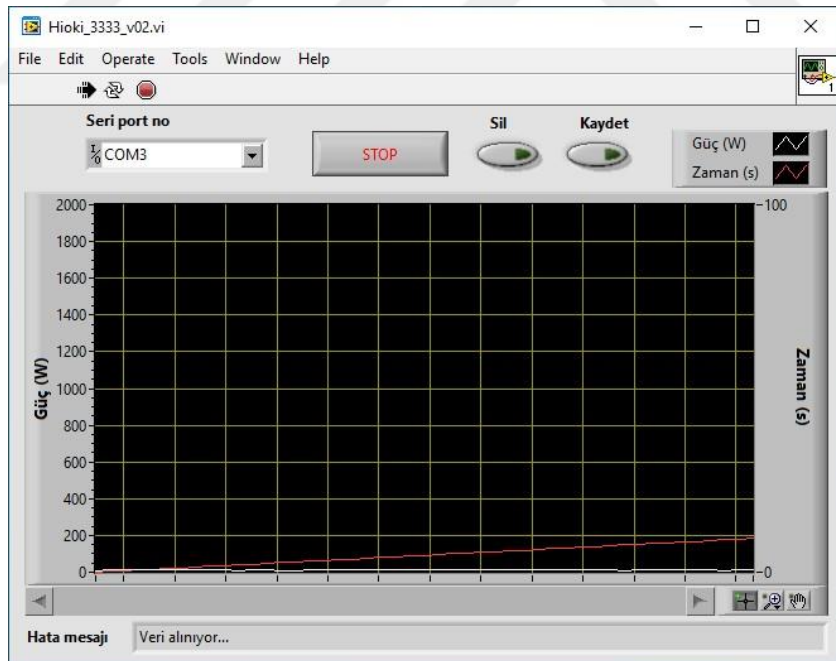
Resim 3.5 Defne Lab soft yazılımı.

F_x , F_y , F_z (N) verileri, 100 ms hassasiyetle ölçümler yapılarak deney sırasında kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Defne Labsoft yazılımında çevrilen ve sisteme girilen bu değerler ve bilgiler deney bitiminde Excel tablosu olarak kaydedilmiştir.

Enerji ölçümleri CNC makinesi üzerinde bulunan Hioki marka yüksek hassasiyetli enerji analizörü (Resim 3.6) ile yapılmıştır. Ölçüm değerleri Hioki yazılımı (Resim 3.7) üzerinden alınarak kaydedilmiştir.



Resim 3.6 Hioki yüksek hassasiyetli enerji analizörü.



Resim 3.7 Hioki Software yazılımı.

UNIT UT315A model titreşim test cihazı ve UNIT UT 352 ses seviyesi ölçer cihazı (Resim 3.8) CNC makinesi ve sehpa üzerine yerleştirilmiş, frezeleme işlemleri süresince aralıksız olarak sürekli veri kaydı alınmıştır.

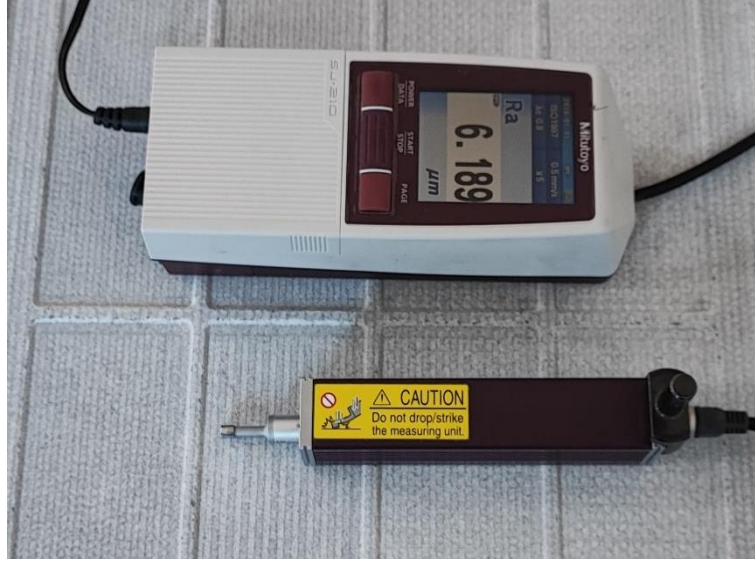
UNIT UT315A model titreşim data işleyici makine üzerinde, cihazın manyetik mandren yüksek hassasiyetli prob numune işleme sehpası üzerine yerleştirilmiştir. Frezeleme işlemleri süresince iş parçasındaki yerdeğiştirme ($1 \sim 1999 \mu\text{m}$ cihaz hassasiyeti) ölçümleri yapılmıştır.

UNIT UT 352 ses seviyesi ölçer cihaz ile sürekli olarak dB cinsinden ses seviyesi ölçümü yapılabilmesi için işleme sehpasına sabit bir noktada konumlandırılmıştır ve veri kaydı alınmıştır. Deneyler boyunca yer değiştirme ve gürültü ölçümleri sürekli kaydedilmiştir.



Resim 3.8 Unit UT315A titreşim ve Unit UT 352 gürültü ölçüm cihazları.

Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SJ-210 model (Resim 3.9) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri deney modeli ile oluşturulan her bir işlem yüzeyi üzerinde Ra pürüzlülük değerleri alınmıştır.



Resim 3.9 Mitutoyo SJ-210 model pürüzlülük cihazı.

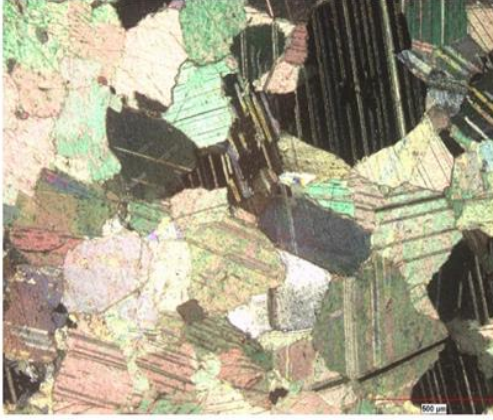
3.2 Deney Numuneleri ve Karakteristik Özellikleri

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki mermer ocaklarından elde edilen metamorfik kökenli kayalar incelenmiştir. Afyon Beyaz (AB) mermeri, Afyon Gri (AG) mermeri, Bursa Beyaz (BB) mermeri, Marmara Beyaz (MARB) mermeri, Muğla Beyaz (MUB) mermeri ve Uşak Beyaz (UB) mermeri deneylerde kullanılmıştır. Mermerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri analiz edilmiştir. Numunelerin mineralojik bileşimi elektron mikroskop Nikon Eclipse 2V100POL (Resim 3.10) ile incelenmiştir.

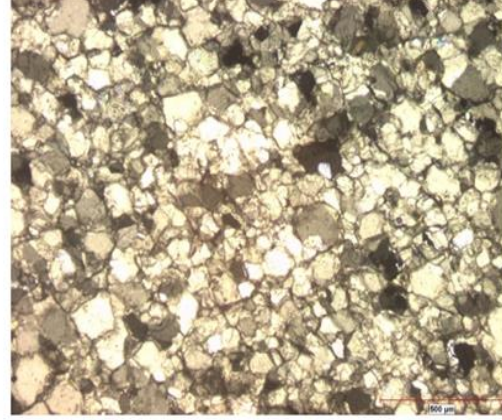


Resim 3.10 Nikon Eclipse 2V100POL elektron mikroskop ile ince kesit analizi.

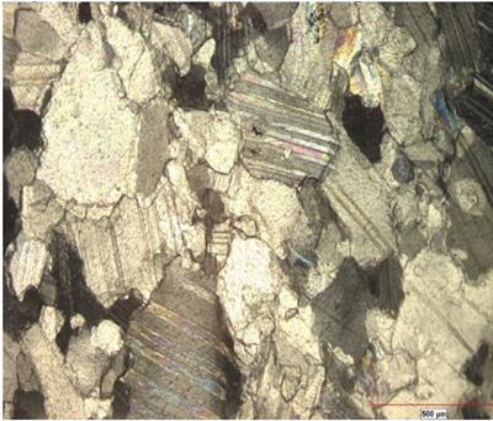
Petrografik analiz için hazırlanan ince kesitler mikroskop altında mineral bileşenlerini tanımlayarak her mermerin mineralojik yapısı, kristal boyutları, şekilleri ve dağılımları incelenmiştir. Elektron mikroskobu altında elde edilen ince kesit görüntüleri Resim 3.11’de gösterilmiştir. Mermerlerin mineralojik ve petrografik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



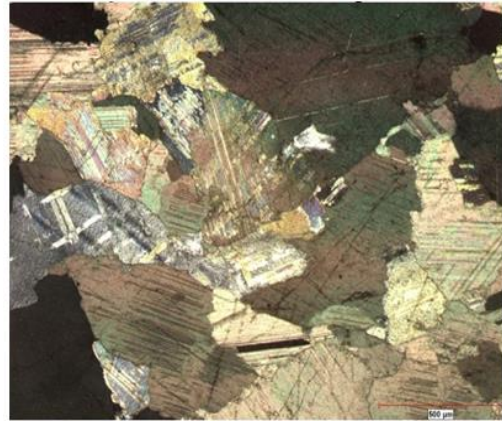
AB Mermer ince kesit görüntüsü



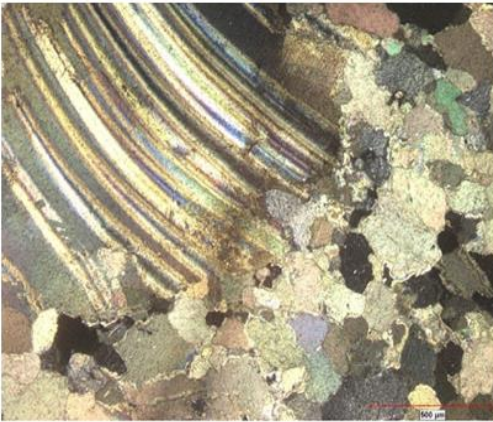
MARB Mermer ince kesit görüntüsü



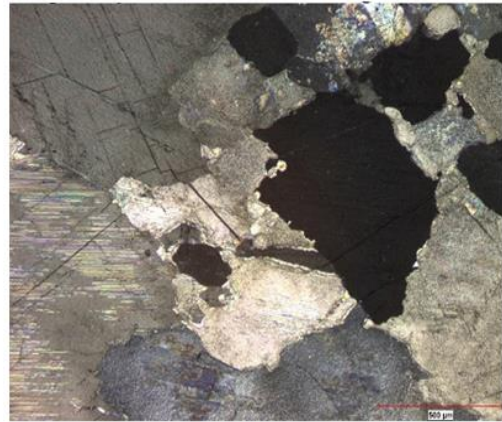
AG Mermer ince kesit görüntüsü



MUB Mermer ince kesit görüntüsü



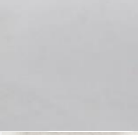
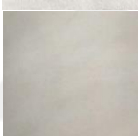
BB Mermer ince kesit görüntüsü



UB Mermer ince kesit görüntüsü

Resim 3.11 İnce kesit görüntüleri.

Çizelge 3.1 Mermerlerin mineralojik ve petrografik özellikleri.

Numuneler	Numunelerin Görüntüleri	Mineral Dağılımı	Doku	Tane Genişliği (µm)			Doku Katsayısı (TC _{ort.})
				Minimum	Maksimum	Ortalama	
AB Mermer		% 99,44 CaO	Kristalin	12,5	802,7	206,7	1,55
AG Mermer		% 97,57 CaO	Kristalin	45,1	1766,6	340,6	1,22
BB Mermer		% 98,94 CaO	Granoblastik	5,5	1002,1	123,0	1,33
MARB Mermer		% 72,9 CaO % 26,5 MgO	Kristalin	24,4	151,3	88,0	1,27
MUB Mermer		% 98,74 CaO	Kristalin	33,1	2159,3	475,2	1,36
UB Mermer		% 98,57 CaO	Kristalin	37,9	1624,8	501,7	1,29

İnce kesiti üzerinde mineral bileşenlerinin dağılımını ve oranını belirlemek için doku katsayıları incelenmiştir. İnce kesit görüntülerinden tanelerin yapısına bağlı olarak doku katsayısı değeri Eşitlik 3.1 ile hesaplanmıştır (Howarth ve Rowlands 1987).

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \right) x \frac{1}{FF_0} \right] x \left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \right) x AR_1 AF_1 \quad (3.1)$$

TC: Doku katsayısı

AW: Tane yığılma aralığı

AR: Tüm tanelerin uzunluk-genişlik oranlarının ortalaması

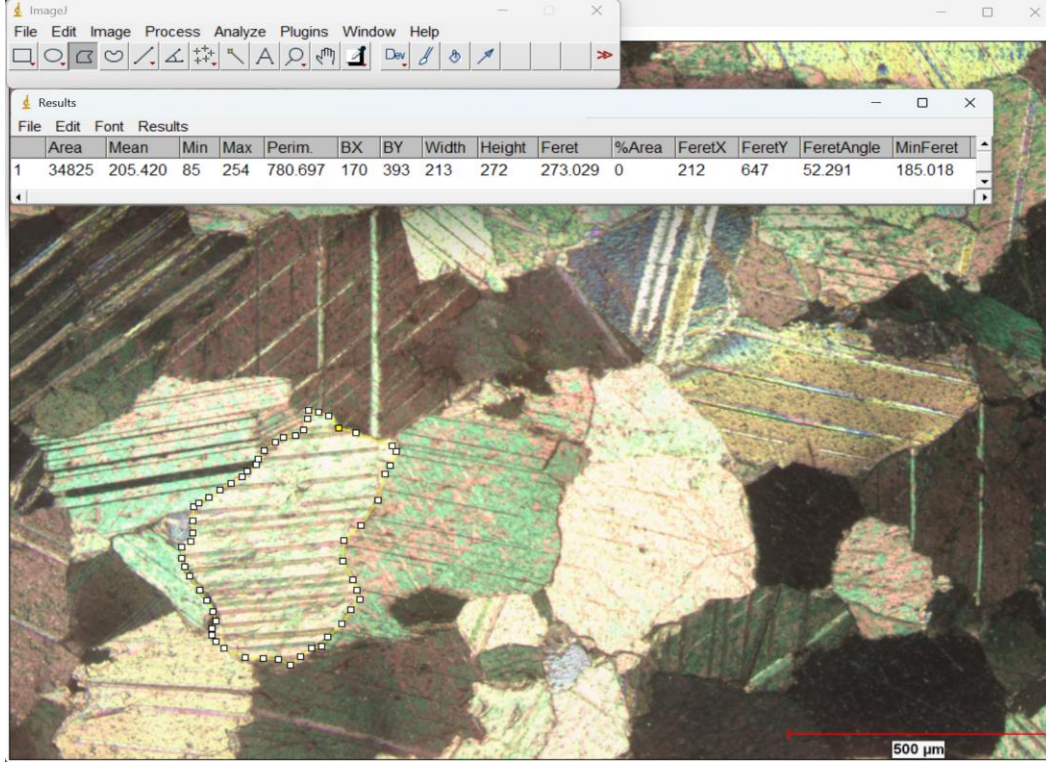
N₀: AR değeri 2' den küçük tane sayısı

N₁: AR değeri 2' den büyük tane sayısı

FF₀: AR değeri 2'den küçük tanelerin şekil faktörü değerlerinin ortalaması

AF₁: Açık faktörü

İnce kesiti üzerinde mineral bileşenlerinin dağılımını ve oranını belirlemek için doku katsayısı değerleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Görüntüleri işleme ve analiz etmeye yönelik Java tabanlı ve açık kaynak kodlu geliştirilmiş bir yazılım olan ImageJ programı (Resim 3.12) kullanılmıştır.



Resim 3.12 ImageJ programında görüntü analizinin gösterimi.

Deney numunelerinin XRF (X-ray Fluorescence) analizi, mineral bileşenlerinin nitelik ve nicelik olarak detaylı bir şekilde belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir mermer örneği titizlikle hazırlanarak aynı ortam şartlarında analizler yapılmıştır. Numunelerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Deney numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Fiziksel deneyler kapsamında; her bir mermer örneği için yoğunluk, su emme oranı ve porozite kriterleri ölçülmüştür. Mekanik deneyler ise, mermerlerin dayanım özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüzey sertlikleri ve aşınma direnci testleri uygulanmış, elde edilen veriler Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 XRF analiz sonuçları (TS EN 15309).

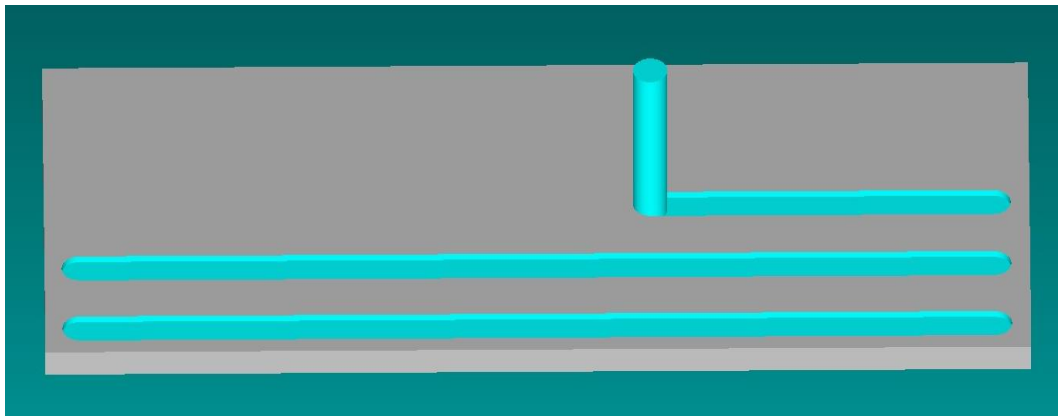
	Na₂O (%)	MgO (%)	Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	P₂O₅ (%)	SO₃ (%)	K₂O (%)	CaO (%)	Fe₂O₃ (%)	SrO (%)	F (%)	Cl (%)	ZnO (%)	MnO (%)
AB Mermer	0,017	0,353	0,037	0,097	0,009	0,006	-	99,436	0,026	0,020	-	-	-	-
AG Mermer	-	1,268	0,510	0,467	0,024	0,004	0,076	97,574	0,054	0,024	-	-	-	-
BB Mermer	0,025	1,426	0,192	0,215	0,017	0,018	0,011	97,774	0,089	0,042	0,192	-	-	-
MARB Mermer	0,028	26,556	0,094	0,268	0,025	0,015	0,009	72,919	0,037	0,037	-	0,006	0,009	-
MUB Mermer	-	0,902	0,038	0,155	0,008	0,003	0,005	98,740	0,093	0,031	-	-	-	0,025
UB Mermer	0,033	1,086	0,034	0,139	0,009	0,015	-	98,565	0,051	0,045	-	0,023	-	-

Çizelge 3.3 Numunelerin fiziko-mekanik özellikleri.

	Porozite (%)	Yoğunluk (kg/m ³)	Atmosfer basıncında su emme (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı (MPa)	Aşınma Direnci (mm)	Knoop Sertliği (HK)
Mermer Cinsi	TS EN 1936	TS EN 1936	TS EN 13755	TS EN 1926	TS EN 12372	TS EN 14157	TS EN 14205
AB	0,2	2760	0,1	77	12,8	24,6	141
AG	0,3	2934	0,05	92	14,6	18,6	133
BB	0,5	2823	0,1	80	13,1	21,1	144
MARB	0,2	2751	0,1	70	10,9	18,4	157
MUB	0,6	2871	0,1	106	9,0	18,2	140
UB	0,3	2660	0,1	79	13,7	20,4	145

3.3 Deney Tasarımı

Deneylerdeki işlem parametreleri; 1500, 2250, 3000 mm/dk f ile 6000, 9000 ve 12000 devir/dakika Vc olarak seçilmiştir. Önceki çalışmalardan elde edilmiş olan tecrübelerle göre, nihai yüzey frezeleme işleminde en uygun a_p 1 mm olduğu tespit edildiği için a_p 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Frezeleme işlemi tam kesim şeklinde yani freze takım Resim 3.13' teki gibi kesici takım çapı tamamen malzeme yüzeyine dalış yapmakta ve doğrultu boyunca oluk açarak kesme yapmaktadır.



Resim 3.13 Freze işleminde tam kesim gösterimi.

Frezeleme işlemi için daha önceki çalışmalardan elde edilmiş olan deneyimlerde de referans alınarak Çizelge 3.4'te listelenen işleme parametrelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. 200x200x20 mm ebatlarındaki numuneler ile çalışılmıştır.

Çizelge 3.4 İşlem parametre ve seviyeleri.

Parametreler	Seviler		
Elmas Takım Kodu	T301	T405	T602
İş Mili Devri (dev/dk)	6000	9000	12000
İlerleme Hızı (mm/dk)	1500	2250	3000
Kesme Derinliği (mm)	1		
Kesme Genişliği (mm)	6		

İlk etapta frezeleme işlemleri BB ve MUB mermer numuneleri kullanılarak kuvvet, enerji, pürüzlülük, titreşim, gürültü ve partikül boyut analizi yapılmıştır. İşleme parametreleriyle farklı tane boyutlarında kaplanmış elmas takımlarla frezeleme işlenebilirliğinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Elmas tane boyutu ile kayaç arasındaki etkileşimin; kesme kuvvetleri, motor titreşimi, gürültü, spesifik enerji, talaş boyutu, yüzey pürüzlülüğü faktörleri üzerindeki etkinliği ve ilişkisi araştırılmıştır.

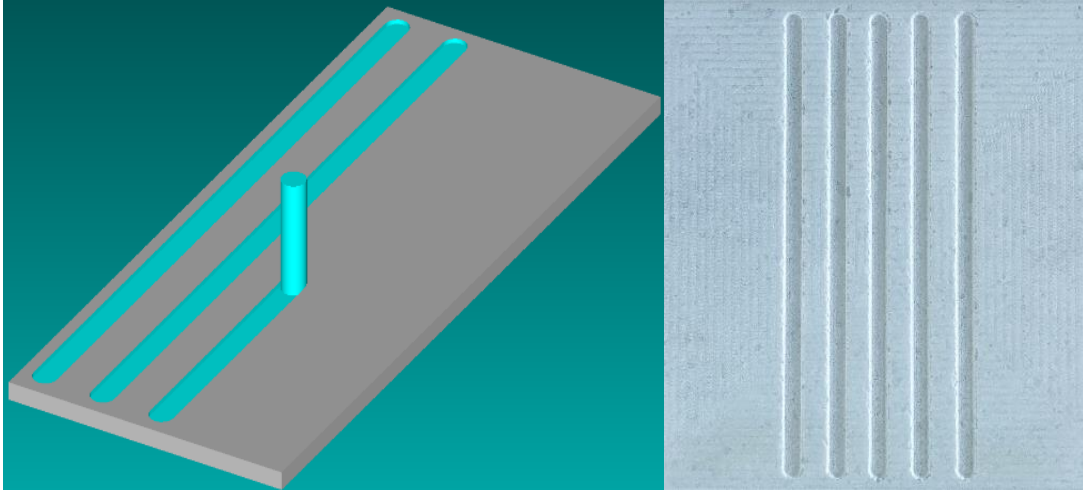
Numunelerdeki kalınlık farklılıklarını ortadan kaldırmak için yüzeyi tesviyesi yapılmıştır. Numune yüzeylerinin tesviye edilmesinde ve deneylerin gerçekleştirilmesinde farklı takımlar kullanılarak işlemler yapılmıştır.

Test cihazında 4 tane Z eksenindeki kuvvetlerin ölçülmesi, 4 tane de X ve Y eksenlerindeki kuvvetlerin ölçülmesi için kullanılan tüm yük hücreleri kalibrasyonlu ağırlık setleri ile 10 kg 20 kg ve 30 kg'lık ağırlıklar kullanılarak hücrelerin ölçüm hassasiyetlerinin doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. X ileri, X geri, Y ileri, Y geri ve Z eksenlerindeki hücrelerin ayrı ayrı kontrolleri yapılarak hücrelerin (N) ölçüm doğrulukları yapılmıştır (Resim 3.14).



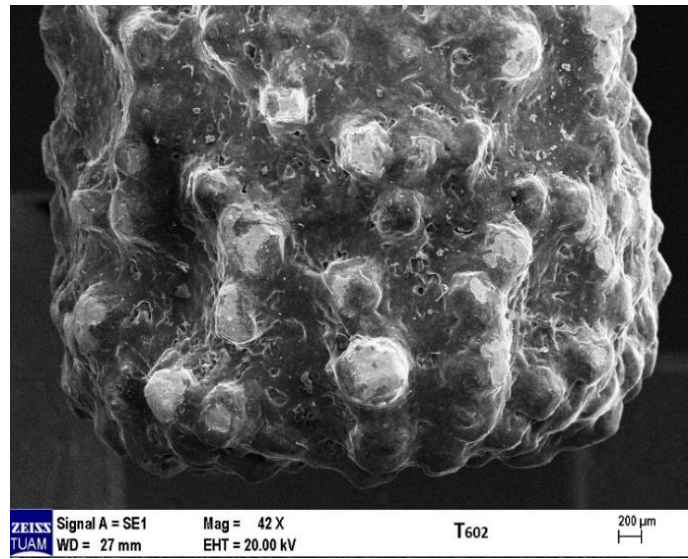
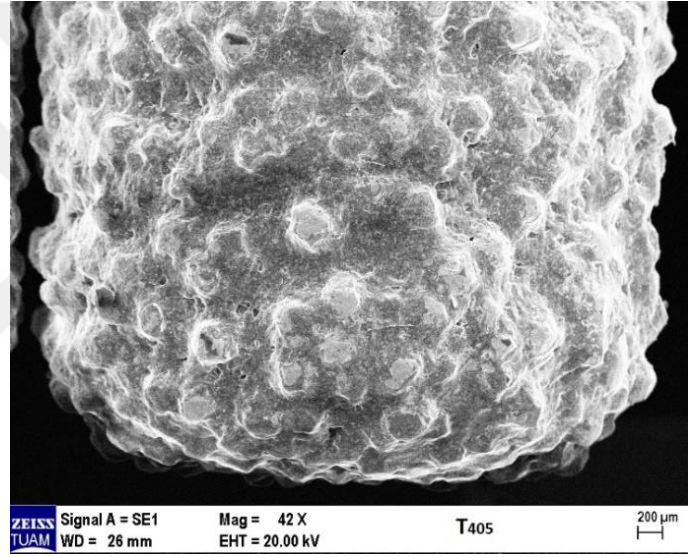
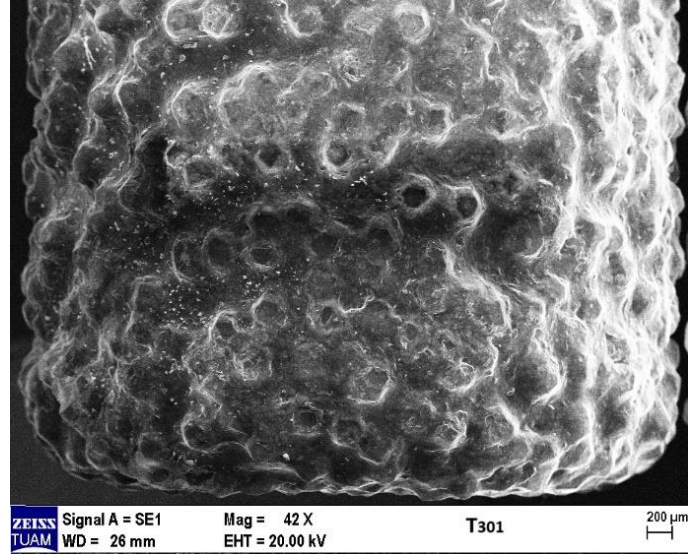
Resim 3.14 Yük hücrelerinin ölçüm doğruluklarının kontrollerine ait görseller.

AlphaCAM yazılımı ile deney modeli hazırlanarak oluşturulan NC kodları CNC makinesine aktararak frezeleme işlemine hazır hale getirilmiştir. AlphaCAM yazılımı ile oluşturulan tasarımın ve işlenen numunelerin yüzey görüntüsü Resim 3.15'te gösterilmiştir.



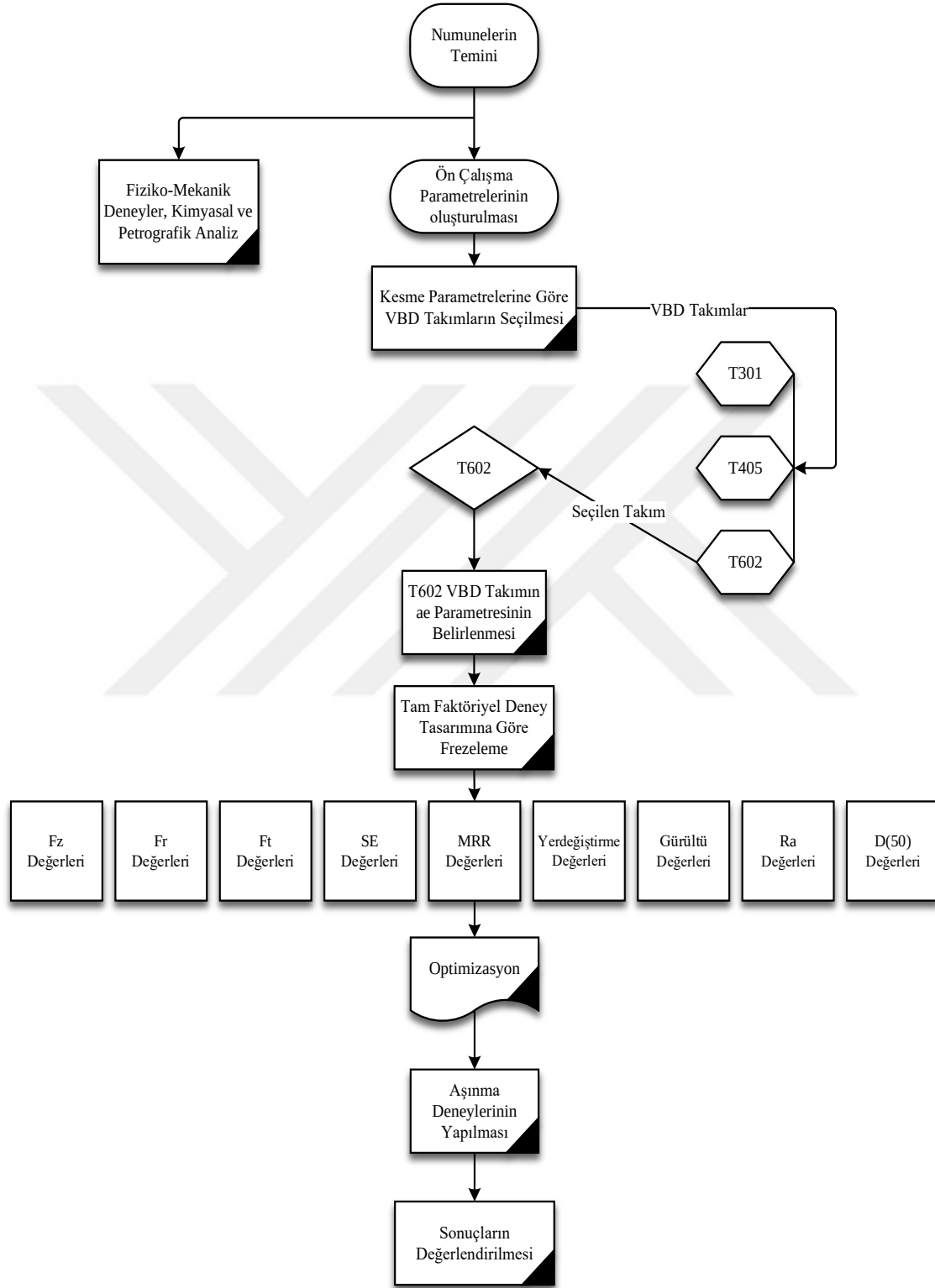
Resim 3.15 AlphaCAM ile modelleme (Sol), frezeleme sonrası oluşan yüzey (Sağ).

VBD takımların (sırasıyla T301, T405 ve T602) kesit topografileri (Resim 3.16) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir.



Resim 3.16 T301, T405, T602 kodlu takımların SEM görüntüleri.

Çalışmalarla ilgili aşamalar şematik olarak Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

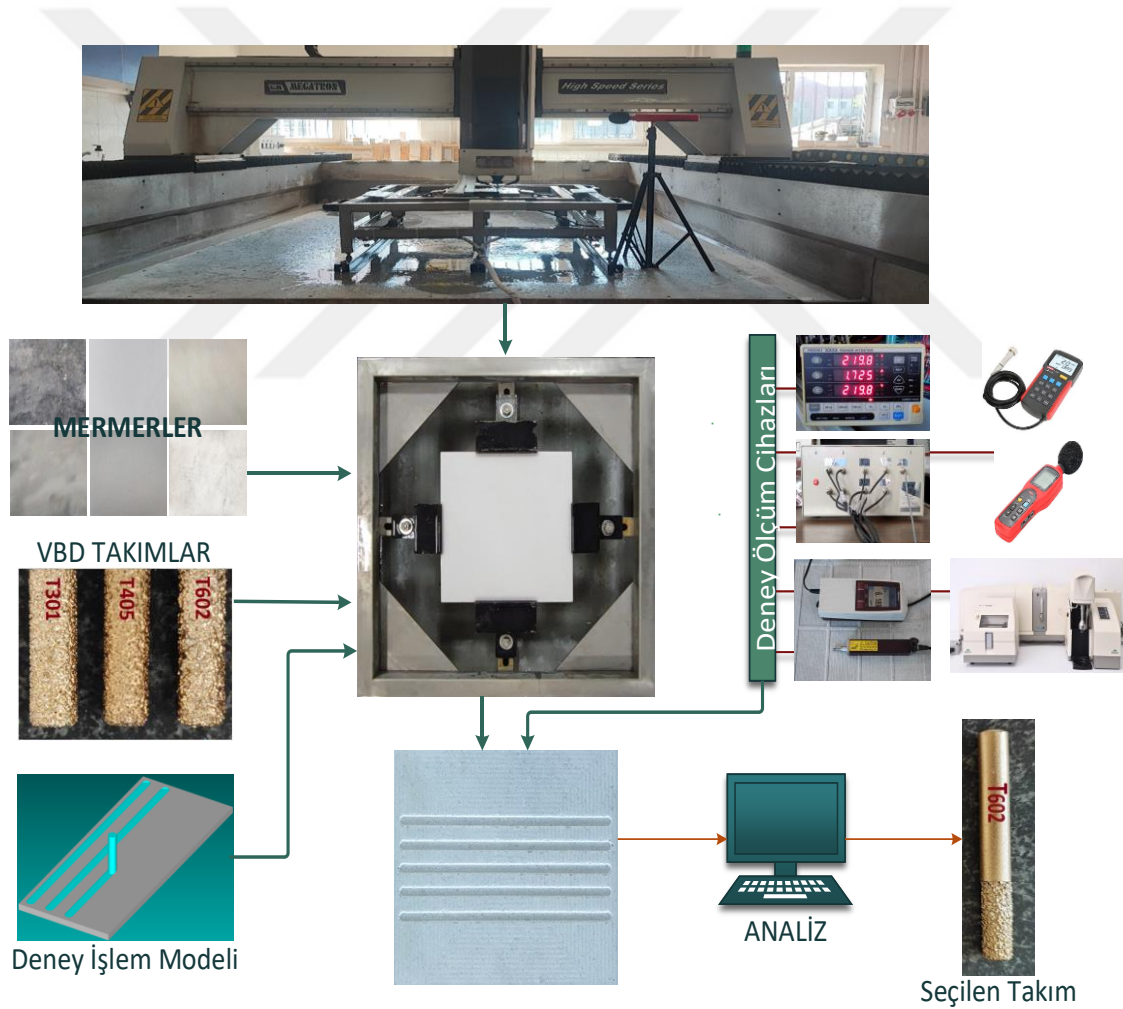


Şekil 3.1 Yapılan işlemlerin akış şeması.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

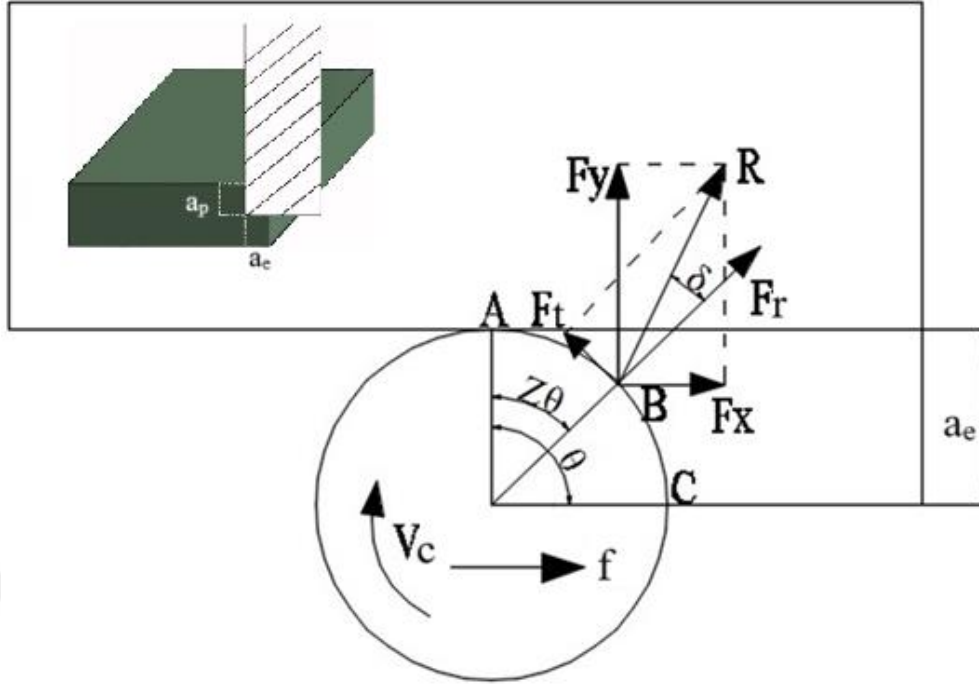
4.1 Ön Çalışma Sonuçları ve Değerlendirmeler

Freze testlerinde T301, T405 ve T602 kodlu farklı elmas tane genişliğine sahip olan üç farklı VBD takım kullanılmıştır. Bu takımlar arasından en iyi performans gösteren VBD takım seçilecektir. Frezeleme deneylerinde Fz kuvveti, Fr kuvveti, özgül enerji, iş mili üzerindeki titreşim değerleri, gürültü ve çıkan talaş parçalarının tane boyut analizi yapılmıştır. Frezeleme deneyinde gerçekleştirilecek ön çalışma sürecine ait adımlar şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Ön Çalışma Sürecinin Şematik Gösterimi.

İşleme sırasında kuvvetlerin vektörel gösterimi Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2 Kuvvetlerin vektörel gösterimi.

F_r ve F_t kuvvet değerleri Eşitlik 4.1 ve 4.2’de, özgül enerji değerleri Eşitlik 4.3’te ve malzeme kaldırma oranı ise Eşitlik 4.4’ teki gibi hesaplanmaktadır (Sarışık ve Özkan 2016, 2017, 2018, Altıntaş 2012).

$$F_c = R * \sin \delta \quad (4.1)$$

$$F_t = R * \cos \delta \quad (4.2)$$

$$SE = \frac{P * t}{Q} \quad (4.3)$$

P: Ortalama Güç Tüketimi (Watt)

t: Zaman (saniye)

Q: Talaş Hacmi (cm³)

$$MRR = \frac{f * a_e * a_p}{1000} \quad (4.4)$$

Freze testlerinde T301, T405 ve T602 kodlu farklı elmas tane genişliğine sahip olan üç farklı VBD takım kullanılarak yapılan ön deney çalışmalarının sonuçları Çizelge 4.1’ de gösterilmiştir.

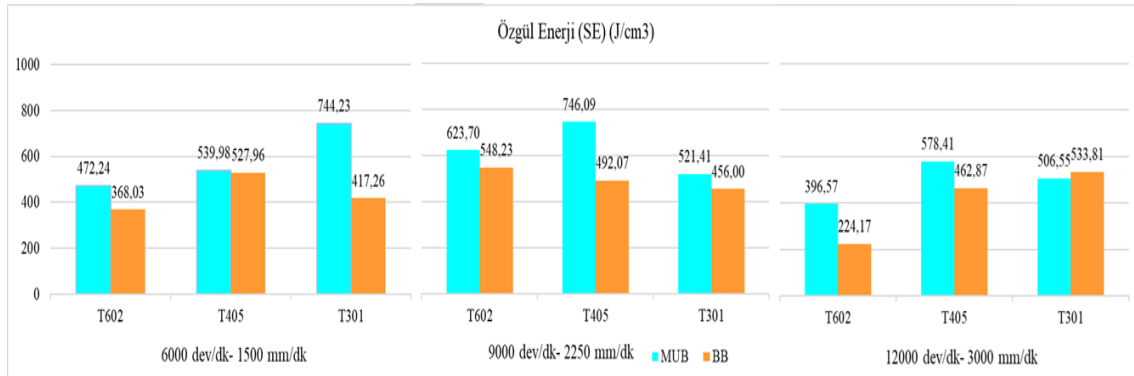
Çizelge 4.1 Farklı VBD takımlarla yapılan ön deney çalışmalarının sonuçları.

Parametre	Takım Kodu	Mermer kodu	Normal Kuvvet (Fz) (N)	Özgül Enerji (SE) (J/cm ³)	Kesme kuvveti (Fr) (N)	Titreşim (m/s ²)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)	Tane Boyutu Analizi d(50) (μm)
6000 dev/dk	T602	MUB	31,61	472.24	4,62	5,45	77,70	6,51	32,40
	T405	MUB	42,32	539.98	3,10	3,46	80,67	4,04	25,55
	T301	MUB	43,38	744.23	8,33	1,70	77,48	5,08	21,56
1500 mm/dk	T602	BB	29,96	368.03	3,77	5,65	78,02	5,91	30,14
	T405	BB	46,54	527.96	2,97	3,75	81,95	5,98	19,27
	T301	BB	44,46	417.26	3,20	17,57	83,06	4,44	78,09
9000 dev/dk	T602	MUB	59,01	623.70	2,57	3,16	85,51	7,78	21,50
	T405	MUB	41,96	746.09	3,74	2,43	81,48	5,95	26,32
	T301	MUB	35,87	521.41	3,97	11,35	86,32	4,99	16,49
2250 mm/dk	T602	BB	46,84	548.23	3,21	0,33	85,68	6,91	12,74
	T405	BB	46,22	492.07	3,22	1,41	81,32	5,45	19,38
	T301	BB	30,89	456.00	2,66	4,67	85,08	5,17	16,64
12000 dev/dk	T602	MUB	28,00	396.57	2,78	8,62	85,67	8,89	28,51
	T405	MUB	40,72	578.41	4,28	20,68	88,94	7,09	28,47
	T301	MUB	45,12	506.55	4,66	24,81	90,35	6,09	26,58
3000 mm/dk	T602	BB	28,98	224.17	1,68	6,18	85,63	8,82	23,51
	T405	BB	34,47	462.87	3,20	16,51	88,49	6,19	16,59
	T301	BB	43,37	533.81	4,02	18,74	90,03	6,63	12,91

İlk aşama deneylerinde kullanılan MUB ve BB mermeri farklı dokusal özelliklere sahiptir. MUB mermer kristalin doku, BB mermer ise granoblastik dokuya sahiptir. MUB ve BB mermerlerin belirlenen kesme parametreleri ve farklı elmas tane boyutuna sahip VBD takımların SE tüketim değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. MUB ve BB'nin SE değerlerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. MUB mermerin ortalama kalsit tane boyutu, BB mermere göre yaklaşık 4 kat daha büyüktür. MUB ve BB kayaların kalsit tanelerinin boyutu ve şekli, tanelerin iç düzeni ve taneler arasındaki bağlanma farklılık göstermiştir.

MUB ve BB mermer için en düşük SE değeri T602 kodlu takım ve 12000 dev/dk – 3000 mm/dk kesme parametresinde bulunmuştur (Se=396,57 J/cm³). Ayrıca, MUB

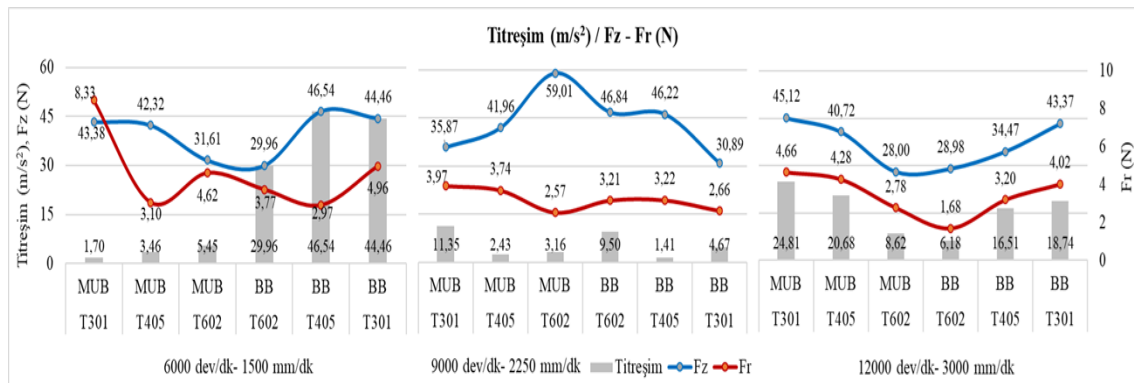
mermerin SE değerinin BB mermere göre SE değerlerinin yaklaşık %57 daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3 Farklı VBD takımlarının özgül enerji değerlerinin grafik gösterimi.

BB ve MUB mermerler için Fr, Fz değerleri ve titreşim değerleri Şekil 4.4' te gösterilmiştir. Fr ve Fz kuvvetleri için en düşük değerler T602 kodlu takımda ve 12000 dev/dk – 3000 mm/dk hızlarında elde edilmiştir.

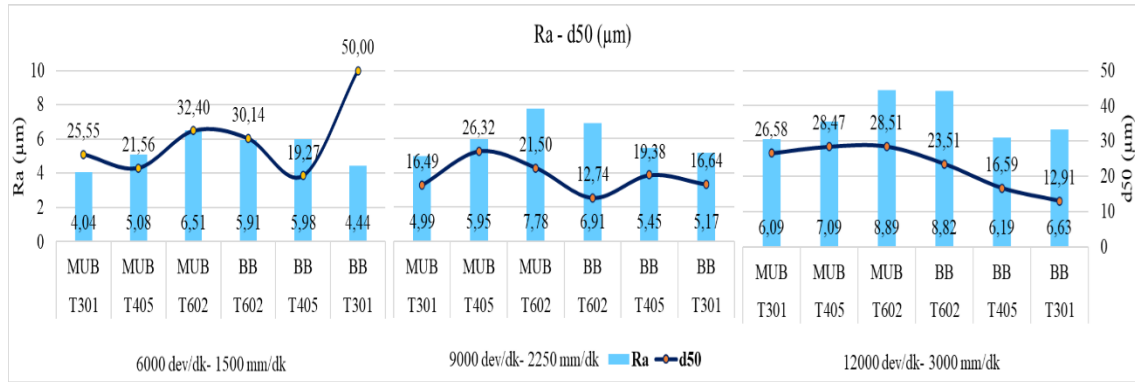
Elmasların boyutu, kalsit mineral tanelerinin dokusal bileşimi ve mineral dağılımı işleme yüzeyinde değişiklik göstermektedir. Bu farklılık, işleme parametrelerine göre temas bölgesinde elmaslar tarafından uygulanan kuvvetlerde değişikliklere neden olmuştur.



Şekil 4.4 Farklı VBD takımlarının Fr, Fz ve titreşim değerlerinin grafik gösterimi.

Numunenin kümülatif tane boyut dağılımını ve talaş parçacıklarının ortalama büyüklüğünü gösterdiği için d50 değerleri ve Ra değerleri Şekil 4.5' te gösterilmiştir. Kesici elmas tane boyutları ve kesme parametrelerindeki farklılıkların, talaş oluşum mekanizmasının değişmesine ve talaş oluşumu üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

En düşük d50 talaş boyutu (12,74 μ m) 9000 dev/dk–2250 mm/dk hızlarında ve T602 kodlu takımda olmuştur. Hız arttıkça mineral taneleri yüzeyden kopartılırken, yüzeyde oluşan deformasyon nedeniyle yüzey kalitesi azalmıştır. Elmas tane boyutu irileştikçe kesme bölgesinde daha büyük kalsit parçalarını kopartacağı için nihai yüzeyde daha fazla deformasyona neden olacağı görülmüştür. En düşük Ra değerleri; MUB mermerin (4,04 μ m) T301 kodlu takım ile 6000 dev/dk–15000 mm/dk hızlarında, BB mermerin (4,44) T301 kodlu takım ile 9000 dev/dk–2250 mm/dk hızlarında elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Farklı VBD takımların Ra ve d50 değerlerinin grafik gösterimi.

Elde edilen veriler doğrultusunda SE, Fz, Fr ve Ra parametreleri değerlendirildiğinde; Se, Fz ve Fr için T602 kodlu takım, Ra için T301 kodlu takımla en düşük sonuçlar elde edilmiştir. Titreşim ve tane boyutu verileri, ölçüm sistemindeki düşük hassasiyet sebebiyle, gürültü verileri ise devir artışına bağlı olarak artış gösterdiğinden değerlendirme kapsamına alınmamıştır.

Genel olarak T602 kodlu VBD takımların diğer VBD takımlara kıyasla incelenen performans kriterleri açısından daha ön planda olduğu görülmüştür. Bu nedenle mermer numunelerin sonraki frezeleme deneylerinde T602 kodlu takımlar seçilmiş ve deneylere devam edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda işlenen nihai yüzey örneği Resim 4.1'deki gibidir.

Tam kesim frezeleme ile yüzeyde kesme kaynaklı izler kalmaktadır. Fakat bu durum uygulamalarda istenilmeyen bir durumdur. Ayrıca, uygulamalarda tam kesimle frezeleme işlemi yapılmadığı ve frezeleme işlemlerinin sürekli kesim yöntemiyle gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle T602 kodlu VBD takımının uygun kesme genişliğinin

belirlenmesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Frezelemede kesme genişliği, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Uygun a_e 'nin belirlenmesinde R_a değerleri incelenmiştir.

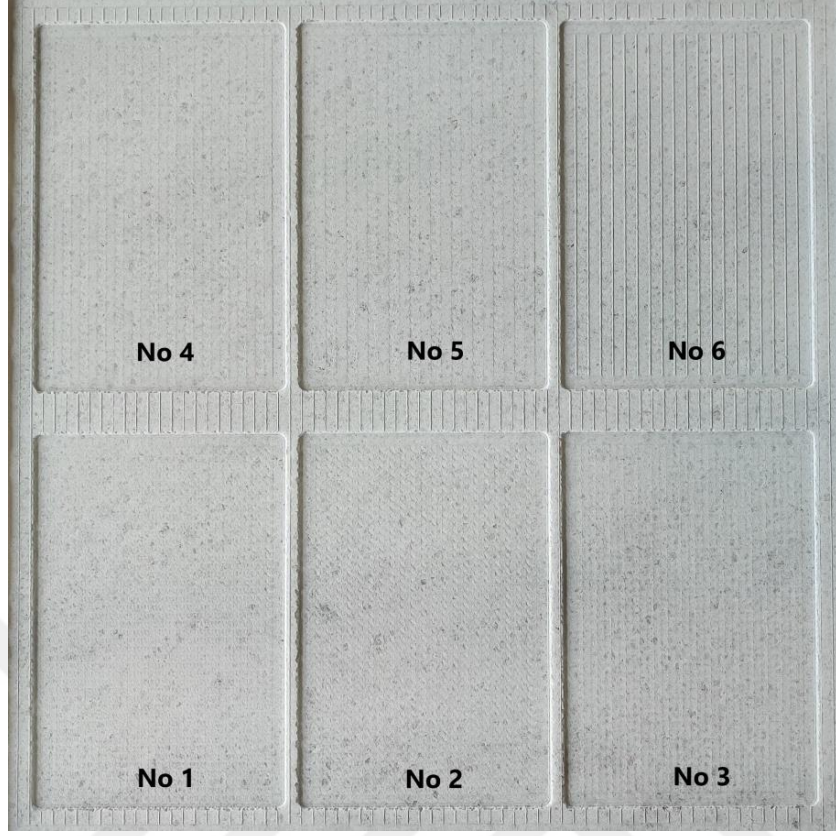
BB mermeri ve MARB dolomitik mermeri üzerinde yapılan kesme genişliği çalışmalarında ve R_a ölçümleri sonucunda (Çizelge 4.2) kesici takım çapının %40 yani 2,4 mm kesme genişliği alınmıştır. Resim 4.2' de BB mermer, Resim 4.3' te MARB mermer için yüzey görünümleri verilmiştir.



Resim 4.1 Tam kesim ile frezelenmiş yüzey.

Çizelge 4.2 Farklı kesme genişliğine göre pürüzlülük değerleri.

Kesim No	Kesme Genişliği Oranı	Kesme Genişliği (mm)	Ra	
			MARB	BB
1	20%	1,2	4,98	3,98
2	30%	1,8	4,95	4,09
3	40%	2,4	5,07	4,18
4	50%	3,0	5,85	4,90
5	60%	3,6	5,90	5,18
6	70%	4,2	7,23	6,30



Resim 4.2 BB mermer kesme genişliğine göre yüzey görüntüsü.



Resim 4.3 MARB mermer kesme genişliğine göre yüzey görüntüsü.

4.2 Tam Faktöriyel Deney Tasarımı ve Uygulama Süreci

T602 kodlu VBD takımın elmas tane boyutu ve kesme genişliğinin belirlenmesi için yapılan ön deneme çalışmaları sonucunda optimizasyon için seçilen frezeleme parametrelerinin son hali Çizelge 4.3’ te verilmiştir. F_z , F_r ve F_t kuvvet değerleri, özgül enerji, iş parçası üzerinde hassas bir kesim yapıp yapılmadığını ölçmek için frezeleme sehpası üzerine yerleştirilen prob ile yerdeğiştirme ölçümleri, gürültü ve çıkan talaş parçalarının tane boyut analizi yapılmıştır. Ölçülen tüm verilerin ortalama değerleri incelenmiştir. Deney işlemlerinin gerçekleşme adımları Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Ön çalışma deneylerinde işleme sırasında harcanan güçten makinenin boşta çalışma gücü çıkartılarak malzeme işleme sırasında kullanılan net enerji dikkate alınmıştır. Fakat CNC, 9 kW’lık iş mili motor gücünde olduğundan genellikle yüksek bir boşta çalışma gücüne sahiptir ve işleme sırasında tüketilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Özellikle işleme sırasında tüketilen güç çok küçük olduğunda sonuçları yanıltıcı hale getirmesi söz konusu olmaktadır. Bu nedenle, SE hesaplamalarında makinenin gerçek enerji tüketimini yansıtması için işleme sırasında ölçülen toplam güç kullanılmıştır.

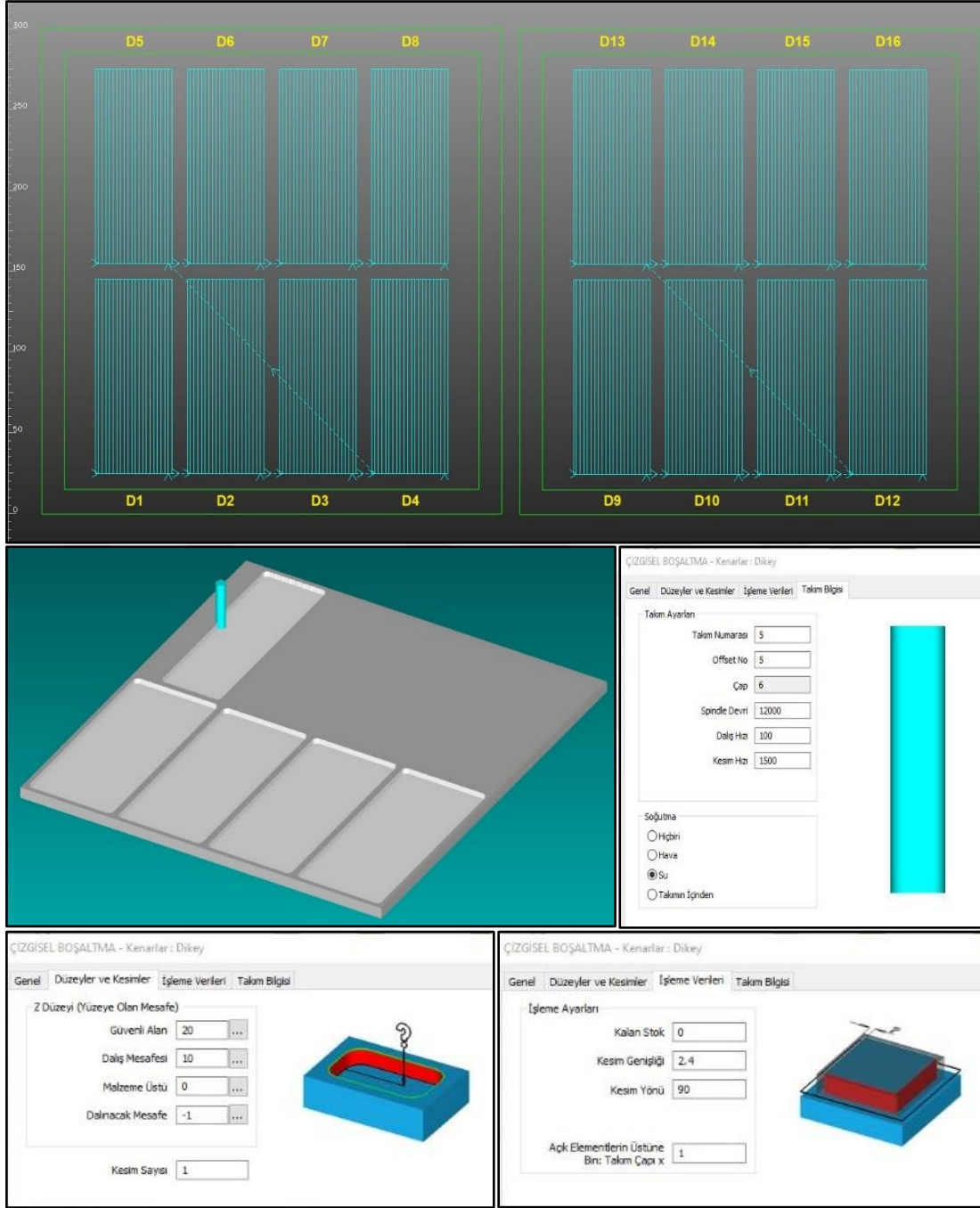
Çizelge 4.3 Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri.

Parametreler	Seviyeler
Elmas Boyutu (mesh)	25/35
Mil Devri (dev/dk)	6000 8000 10000 12000
İlerleme Hızı (mm/dk)	1500 2000 2500 3000
Kesme Derinliği (mm)	1
Kesme Genişliği (mm)	2,4

Frezeleme işleminde iki parametrelili ve dört seviyeli tam faktöriyel (2^4) deney tasarımı uygulanarak 16 adet deney oluşturulmuştur. Oluşturulan deney tasarımının parametreleri Çizelge 4.4’ te gösterilmiştir. Frezeleme için oluşturulan deneyler AlphaCAM programında modellenerek NC dosyası oluşturulmuştur. Hazırlanan deney model örneği Resim 4.5’te gösterilmiştir. Numune ebatlarına göre oluşturulan çalışma alanı içerisine 16 adet deney tasarımı her bir alana deney sırasınca işleme parametreleri tanımlanmıştır.

Çizelge 4.4 Tam faktöriyel deney tasarımı.

36



Resim 4.5 AlphaCAM’ de oluşturulan deney modeli.

4.3 Seçilen Frezeleme Parametreleri ile Deney Sonuçları

AB, AG, BB, MARB, MUB ve UB mermer örneklerinin frezeleme işlemi süresince ölçüm verileri alınmıştır. Bu veriler; frezeleme esnasında kesme eksenlerinde oluşan Fz, Fr, Ft, SE, yerdeğiştirme değeri, gürültü değeridir. Frezeleme sonrası Ra ölçümleri ile frezeleme süresinde oluşan talaşların tane boyut analizleri yapılmıştır. Bu ölçümler,

mermer numunelerinin frezeleme performansını karşılaştırmak ve her bir mermerin işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla analiz edilmiştir.

4.3.1 Afyon Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri

AB mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 7,70 – 46,88 N, SE değerleri 2988,03 – 8384,98 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 4,60 – 8,20 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. AB mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.5’ te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 AB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm ³)	MRR (cm ³ /dk)
1	6000	1500	16,66	3,24	22,15	5985,28	3,6
2	6000	2000	21,38	10,65	19,76	4789,17	4,8
3	6000	2500	27,80	10,59	23,07	4214,76	6,0
4	6000	3000	38,09	12,73	29,94	3834,84	7,2
5	8000	1500	13,89	7,03	10,38	6804,14	3,6
6	8000	2000	18,75	8,57	11,48	5379,10	4,8
7	8000	2500	23,40	12,45	18,01	4385,50	6,0
8	8000	3000	46,88	12,76	21,94	2988,03	7,2
9	10000	1500	9,81	3,98	7,94	6848,31	3,6
10	10000	2000	11,74	6,03	9,62	5397,26	4,8
11	10000	2500	13,04	6,19	9,66	4640,52	6,0
12	10000	3000	14,45	7,89	14,32	3987,91	7,2
13	12000	1500	10,05	3,49	7,47	8384,98	3,6
14	12000	2000	7,70	4,07	8,81	6810,14	4,8
15	12000	2500	10,94	7,50	11,08	5920,86	6,0
16	12000	3000	10,92	8,63	11,27	5138,70	7,2

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)
1	6000	1500	0,004	77,0	6,37	15,472
2	6000	2000	0,003	78,4	7,25	16,725
3	6000	2500	0,007	79,6	7,43	13,616
4	6000	3000	0,037	80,9	8,20	18,405
5	8000	1500	0,003	77,2	5,93	19,233
6	8000	2000	0,002	78,1	6,40	20,84
7	8000	2500	0,005	78,9	7,25	19,454
8	8000	3000	0,011	79,1	8,24	23,833
9	10000	1500	0,006	79,6	4,60	31,502
10	10000	2000	0,002	79,6	6,15	35,758
11	10000	2500	0,016	81,5	6,28	75,786
12	10000	3000	0,041	85,0	7,23	20,942
13	12000	1500	0,009	82,9	5,44	15,318
14	12000	2000	0,004	82,9	5,84	98,209
15	12000	2500	0,017	85,0	6,06	158,643
16	12000	3000	0,033	85,2	6,23	127,396

4.3.2 Afyon Gri Mermerin Frezeleme Verileri

AG mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 6,94 – 25,81 N, SE değerleri 4461,31 – 10445,59 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 5,35 – 7,40 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. AG mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 AG mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm ³)	MRR (cm ³ /dk)
1	6000	1500	10,41	7,28	13,62	7615,08	3,6
2	6000	2000	10,32	9,82	16,40	4461,31	4,8
3	6000	2500	14,98	9,77	19,82	4867,19	6,0
4	6000	3000	24,74	12,71	20,71	5115,30	7,2
5	8000	1500	8,77	6,54	9,14	5625,85	3,6
6	8000	2000	10,34	7,51	11,58	5805,56	4,8
7	8000	2500	16,33	10,73	15,68	6085,82	6,0
8	8000	3000	21,48	11,01	19,61	6221,68	7,2
9	10000	1500	6,94	6,59	13,43	6424,49	3,6
10	10000	2000	16,86	6,76	12,39	6693,32	4,8
11	10000	2500	22,38	8,33	14,50	7009,35	6,0
12	10000	3000	25,81	10,18	17,30	7146,63	7,2
13	12000	1500	12,22	5,64	10,94	8279,59	3,6
14	12000	2000	15,97	5,56	10,41	8424,10	4,8
15	12000	2500	17,70	7,17	12,38	9108,74	6,0
16	12000	3000	22,13	9,07	14,03	10445,59	7,2

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)
1	6000	1500	0,006	78,6	5,51	31,50
2	6000	2000	0,005	79,7	5,66	20,21
3	6000	2500	0,012	80,3	6,49	15,53
4	6000	3000	0,033	82,1	6,45	19,98
5	8000	1500	0,007	77,4	5,41	21,72
6	8000	2000	0,005	78,4	5,70	32,19
7	8000	2500	0,014	79,2	5,71	9,75
8	8000	3000	0,023	80,3	6,72	5,94
9	10000	1500	0,003	80,6	5,35	45,05
10	10000	2000	0,002	81,0	5,75	44,81
11	10000	2500	0,007	82,3	6,46	159,93
12	10000	3000	0,038	84,7	7,40	9,11
13	12000	1500	0,004	82,1	5,48	16,41
14	12000	2000	0,003	81,7	6,19	60,99
15	12000	2500	0,008	82,4	6,13	27,91
16	12000	3000	0,023	81,4	6,85	119,03

4.3.3 Bursa Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri

BB mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 4,21 – 33,80 N, SE değerleri 5466,51 – 12527,28 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 3,34 – 5,78 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. BB mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 BB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm³)	MRR (cm³/dk)
1	6000	1500	13,27	5,08	9,42	8986,80	3,6
2	6000	2000	24,99	5,58	13,68	7167,54	4,8
3	6000	2500	26,09	7,90	13,28	6097,29	6,0
4	6000	3000	33,80	8,68	15,33	5466,51	7,2
5	8000	1500	10,76	4,83	9,67	10682,75	3,6
6	8000	2000	9,65	5,09	10,36	8530,63	4,8
7	8000	2500	18,62	5,37	9,66	6942,66	6,0
8	8000	3000	26,02	9,06	14,46	6232,59	7,2
9	10000	1500	10,71	2,74	7,63	10884,87	3,6
10	10000	2000	15,44	4,19	8,86	8681,58	4,8
11	10000	2500	10,70	5,89	10,25	7546,33	6,0
12	10000	3000	21,46	6,46	10,50	6510,41	7,2
13	12000	1500	4,21	3,47	6,30	12527,28	3,6
14	12000	2000	9,72	4,51	7,49	9834,90	4,8
15	12000	2500	15,30	5,22	9,05	8082,42	6,0
16	12000	3000	18,14	5,44	10,03	7028,45	7,2

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)
1	6000	1500	0,006	78,7	4,34	30,90
2	6000	2000	0,004	79,0	4,61	19,42
3	6000	2500	0,015	79,4	5,41	28,65
4	6000	3000	0,035	79,8	5,78	14,69
5	8000	1500	0,003	75,9	3,93	22,44
6	8000	2000	0,002	76,8	4,07	12,29
7	8000	2500	0,008	77,8	5,02	23,77
8	8000	3000	0,018	79,0	5,08	23,61
9	10000	1500	0,008	80,1	3,83	13,81
10	10000	2000	0,002	80,2	3,73	15,84
11	10000	2500	0,018	82,0	4,54	19,86
12	10000	3000	0,033	83,1	5,18	17,97
13	12000	1500	0,007	87,7	3,56	14,96
14	12000	2000	0,004	85,3	3,34	30,66
15	12000	2500	0,016	83,8	4,36	13,42
16	12000	3000	0,029	84,6	4,83	16,91

4.3.4 Marmara Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri

MARB mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 4,21 – 33,80 N, SE değerleri 5466,51 – 12527,28 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 3,34 – 5,78 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. MARB mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 MARB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm³)	MRR (cm³/dk)
1	6000	1500	21,65	7,52	14,92	6234,30	3,6
2	6000	2000	20,01	8,01	19,86	4910,50	4,8
3	6000	2500	35,41	11,17	22,98	4457,14	6,0
4	6000	3000	31,28	13,95	23,91	3772,73	7,2
5	8000	1500	16,36	7,12	12,94	7228,88	3,6
6	8000	2000	18,62	7,29	13,55	5795,48	4,8
7	8000	2500	18,97	9,73	17,78	5013,32	6,0
8	8000	3000	30,22	10,62	21,07	4440,02	7,2
9	10000	1500	13,25	3,79	8,31	8698,87	3,6
10	10000	2000	11,33	5,29	8,06	6996,41	4,8
11	10000	2500	14,03	6,10	9,92	5960,80	6,0
12	10000	3000	19,76	6,37	13,07	5137,41	7,2
13	12000	1500	7,15	3,88	7,02	10571,57	3,6
14	12000	2000	8,19	5,13	8,25	8538,90	4,8
15	12000	2500	12,44	5,40	9,03	7142,20	6,0
16	12000	3000	16,90	6,74	10,09	6295,33	7,2
Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)	
1	6000	1500	0,006	77,6	5,54	27,07	
2	6000	2000	0,006	77,9	6,54	33,15	
3	6000	2500	0,009	79,1	7,11	9,13	
4	6000	3000	0,027	81,0	7,39	55,50	
5	8000	1500	0,004	76,3	5,31	58,89	
6	8000	2000	0,003	77,1	5,48	111,28	
7	8000	2500	0,007	79,3	5,66	10,61	
8	8000	3000	0,012	79,4	6,72	50,26	
9	10000	1500	0,004	81,2	6,21	13,82	
10	10000	2000	0,002	81,6	5,73	11,98	
11	10000	2500	0,007	83,1	5,85	15,34	
12	10000	3000	0,030	84,1	6,75	12,16	
13	12000	1500	0,005	82,2	5,81	18,63	
14	12000	2000	0,003	83,5	6,16	17,16	
15	12000	2500	0,007	84,9	6,30	11,32	
16	12000	3000	0,015	85,9	6,10	33,46	

4.3.5 Muğla Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri

MUB mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 6,93 – 22,88 N, SE değerleri 5411,51 – 10052,47 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 5,00 – 7,91 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. MUB mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 MUB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm³)	MRR (cm³/dk)
1	6000	1500	15,39	3,74	13,31	6942,68	3,6
2	6000	2000	17,16	3,47	19,46	5509,43	4,8
3	6000	2500	21,87	5,23	18,47	4511,51	6,0
4	6000	3000	22,88	8,80	13,23	4048,11	7,2
5	8000	1500	8,44	2,81	16,15	8097,11	3,6
6	8000	2000	10,60	3,72	16,32	6324,34	4,8
7	8000	2500	12,71	4,80	21,49	5151,10	6,0
8	8000	3000	17,65	5,77	24,43	4529,47	7,2
9	10000	1500	14,12	3,15	8,35	10052,47	3,6
10	10000	2000	9,56	4,06	8,19	7623,94	4,8
11	10000	2500	9,89	5,15	9,59	6560,28	6,0
12	10000	3000	12,24	5,26	10,10	5408,02	7,2
13	12000	1500	6,93	2,82	7,02	9091,79	3,6
14	12000	2000	7,57	4,00	7,08	7456,91	4,8
15	12000	2500	8,96	5,15	7,86	6110,56	6,0
16	12000	3000	11,78	5,95	8,53	5454,72	7,2

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)
1	6000	1500	0,008	76,9	5,00	130,32
2	6000	2000	0,010	78,1	5,76	64,51
3	6000	2500	0,021	78,3	7,03	15,01
4	6000	3000	0,032	79,7	7,06	12,00
5	8000	1500	0,009	78,2	5,73	56,33
6	8000	2000	0,008	78,2	5,95	8,33
7	8000	2500	0,017	78,6	6,21	7,90
8	8000	3000	0,023	78,9	7,64	15,89
9	10000	1500	0,006	79,0	6,26	15,06
10	10000	2000	0,004	78,4	6,73	15,22
11	10000	2500	0,015	78,1	7,46	10,07
12	10000	3000	0,049	79,8	7,54	9,93
13	12000	1500	0,011	81,0	5,66	21,76
14	12000	2000	0,008	81,3	6,14	7,43
15	12000	2500	0,016	80,7	6,64	13,38
16	12000	3000	0,025	80,3	7,91	15,34

4.3.6 Uşak Beyaz Mermerin Frezeleme Verileri

UB mermerin frezeleme deneylerinde Fz kuvveti 6,95 – 28,63 N, SE değerleri 3938,83 – 10879,67 J/cm³ ve Ra pürüzlülük değerleri ise 5,11 – 8,17 µm arasında ölçülmüştür. f arttıkça yer değiştirme değerlerinde, Vc arttıkça gürültü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. UB mermerin deneylerinin ölçüm değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 UB mermerin frezeleme ölçüm sonuçları.

Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (Normal Kuvvet, N)	Fr (Kesme kuvveti, N)	Ft (Teğetsel Kuvvet, N)	Özgül Enerji (J/cm³)	MRR (cm³/dk)
1	6000	1500	17,99	9,00	14,45	6770,64	3,6
2	6000	2000	22,05	8,81	14,14	5397,32	4,8
3	6000	2500	28,63	9,21	16,93	4400,73	6,0
4	6000	3000	27,82	11,25	20,06	3938,83	7,2
5	8000	1500	11,23	4,33	13,19	7845,52	3,6
6	8000	2000	17,11	7,53	16,27	5920,46	4,8
7	8000	2500	21,36	7,34	18,39	5259,71	6,0
8	8000	3000	24,58	8,17	16,74	4299,49	7,2
9	10000	1500	10,97	5,08	9,63	9796,36	3,6
10	10000	2000	9,30	5,25	9,23	7392,34	4,8
11	10000	2500	11,46	6,32	11,54	6502,37	6,0
12	10000	3000	14,25	6,97	11,29	5675,46	7,2
13	12000	1500	6,95	3,54	6,04	10879,67	3,6
14	12000	2000	7,24	4,23	6,98	8825,65	4,8
15	12000	2500	8,92	4,56	9,02	7394,01	6,0
16	12000	3000	11,64	6,38	14,82	6421,57	7,2
Deney no	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yer Değiştirme (mm)	Gürültü (dB)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, µm)	Tane Boyutu Analizi (d50, µm)	
1	6000	1500	0,005	78,93	7,17	15,47	
2	6000	2000	0,004	79,59	7,56	16,73	
3	6000	2500	0,011	80,01	8,05	13,62	
4	6000	3000	0,025	80,97	8,97	18,41	
5	8000	1500	0,003	77,96	5,65	19,23	
6	8000	2000	0,003	78,38	6,27	20,84	
7	8000	2500	0,007	78,86	7,33	19,45	
8	8000	3000	0,014	78,98	8,17	23,83	
9	10000	1500	0,004	80,14	5,11	31,50	
10	10000	2000	0,002	80,11	5,86	35,76	
11	10000	2500	0,009	81,69	6,96	75,79	
12	10000	3000	0,036	82,92	7,39	20,94	
13	12000	1500	0,005	85,06	5,85	15,32	
14	12000	2000	0,003	84,23	5,76	98,21	
15	12000	2500	0,011	84,89	6,54	158,64	
16	12000	3000	0,022	86,29	7,51	127,40	

5. KESME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

5.1 Yanıt Yüzey Modelinin (RSM) Oluşturulması

Vc ve f parametrelerinin tahmin edilmesi ve en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Stat-Ease 360 programı kullanılmıştır. Stat-Ease 360 programı, deney tasarımı (DOE) ve istatistiksel analiz için kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım süreç optimizasyonu, ürün geliştirme ve kalite iyileştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Faktöriyel tasarımlar, yanıt yüzey yöntemleri, ANOVA ve regresyon analizleri gibi çeşitli istatistiksel yöntemlerle analiz yapılabilmektedir.

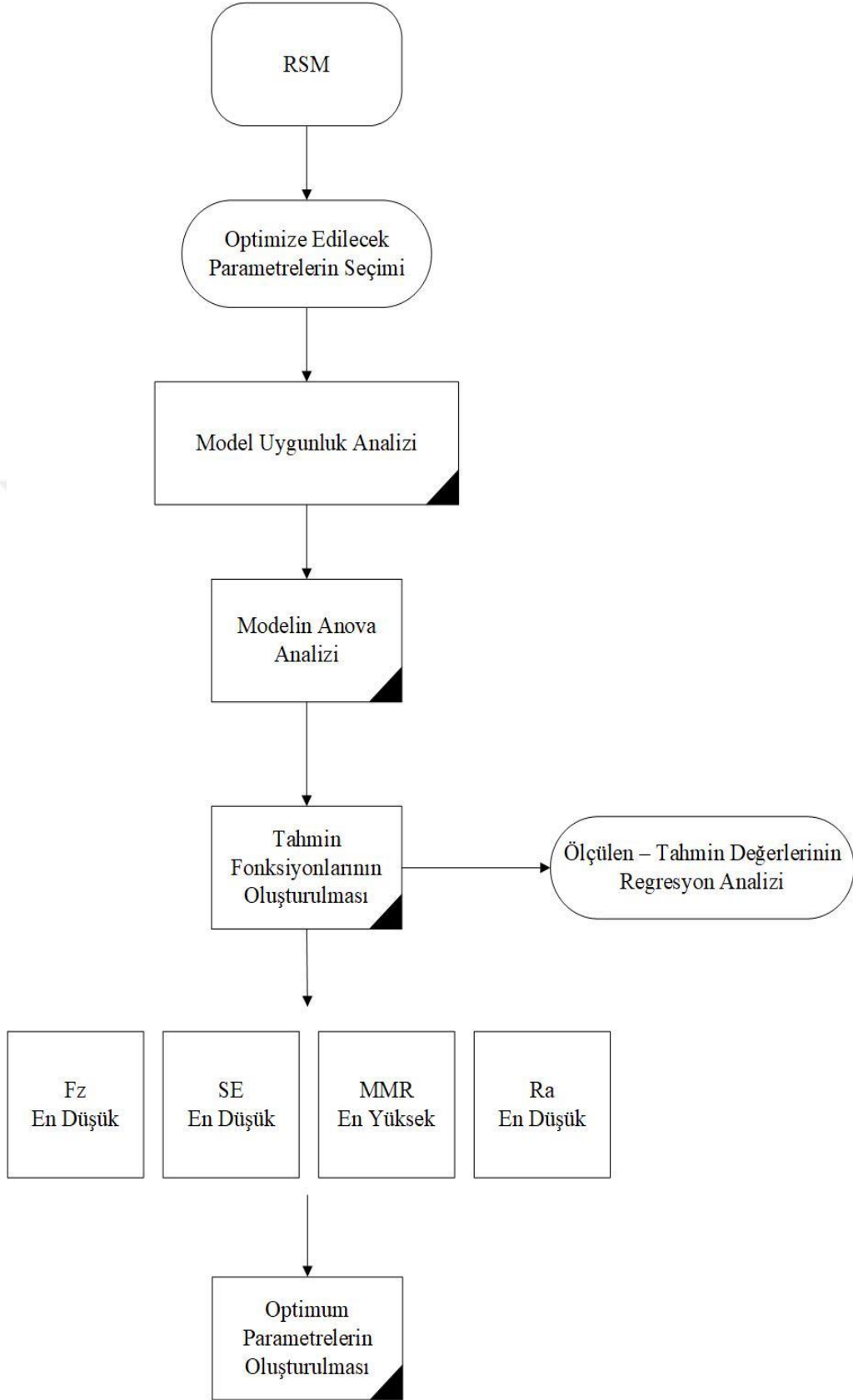
Çalışmada, işleme parametrelerini optimize etmek amacıyla RSM kullanılmıştır. Bu yöntem, deneysel verileri kullanarak faktörler arasındaki etkileşimleri dikkate alabilmekte ve birden fazla yanıt değişkenini aynı anda optimize edebilmektedir.

Frezeleme deneylerinde kesme performansının optimize edilmesinde dört parametre kullanılmıştır. Bunlar kesme işlemi sonrası oluşan nihai yüzeyin kalite göstergesi olan Ra parametresi, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir faktör olan Fz kuvvetidir.

Sürecin enerji verimliliğini ve maliyetleri etkileyen SE parametresi, verimlilik ve üretkenlik açısından önemli olan MRR parametreleri kullanılmıştır. Bu dört parametre hem nihai yüzey kalitesini hem de işleme verimliliğini artırmaya yönelik bir optimizasyon sağlamak amacıyla seçilmiştir. Programda en uygun modelin seçilmesinde çoklu regresyon analizi ve seçilen modelin anlamlılık düzeyinin belirlenmesinde varyans analizi uygulanmıştır.

Ra, Fz ve SE faktörlerinin optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen grafikler, modelin performansını ve tahmin yeteneğini görselleştirmekte ve elde edilen sonuçların analizi ve yorumlanması açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Uygulanan optimizasyon yönteminin uygulama aşamaları Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Optimizasyon yönteminin uygulama aşamaları.

5.1.1 Afyon Beyaz Mermer için Model Analizi

AB mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.1 'de, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.2' de verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için 2FI (İki Faktörlü Etkileşim), SE için ikinci dereceden ve Ra için Kübik model bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 AB mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		0,0005	0,6391	0,4998	
2FI		0,0245	0,7478	0,6545	Önerilen
İkinci Dereceden		0,5030	0,7363	0,5504	
Kübik		0,3377	0,7729	0,2312	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	
Doğrusal		< 0.0001	0,8879	0,8411	
2FI		0,4320	0,8849	0,7812	
İkinci Dereceden		0,0061	0,9502	0,9114	Önerilen
Kübik		0,3797	0,9549	0,8105	
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	
Doğrusal		< 0.0001	0,8547	0,7960	
2FI		0,2387	0,8605	0,7830	
İkinci Dereceden		0,8671	0,8372	0,6767	
Kübik		0,0403	0,9376	0,8100	Önerilen

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=15,83 > F_{0,05;2;15}=3,68$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=58,19 > F_{0,05;4;15}=3,06$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=26,05 > F_{0,05;8;15}=2,64$ olduğu belirlenmiştir. F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500'den küçük olduğundan, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

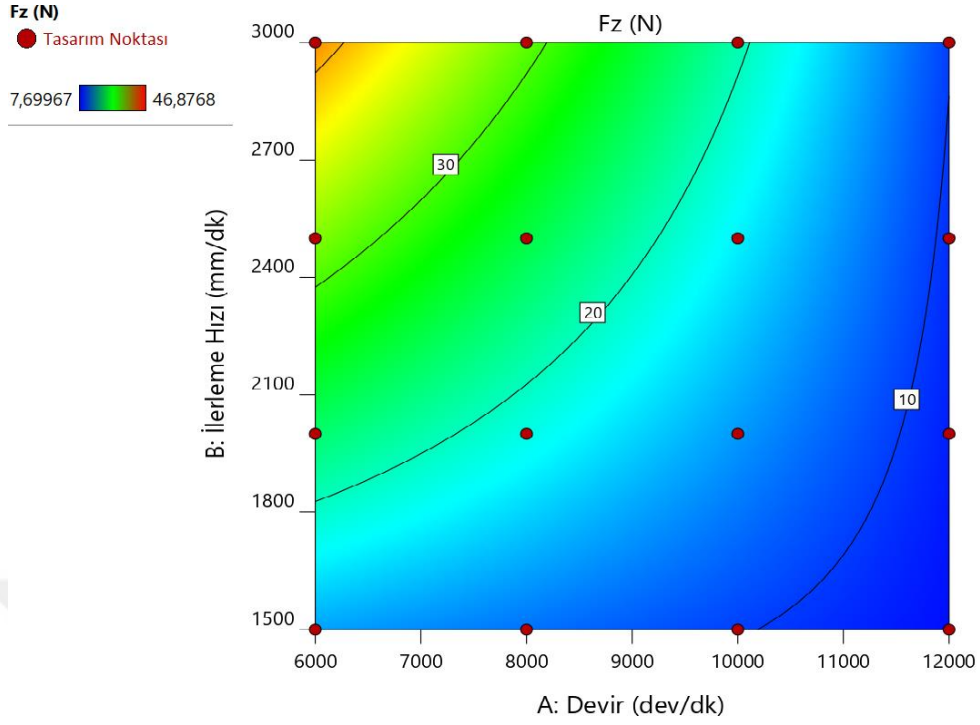
Çizelge 5.2 AB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Fz	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	1438,73	3	479,58	15,83	0,0002	Anlamlı
A-Devir	761,26	1	761,26	25,13	0,0003	
B-İlerleme	477,27	1	477,27	15,75	0,0019	
Hızı						
A*B	200,20	1	200,20	6,61	0,0245	
Artık	363,59	12	30,30			
Toplam	1802,32	15				

Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
SE	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	2,827E+07	5	5,655E+06	58,19	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	6,967E+06	1	6,967E+06	71,69	< 0.0001	
B-İlerleme	1,944E+07	1	1,944E+07	200,01	< 0.0001	
Hızı						
A*B	1,483E+05	1	1,483E+05	1,53	0,2449	
A ²	1,350E+06	1	1,350E+06	13,89	0,0039	
B ²	3,705E+05	1	3,705E+05	3,81	0,0794	
Artık	9,718E+05	10	97184,80			
Toplam	2,925E+07	15				

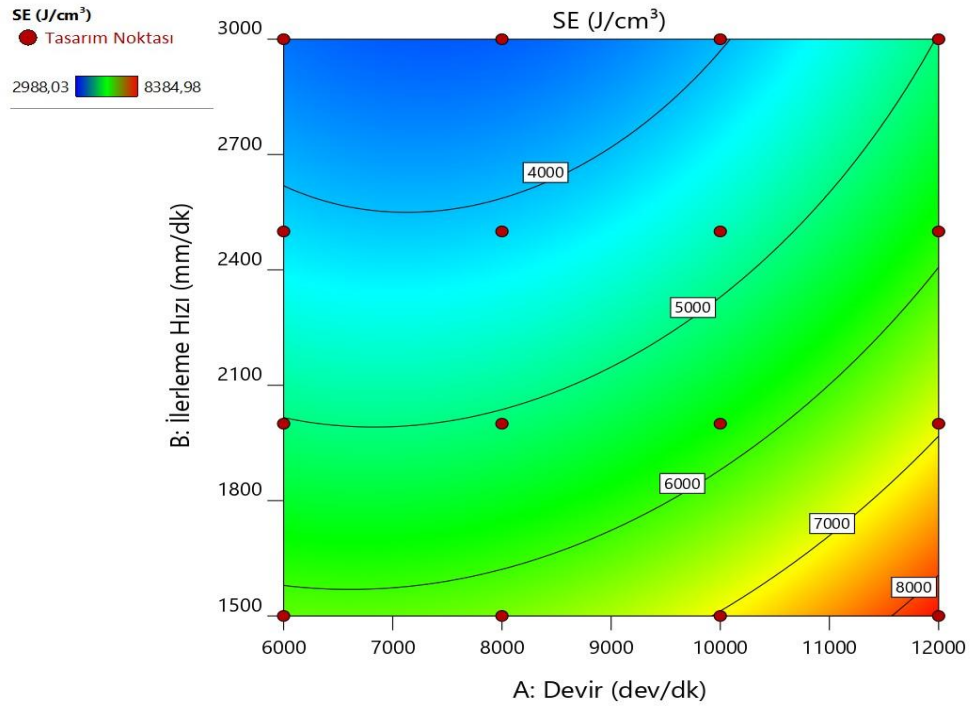
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Ra	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	13,96	9	1,55	26,05	0,0004	Anlamlı
A-Devir	1,13	1	1,13	19,02	0,0048	
B-İlerleme	0,4143	1	0,4143	6,96	0,0387	
Hızı						
A*B	0,2048	1	0,2048	3,44	0,1131	
A ²	0,0335	1	0,0335	0,5625	0,4816	
B ²	0,0114	1	0,0114	0,1920	0,6766	
A ² *B	0,7073	1	0,7073	11,88	0,0137	
A*B ²	0,0267	1	0,0267	0,4491	0,5277	
A ³	0,3153	1	0,3153	5,29	0,0610	
B ³	0,1469	1	0,1469	2,47	0,1673	
Artık	0,3573	6	0,0595			
Toplam	14,32	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



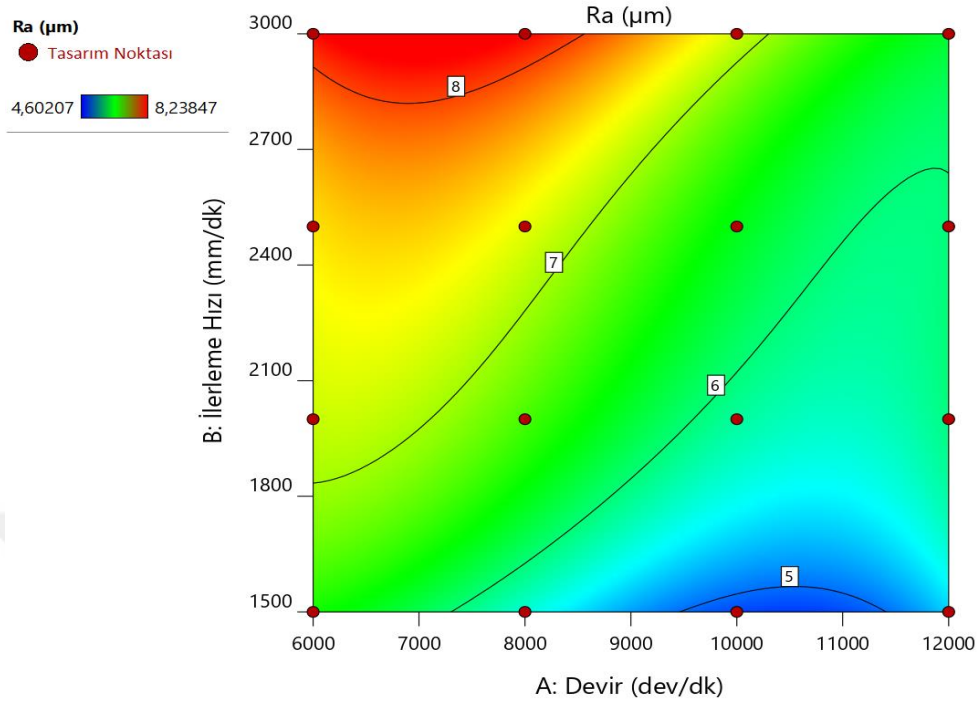
Şekil 5.2 AB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.3' te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 AB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.4' te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 AB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.2 Afyon Gri Mermer için Model Analizi

AG mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.3 'de, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.4' de verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için doğrusal, SE için ikinci dereceden ve Ra için doğrusal model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.3 AG mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0,0001	0,8203	0,7605	Önerilen
2FI		0,5651	0,8108	0,6914	
İkinci Dereceden		0,7923	0,7833	0,5674	
Kübik		0,1990	0,8495	0,3197	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		0,0006	0,6278	0,4014	Önerilen
2FI		0,0220	0,7441	0,4050	
İkinci Dereceden		0,0163	0,8652	0,6934	
Kübik		0,5958	0,8498	0,0432	

Çizelge 5.3 (Devam) AG mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.

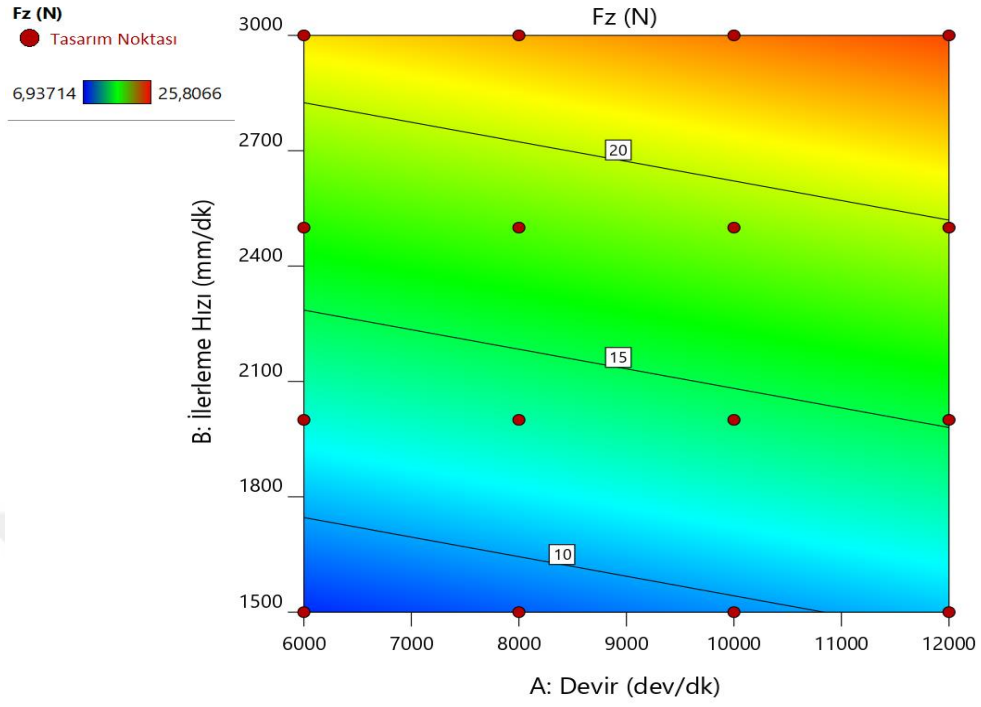
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Edilen R ²	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,7777	0,7203	Önerilen
2FI		0,4946	0,7688	0,7048	
İkinci Dereceden		0,6616	0,7445	0,5709	
Kübik		0,5789	0,7194	0,1056	

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=35,23 > F_{0,05;1;15}=4,54$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=20,25 > F_{0,05;4;15}=3,06$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=27,24 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olduğu belirlenmiştir. F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500'den küçük olduğunda, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

Çizelge 5.4 AG için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

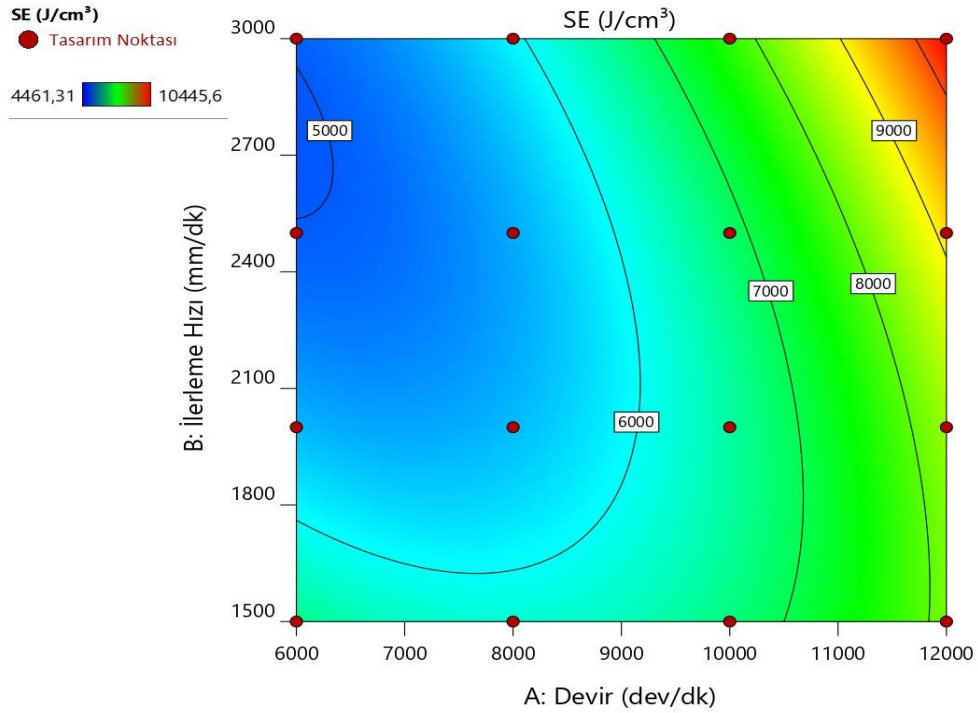
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
Fz						
Model	447,33	2	223,66	35,23	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	17,80	1	17,80	2,80	0,1179	
B-İlerleme Hızı	429,53	1	429,53	67,66	< 0.0001	
Artık	82,53	13	6,35			
Toplam	529,86	15				
SE						
Model	3,610E+07	5	7,220E+06	20,25	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	2,660E+07	1	2,660E+07	74,62	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	2,690E+05	1	2,690E+05	0,7547	0,4054	
A*B	4,675E+06	1	4,675E+06	13,11	0,0047	
A ²	3,334E+06	1	3,334E+06	9,35	0,0121	
B ²	1,220E+06	1	1,220E+06	3,42	0,0940	
Artık	3,565E+06	10	3,565E+05			
Toplam	3,967E+07	15				
Ra						
Model	4,38	2	2,19	27,24	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	0,1131	1	0,1131	1,41	0,2570	
B-İlerleme Hızı	4,27	1	4,27	53,07	< 0.0001	
Artık	1,05	13	0,0805			
Toplam	5,43	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.5’ te gösterilmiştir.



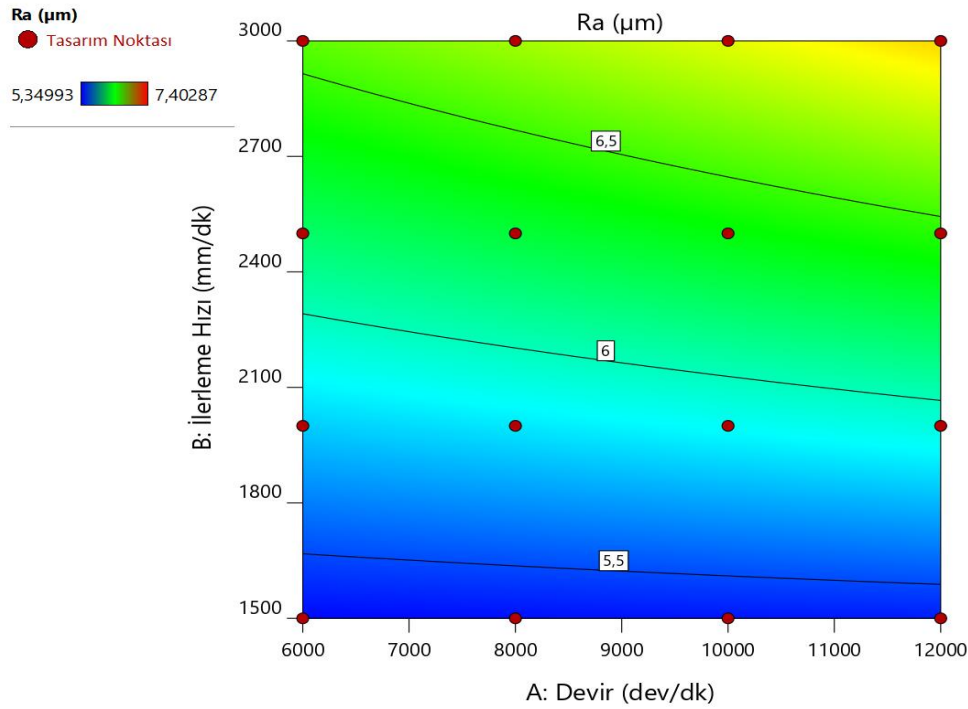
Şekil 5.5 AG için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 AG için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 AG için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.3 Bursa Beyaz Mermer için Model Analizi

BB mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.5 ‘de, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.6’ de verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için doğrusal, SE için ikinci dereceden ve Ra için kübik model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.5 BB mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8005	0,7630	Önerilen
2FI		0,3196	0,8017	0,7653	
İkinci Dereceden		0,2680	0,8171	0,6965	
Kübik		0,7041	0,7775	0,2353	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,9302	0,9002	Önerilen
2FI		0,0634	0,9439	0,9145	
İkinci Dereceden		0,0018	0,9809	0,9671	
Kübik		0,1142	0,9893	0,9648	

Çizelge 5.5 (Devam) BB mermer için modellerin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Edilen R ²	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8840	0,8509	
2FI		0,9296	0,8745	0,8173	
İkinci Dereceden		0,2606	0,8849	0,8267	
Kübik		0,0093	0,9736	0,9007	Önerilen

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=31,10 > F_{0,05;1;15}=4,54$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=155,22 > F_{0,05;4;15}=3,06$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=62,47 > F_{0,05;1;15}=2,64$ olduğu belirlenmiştir.

F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500' den küçük olduğunda, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

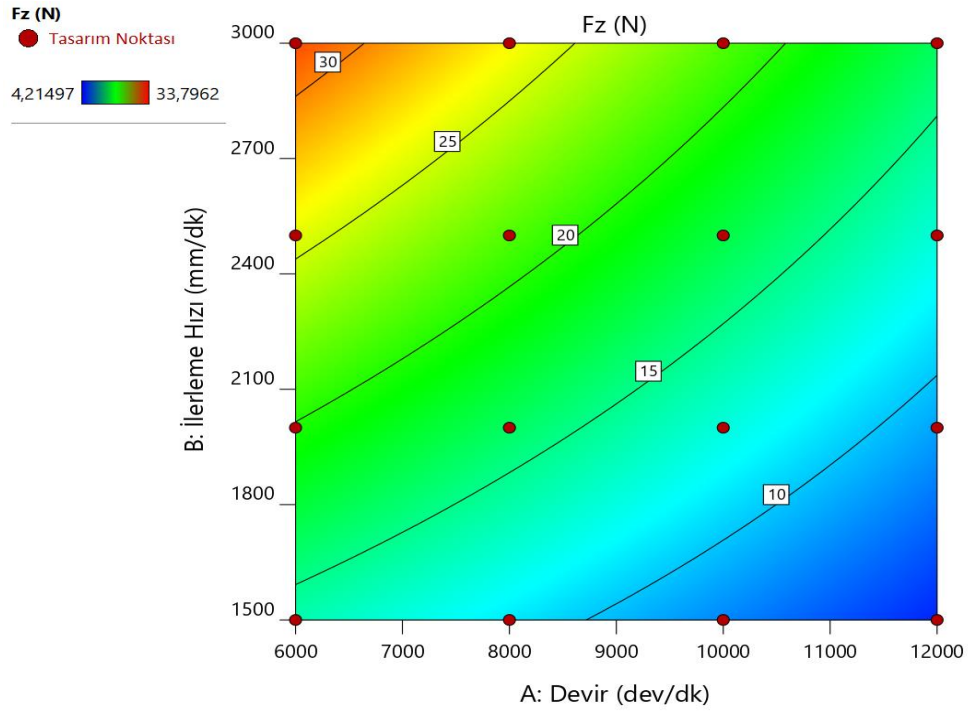
Çizelge 5.6 BB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
Model	778,45	2	389,22	31,10	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	316,26	1	316,26	25,27	0,0002	
B-İlerleme Hızı	462,19	1	462,19	36,93	< 0.0001	
Artık	162,72	13	12,52			
Toplam	941,16	15				
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
Model	5,806E+07	5	1,161E+07	155,22	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	1,163E+07	1	1,163E+07	155,42	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	4,363E+07	1	4,363E+07	583,12	< 0.0001	
A*B	9,191E+05	1	9,191E+05	12,28	0,0057	
A ²	42087,94	1	42087,94	0,5626	0,4705	
B ²	1,847E+06	1	1,847E+06	24,69	0,0006	
Artık	7,482E+05	10	74815,11			
Toplam	5,881E+07	15				

Çizelge 5.6 (Devam) BB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

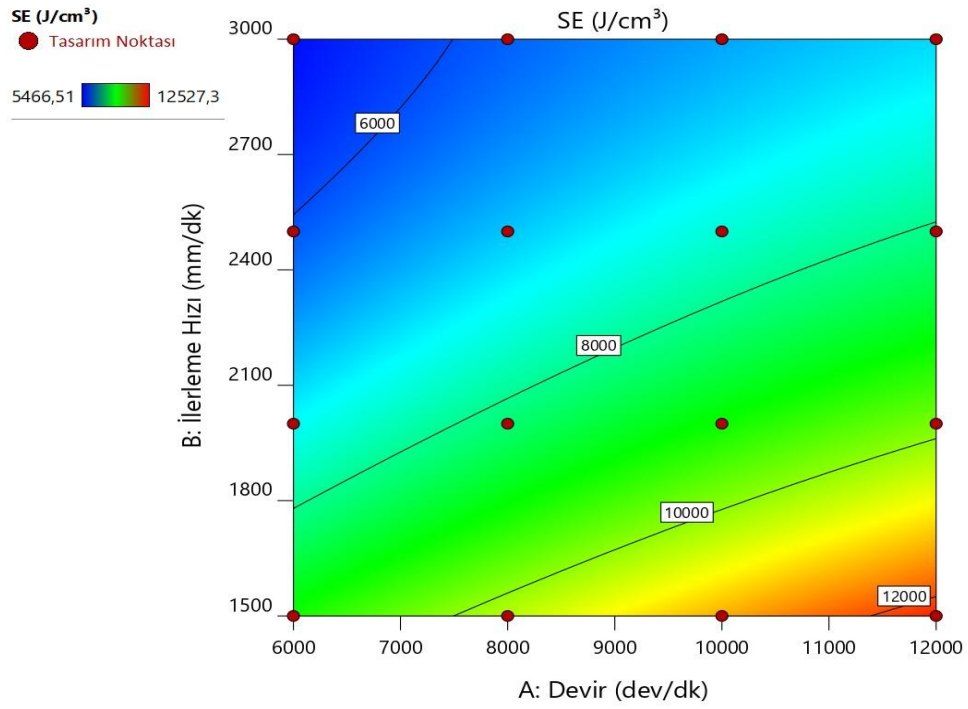
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Ra	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	7,40	9	0,8219	62,47	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	0,1045	1	0,1045	7,94	0,0304	
B-İlerleme Hızı	1,21	1	1,21	92,16	< 0.0001	
A*B	0,0005	1	0,0005	0,0387	0,8504	
A ²	0,0457	1	0,0457	3,47	0,1117	
B ²	0,1314	1	0,1314	9,99	0,0196	
A ² B	0,0055	1	0,0055	0,4146	0,5435	
AB ²	0,0830	1	0,0830	6,31	0,0458	
A ³	0,0298	1	0,0298	2,26	0,1831	
B ³	0,3766	1	0,3766	28,62	0,0017	
Artık	0,0789	6	0,0132			
Toplam	7,48	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.



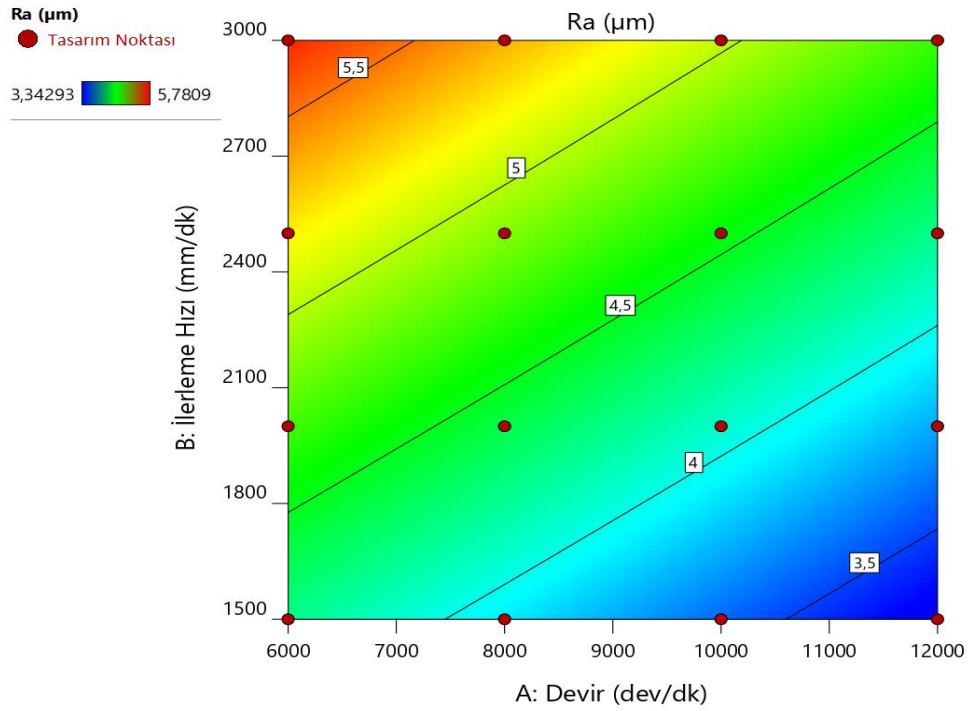
Şekil 5.8 BB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 BB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 BB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.4 Marmara Beyaz Mermer için Model Analizi

MARB mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.7 'de, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.8' de verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için doğrusal, SE için ikinci dereceden ve Ra için doğrusal model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.7 MARB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8360	0,7932	Önerilen
2FI		0,4476	0,8310	0,7698	
İkinci Dereceden		0,3320	0,8374	0,6982	
Kübik		0,8624	0,7752	-0,0386	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,9406	0,9123	
2FI		0,0075	0,9654	0,9303	
İkinci Dereceden		< 0.0001	0,9957	0,9896	
Kübik		0,0478	0,9983	0,9908	Önerilen
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		0,0168	0,3848	0,2026	
2FI		0,0528	0,5187	0,4517	Önerilen
İkinci Dereceden		0,1274	0,6175	0,2876	
Kübik		0,5004	0,6082	-1,6070	

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=39,24 > F_{0,05;1;15}=4,54$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=952,82 > F_{0,05;8;15}=2,64$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=6,39 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olduğu belirlenmiştir.

F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500' den küçük olduğunda, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

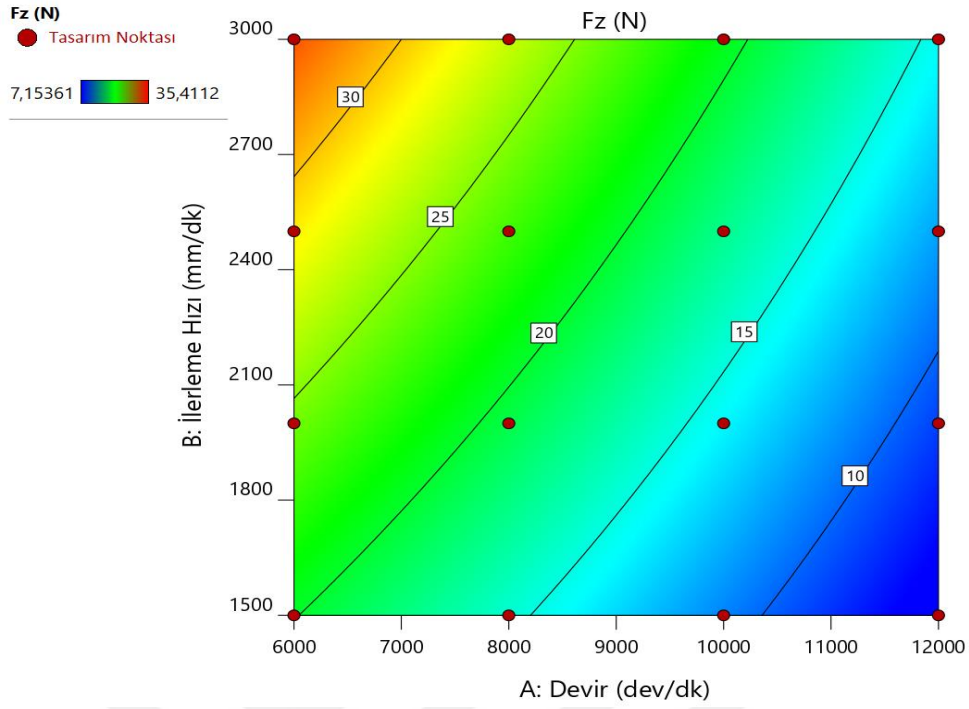
Çizelge 5.8 MARB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Fz	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	839,59	2	419,80	39,24	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	587,62	1	587,62	54,93	< 0.0001	
B-İlerleme	251,97	1	251,97	23,55	0,0003	
Hızı						
Artık	139,08	13	10,70			
Toplam	978,67	15				

Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
SE	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	4,958E+07	9	5,509E+06	952,82	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	1,475E+06	1	1,475E+06	255,17	< 0.0001	
B-İlerleme	1,034E+06	1	1,034E+06	178,84	< 0.0001	
Hızı						
A*B	1,181E+06	1	1,181E+06	204,24	< 0.0001	
A ²	4,394E+05	1	4,394E+05	76,00	0,0001	
B ²	7,940E+05	1	7,940E+05	137,34	< 0.0001	
A ² B	17842,32	1	17842,32	3,09	0,1295	
AB ²	34369,75	1	34369,75	5,94	0,0506	
A ³	638,27	1	638,27	0,1104	0,7510	
B ³	54323,64	1	54323,64	9,40	0,0221	
Artık	34690,62	6	5781,77			
Toplam	4,962E+07	15				

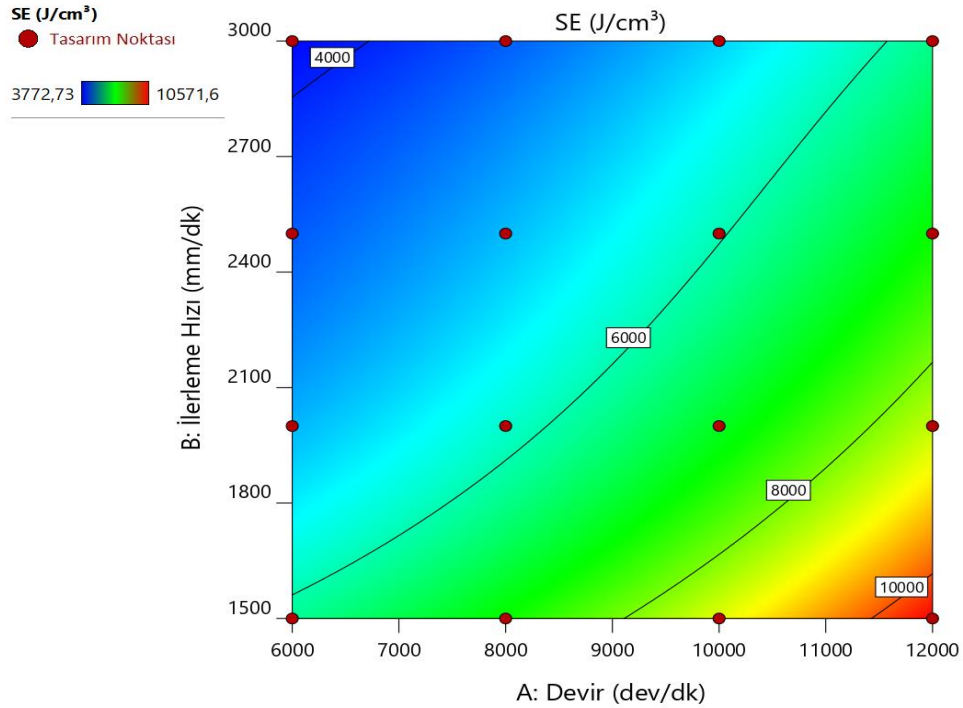
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Ra	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	3,35	3	1,12	6,39	0,0078	Anlamlı
A-Devir	0,3498	1	0,3498	2,00	0,1827	
B-İlerleme	2,19	1	2,19	12,55	0,0041	
Hızı						
A*B	0,8073	1	0,8073	4,62	0,0528	
Artık	2,10	12	0,1749			
Toplam	5,45	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.11’ de gösterilmiştir.



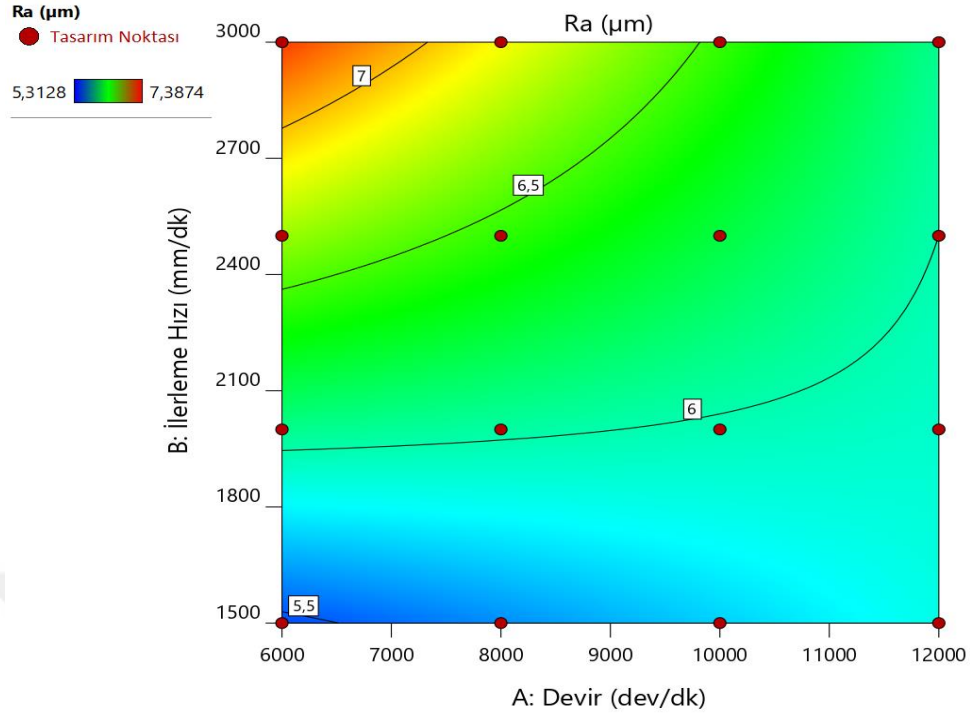
Şekil 5.11 MARB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 MARB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 MARB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.5 Muğla Beyaz Mermer için Model Analizi

MUB mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.9’ da, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.10’ da verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için doğrusal, SE için kübik ve Ra için doğrusal model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.9 MUB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.

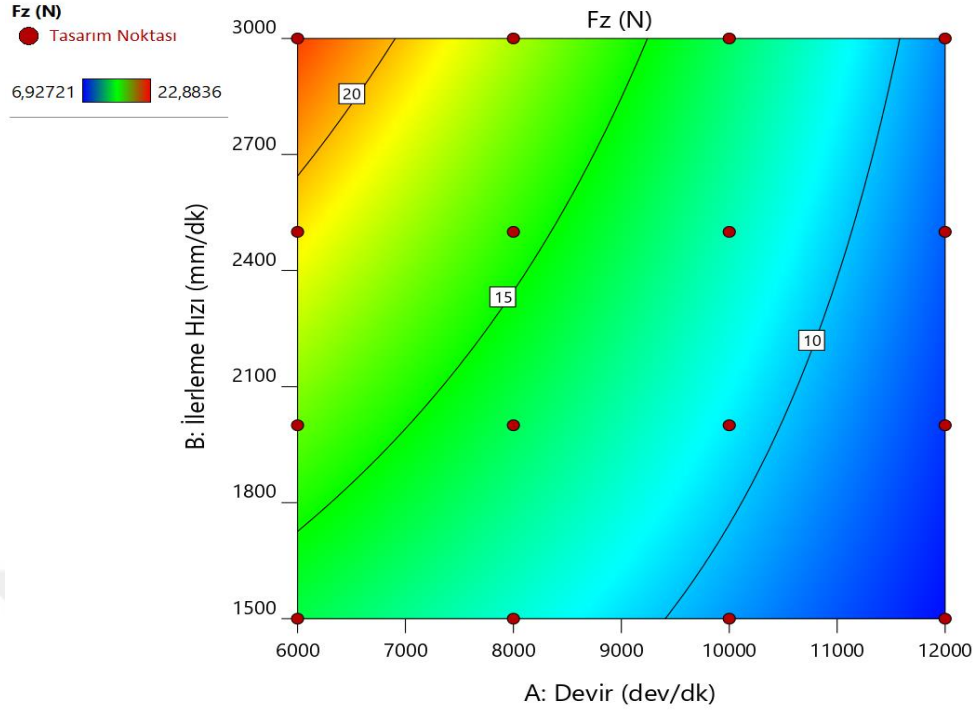
Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		0,0001	0,7158	0,6360	Önerilen
2FI		0,1959	0,7338	0,6169	
İkinci Dereceden		0,1161	0,7923	0,6242	
Kübik		0,4937	0,7886	-0,0709	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8798	0,8420	Önerilen
2FI		0,3781	0,8783	0,8364	
İkinci Dereceden		0,0102	0,9417	0,8956	
Kübik		0,0095	0,9866	0,9484	
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,7801	0,7259	Önerilen
2FI		0,7980	0,7631	0,6765	
İkinci Dereceden		0,3481	0,7698	0,6309	
Kübik		0,3597	0,7965	0,2682	

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=19,89 > F_{0,05;1;15}=4,54$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=123,27 > F_{0,05;8;15}=2,64$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=27,61 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olduğu belirlenmiştir. F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, p-değerleri 0,0500' den küçük olduğunda, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

Çizelge 5.10 MUB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

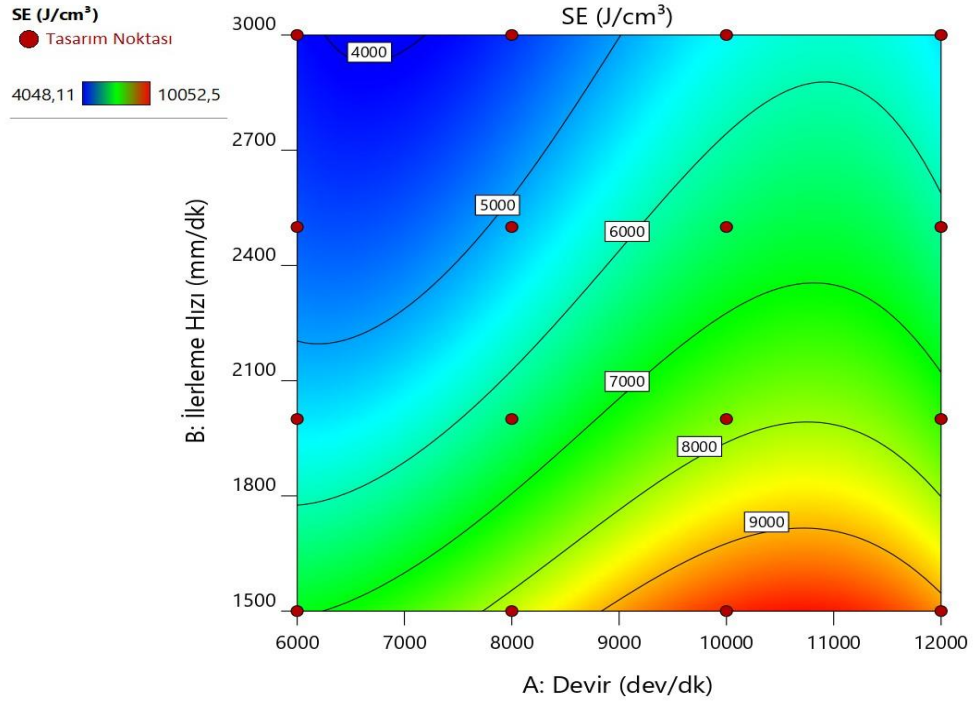
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Fz	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	267,77	2	133,88	19,89	0,0001	Anlamlı
A-Devir	210,70	1	210,70	31,30	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	57,07	1	57,07	8,48	0,0121	
Artık	87,50	13	6,73			
Toplam	355,27	15				
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
SE	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	4,307E+07	9	4,786E+06	123,27	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	3,078E+06	1	3,078E+06	79,27	0,0001	
B-İlerleme Hızı	2,334E+06	1	2,334E+06	60,13	0,0002	
A*B	2,942E+05	1	2,942E+05	7,58	0,0332	
A ²	1,335E+06	1	1,335E+06	34,38	0,0011	
B ²	1,197E+06	1	1,197E+06	30,83	0,0014	
A ² B	3,043E+05	1	3,043E+05	7,84	0,0312	
AB ²	291,45	1	291,45	0,0075	0,9338	
A ³	1,134E+06	1	1,134E+06	29,22	0,0017	
B ³	12506,58	1	12506,58	0,3221	0,5909	
Artık	2,329E+05	6	38824,21			
Toplam	4,330E+07	15				
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Ra	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	8,59	2	4,29	27,61	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	0,6033	1	0,6033	3,88	0,0705	
B-İlerleme Hızı	7,98	1	7,98	51,34	< 0.0001	
Artık	2,02	13	0,1555			
Toplam	10,61	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.14' te gösterilmiştir.



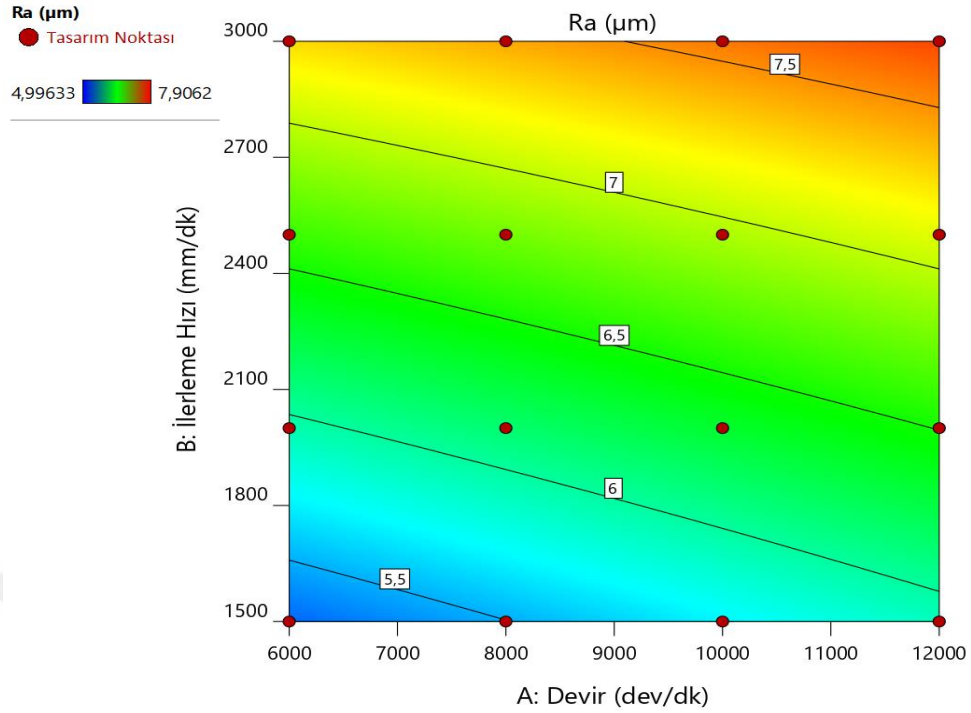
Şekil 5.14 MUB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.15' te gösterilmiştir.



Şekil 5.15 MUB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.16' da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 MUB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.6 Uşak Beyaz Mermer için Model Analizi

UB mermer için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.11 'de, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.12' de verilmiştir. Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için 2FI, SE için ikinci dereceden ve Ra için ikinci dereceden model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.11 UB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8966	0,8632	Önerilen
2FI		0,0393	0,9225	0,8811	
İkinci Dereceden		0,4300	0,9215	0,8386	
Kübik		0,3503	0,9314	0,6545	
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,9439	0,9225	Önerilen
2FI		0,0500	0,9564	0,9328	
İkinci Dereceden		0,0029	0,9838	0,9774	
Kübik		0,0638	0,9927	0,9755	

Çizelge 5.11 (Devam) UB için oluşturulan modelin regresyon analiz sonuçları.

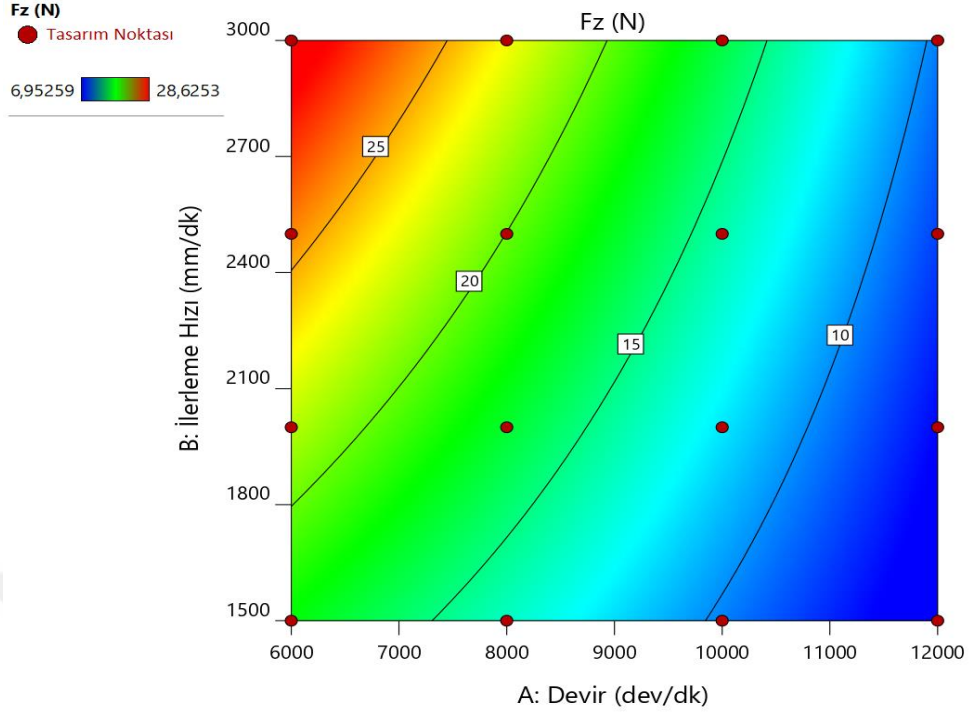
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Edilen R ²	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,8556	0,7891	
2FI		0,9027	0,8438	0,6643	
İkinci Dereceden	0,0029	0,9418	0,8641		Önerilen
Kübik		0,2343	0,9569	0,7709	

Önerilen modeller için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=60,56 > F_{0,05;2;15}=3,68$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=183,05 > F_{0,05;4;15}=3,06$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=49,58 > F_{0,05;4;15}=3,06$ olduğu belirlenmiştir. F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500' den küçük olduğunda, model terimlerinin de anlamlı olduğunu belirtir.

Çizelge 5.12 UB için oluşturulan modelin varyans analiz sonuçları.

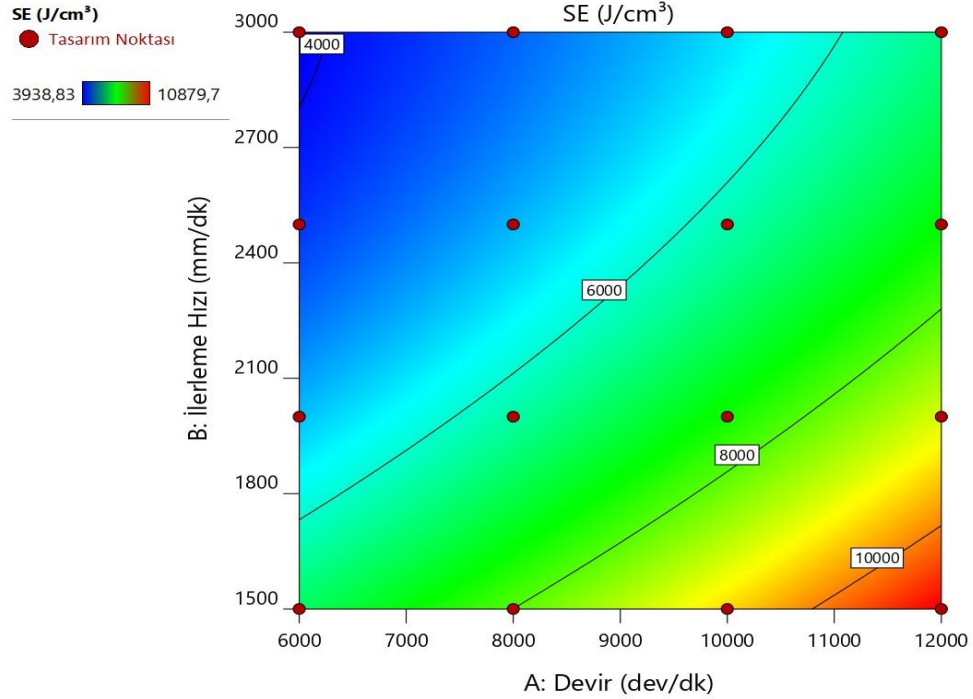
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Fz	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	737,63	3	245,88	60,56	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	569,96	1	569,96	140,38	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	145,96	1	145,96	35,95	< 0.0001	
A*B	21,71	1	21,71	5,35	0,0393	
Artık	48,72	12	4,06			
Toplam	786,36	15				
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
SE	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	5,743E+07	5	1,149E+07	183,05	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	2,540E+07	1	2,540E+07	404,86	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	2,983E+07	1	2,983E+07	475,37	< 0.0001	
A*B	8,006E+05	1	8,006E+05	12,76	0,0051	
A ²	1,117E+05	1	1,117E+05	1,78	0,2118	
B ²	1,285E+06	1	1,285E+06	20,48	0,0011	
Artık	6,275E+05	10	62747,63			
Toplam	5,806E+07	15				
Kaynak	Kareler	Serbestlik	Ortalama	F	p	Modelin
Ra	Toplamı	Derecesi	Kare	değeri	değeri	Geçerliliği
Model	16,64	5	3,33	49,58	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	5,18	1	5,18	77,23	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	9,96	1	9,96	148,41	< 0.0001	
A*B	0,0028	1	0,0028	0,0419	0,8419	
A ²	1,36	1	1,36	20,22	0,0011	
B ²	0,1355	1	0,1355	2,02	0,1858	
Artık	0,6713	10	0,0671			
Toplam	17,32	15				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.17' de gösterilmiştir.



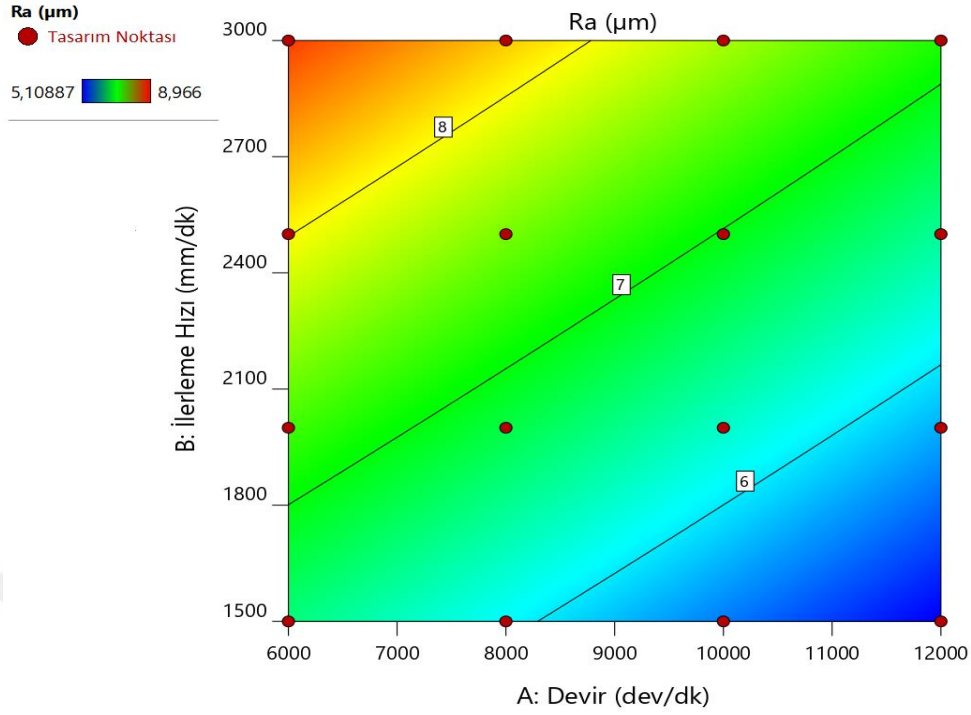
Şekil 5.17 UB için oluşturulan modelin Fz kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 UB için oluşturulan modelin SE kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.19’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.19 UB için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.1.7 Metamorfik Kökenli Mermerler için Genel Bir Model Analizi

Metamorfik kökenli altı farklı mermerin frezeleme işlemi sırasında elde edilen veriler bir araya getirilerek, referans niteliğinde bir optimum işleme parametresi belirlenmesi için çalışılmıştır. Referans optimum parametresi (ROP) belirlenmesi için seçilecek modelin regresyon analizi Çizelge 5.13 'te, modele ait varyans analiz sonuçları Çizelge 5.14' te verilmiştir.

Regresyon analizi sonucunda en yüksek R^2 değerleri Fz için 2FI, SE ve Ra için doğrusal model olarak bulunmuştur. Tahmin modellerinin oluşturulmasında seçilen bu modeller kullanılmıştır.

Çizelge 5.13 Metamorfik kökenli mermerler için modelin regresyon analiz sonuçları.

Kaynak	Fz	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R^2	Tahmin Edilen R^2	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,5932	0,5752	Önerilen
2FI		0,0125	0,6159	0,5957	
İkinci Dereceden		0,1843	0,6219	0,5925	
Kübik		0,9980	0,6048	0,5544	

Çizelge 5.13 (Devam) Metamorfik kökenli mermerler için modelin regresyon analiz sonuçları.

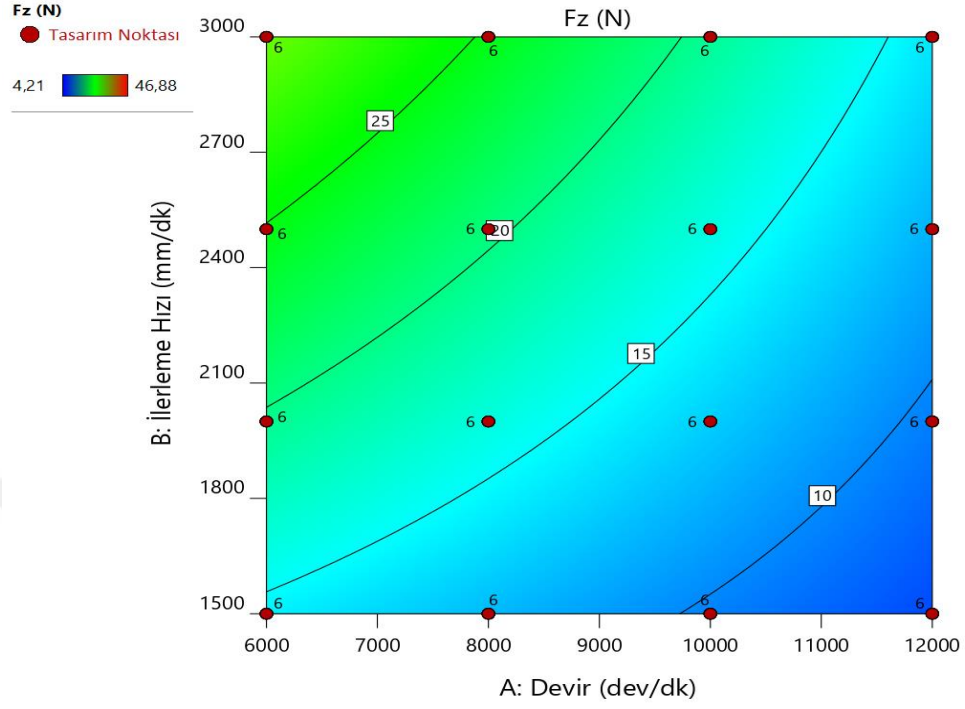
Kaynak	SE	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Edilen R ²	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,6011	0,5814	Önerilen
2FI		0,5671	0,5982	0,5706	
İkinci Dereceden		0,0757	0,6121	0,5766	
Kübik		0,9903	0,5955	0,5375	
Kaynak	Ra	Sıralı p değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin Edilen R ²	Model Seçimi
Doğrusal		< 0.0001	0,3165	0,2858	Önerilen
2FI		0,5638	0,3116	0,2705	
İkinci Dereceden		0,6027	0,3041	0,2458	
Kübik		0,9531	0,2775	0,1801	

Metamorfik kökenli mermerler için yapılan analizlerde; Fz'nin 2FI modeli için $F=51,78 > F_{0,05;2;15}=3,68$, SE'nin ikinci dereceden modeli için $F=72,57 > F_{0,05;1;15}=4,54$, ve Ra'nın kübik modeli için $F=22,99 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olduğu belirlenmiştir. F test değerlerinin F dağılım değerlerinden yüksek olması, Fz, SE ve Ra için önerilen modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, P-değerleri 0,0500' den küçük olduğundan, model terimlerinin de anlamlı olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.14 Metamorfik kökenli mermerler için modelin varyans analiz sonuçları.

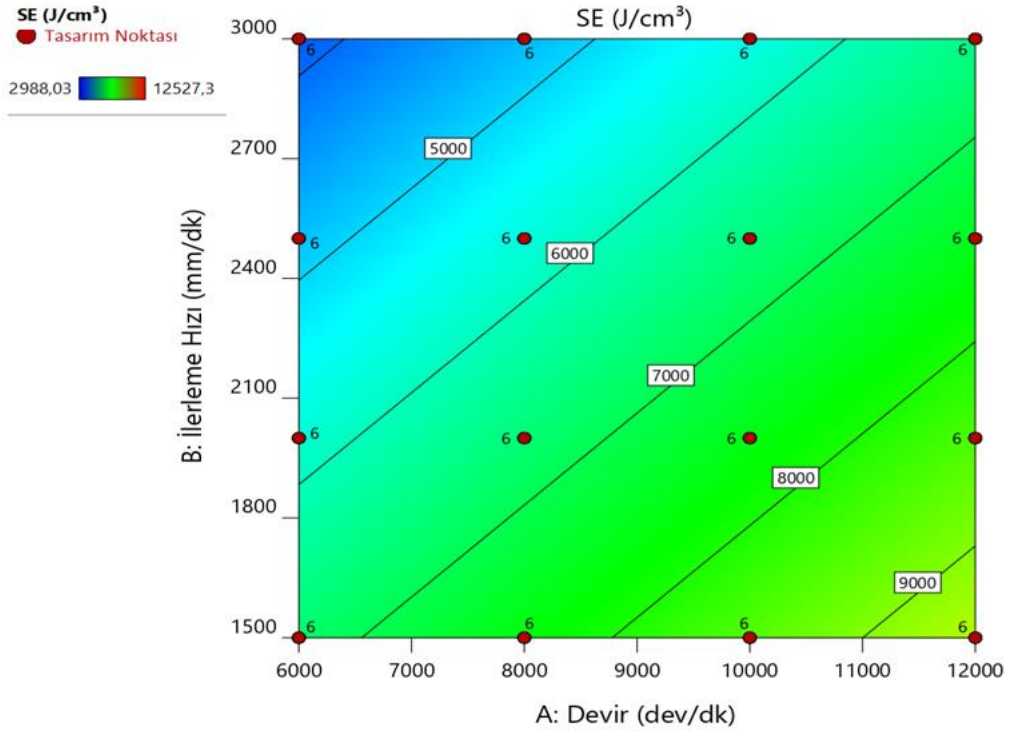
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
Fz						
Model	3598,29	3	1199,43	51,78	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	1795,06	1	1795,06	77,49	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	1652,81	1	1652,81	71,35	< 0.0001	
A*B	150,42	1	150,42	6,49	0,0125	
Artık	2131,17	92	23,16			
Toplam	5729,45	95				
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
SE						
Model	2,117E+08	2	1,059E+08	72,57	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	9,721E+07	1	9,721E+07	66,63	< 0.0001	
B-İlerleme Hızı	1,145E+08	1	1,145E+08	78,50	< 0.0001	
Artık	1,357E+08	93	1,459E+06			
Toplam	3,474E+08	95				
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	Modelin Geçerliliği
Ra						
Model	39,45	2	19,73	22,99	< 0.0001	Anlamlı
A-Devir	5,04	1	5,04	5,88	< 0.0173	
B-İlerleme Hızı	34,41	1	34,41	40,11	< 0.0001	
Artık	79,79	93	0,8579			
Toplam	119,24	95				

Fz için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.20’ de gösterilmiştir.



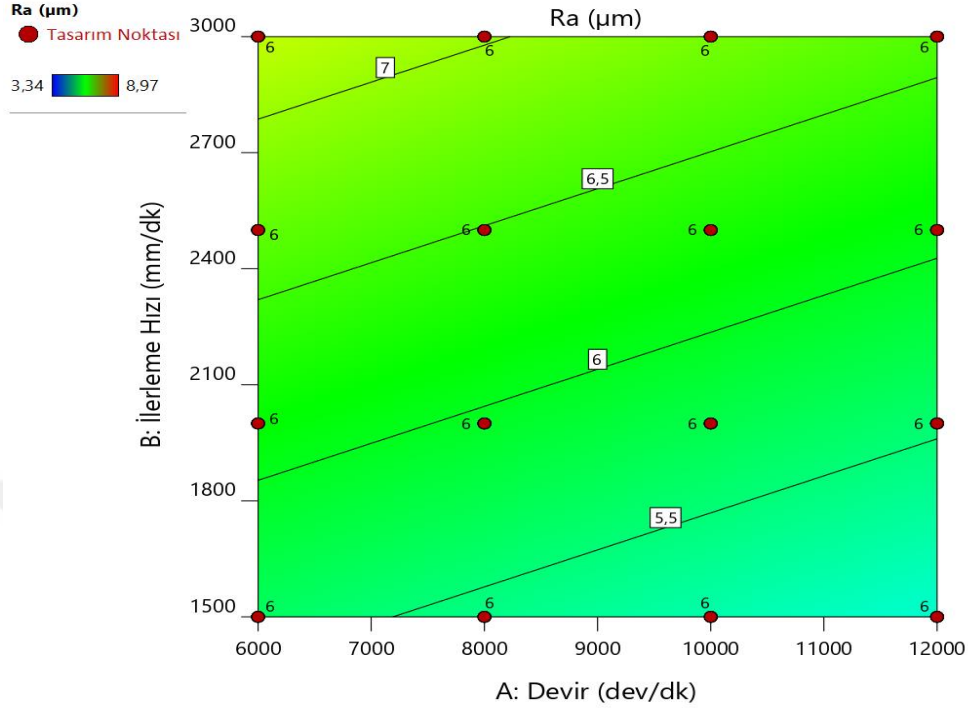
Şekil 5.20 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

SE için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.21’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

Ra için oluşturulan modelin kontur grafikleri Şekil 5.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Metamorfik kökenli mermerler için oluşturulan modelin Ra kontur grafiği.

5.2 Tahmin Fonksiyonları

Deneylerden elde edilen verilerin bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi modelleyerek sistemin nasıl tepki vereceğini tahmin edebilmek için tahmin fonksiyonları oluşturulmuştur.

Tüm mermerler için Fz, SE ve Ra için tahmin formülleri oluşturulmuştur. RSM kullanılarak deneylerden elde edilen verilerin analizi sonucu tahmin değerleri hesaplanmış ve bu değerler, deneylerde elde edilen ölçüm değerleri ile regresyon analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve tahmin değerlerin uyumluluğunu analiz etmek için F testi yapılmıştır. Toplam serbestlik derecesi (SD), regresyon ve hata serbestlik derecelerinin toplamıdır ve veri kümesinin boyutundan 1 çıkarılarak bulunur. 16 adet veri kümesi olduğu için toplam serbestlik derecesi 15 tir. Regresyon SD, bağımsız değişkenlerin sayısıdır ve bir bağımsız değişken olduğu için değeri 1’ dir. Hata SD, toplam SD’ den regresyon SD’ nin çıkarılması ile bulunur ve bu değer 14’ tür. Varyans analizinde regresyon için kareler toplamı (KT), bağımlı değişkendeki toplam

varyasyondur. Tahmin edilen değer ile tüm veri noktalarının değerlerinin ortalaması arasındaki farkın karesinin toplamıdır. Hata için karelerin hata toplamı (KT), tüm veri noktalarından ölçülen ve tahmin edilen değerleri arasındaki farkın karesinin toplamıdır. Toplam kareler toplamı bu elde edilen değerlerin toplamıdır. Ortalama Karesel Hatalar (OKH), hem regresyon hem de artık değerler için kareler toplamının ortalaması veya kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür. F değeri regresyon OKH' nin kalan OKH' ye bölünmesi ile elde edilir (Box and Draper 2007).

Bu çalışmada hipotezler; H0: Uyumlu değil. H1: Uyumlu. %95 güven aralığında, F dağılım tablosundaki karşılığı $F_{0,05;1;15} = 4,54$ tür. Hesaplanan F değerleri bu değerden küçükse ölçülen ve tahmin değerler arası uyumlu olmadığı, büyükse uyumlu olduğu kabul edilir.

AB mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri Çizelge 5.15 ve 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.15 AB mermer için tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$-33,05595 + (0,003282 \cdot \text{Devir}) + (0,035239 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-2,82985E-06 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$+13975,56427 + (-0,838802 \cdot \text{Devir}) + (-4,01762 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-0,000077 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (+0,000073 \cdot \text{Devir}^2) + (+0,000609 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2)$
Ra	$-4,93671 + (+0,001727 \cdot \text{Devir}) + (+0,009161 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (+1,93108E-06 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-4,83228E-07 \cdot \text{Devir}^2) + (-7,16310E-06 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (-9,40275E-11 \cdot \text{Devir}^2 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-7,31300E-11 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (+2,61566E-11 \cdot \text{Devir}^3) + (+1,14287E-09 \cdot \text{İlerleme Hızı}^3)$

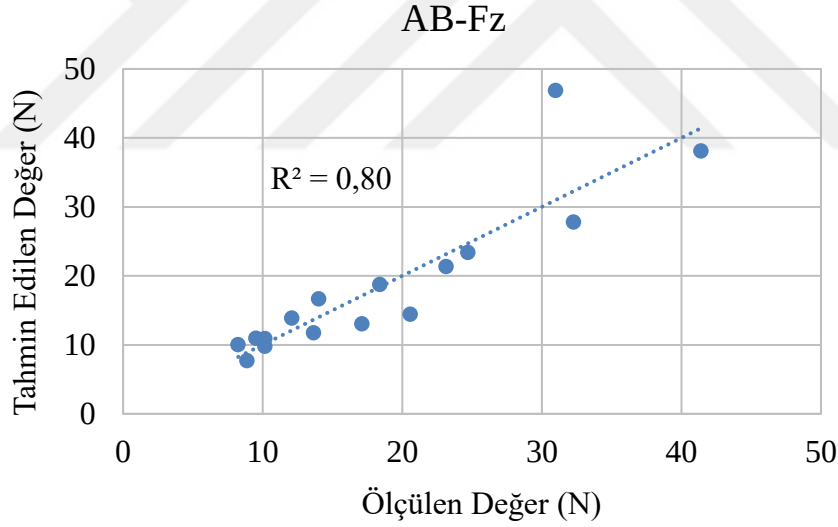
Çizelge 5.16 AB mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen Fz (N)	Tahmin Fz (N)	Hata (%)	Ölçülen SE (J/cm ³)	Tahmin SE (J/cm ³)	Hata (%)	Ölçülen Ra (µm)	Tahmin Ra (µm)	Hata (%)
1	16,66	14,03	18,78	5985,28	6207,12	3,57	6,37	6,47	1,55
2	21,38	23,16	7,67	4789,17	5032,47	4,83	7,25	7,14	1,54
3	27,80	32,29	13,89	4214,76	4162,17	1,26	7,43	7,43	0,00
4	38,09	41,42	8,03	3834,84	3596,24	6,63	8,20	8,20	0,00
5	13,89	12,10	14,79	6804,14	6331,90	7,46	5,93	5,65	4,96

Çizelge 5.16 (Devam) AB mermer için tahmin fonksiyonları.

No	Ölçülen Fz (N)	Tahmin Fz (N)	Hata (%)	Ölçülen SE (J/cm ³)	Tahmin SE (J/cm ³)	Hata (%)	Ölçülen Ra (µm)	Tahmin Ra (µm)	Hata (%)
6	18,75	18,40	1,90	5379,10	5080,22	5,88	6,40	6,68	4,19
7	23,40	24,70	5,27	4385,50	4132,89	6,11	7,25	7,25	0,00
8	46,88	31,00	51,22	2988,03	3489,92	14,38	8,24	8,24	0,00
9	9,81	10,17	3,59	6848,31	7037,68	2,69	4,60	4,86	5,35
10	11,74	13,65	13,96	5397,26	5708,96	5,46	6,15	5,87	4,77
11	13,04	17,12	23,81	4640,52	4684,60	0,94	6,28	6,35	1,10
12	14,45	20,59	29,81	3987,91	3964,60	0,59	7,23	7,18	0,70
13	10,05	8,25	21,83	8384,98	8324,45	0,73	5,44	5,35	1,68
14	7,70	8,89	13,38	6810,14	6918,70	1,57	5,84	5,96	2,01
15	10,94	9,53	14,79	5920,86	5817,31	1,78	6,06	5,98	1,34
16	10,92	10,17	7,37	5138,70	5020,28	2,36	6,23	6,27	0,64

AB mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.23' te verilmiştir.



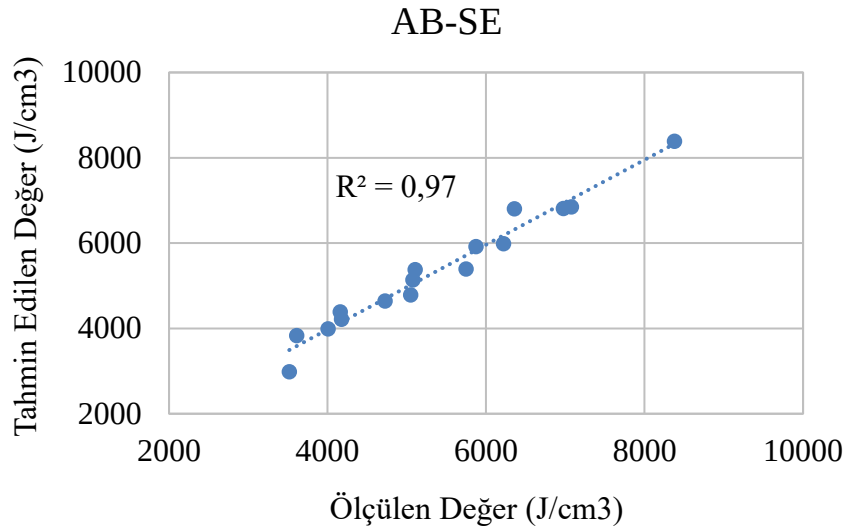
Şekil 5.23 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

AB mermerin Fz için hesaplanan F testi Çizelge 5.17' de verilmiştir.

Çizelge 5.17 AB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	1148,78	1147,78	55,36
Hata	14	290,49	20,75	
Toplam	15	1439,28		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,80$ ' dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 55,36 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. AB mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.24'te F testi sonucu Çizelge 5.18'de verilmiştir.

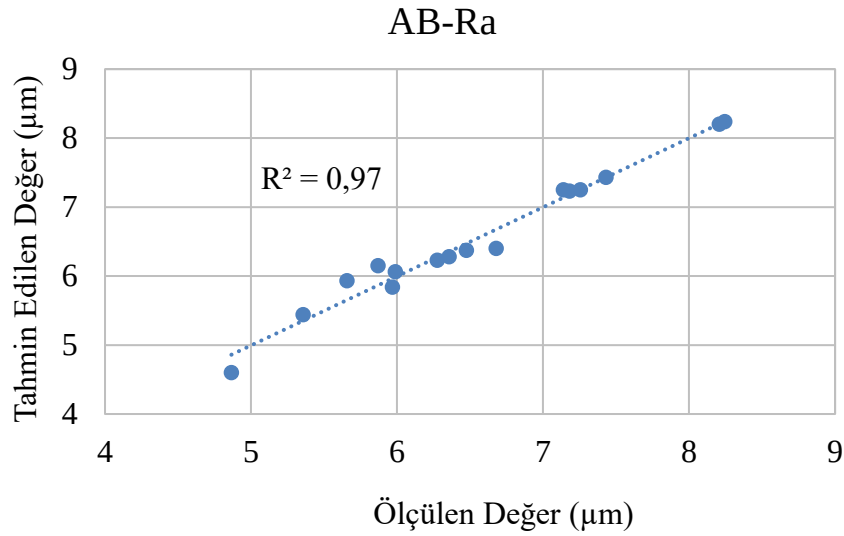


Şekil 5.24 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.18 AB mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	27631299	2763199	406,04
Hata	14	952703	68050	
Toplam	15	28584002		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,97$ ' dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 406,04 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. AB mermerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.25' te, F testi sonucu Çizelge 5.19' da verilmiştir.



Şekil 5.25 AB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.19 AB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	13,5585	13,5585	535,88
Hata	14	0,3542	0,0253	
Toplam	15	13,9127		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,97$ ’ dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 535,88 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. AG mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri Çizelge 5.20 ve 5.21’de verilmiştir.

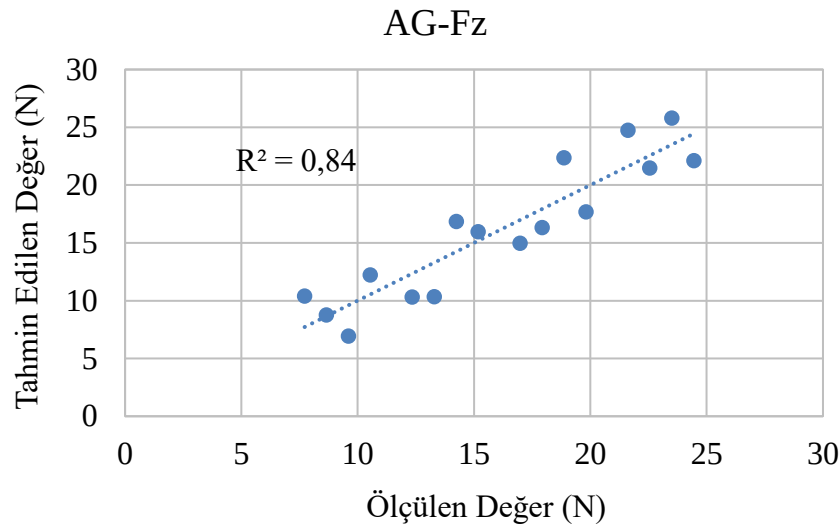
Çizelge 5.20 AG mermer için tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$-9,01458 + (+0,000472 \cdot \text{Devir}) + (+0,009269 \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$+23799,08222 + (-2,45062 \cdot \text{Devir}) + (-8,63109 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (+0,000432 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (+0,000114 \cdot \text{Devir}^2) + (+0,001105 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2)$
Ra	$+3,66184 + (0,000038 \cdot \text{Devir}) + (0,000924 \cdot \text{İlerleme Hızı})$

Çizelge 5.21 AG mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen Fz (N)	Tahmin Fz (N)	Hata (%)	Ölçülen SE (J/cm ³)	Tahmin SE (J/cm ³)	Hata (%)	Ölçülen Ra (µm)	Tahmin Ra (µm)	Hata (%)
1	10,41	7,72	34,87	7615,08	6634,82	14,77	5,51	5,28	4,49
2	10,32	12,35	16,46	4461,31	5549,80	19,61	5,66	5,74	1,29
3	14,98	16,99	11,81	4867,19	5017,14	2,99	6,49	6,20	4,63
4	24,74	21,62	14,42	5115,30	5036,83	1,56	6,45	6,66	3,11
5	8,77	8,66	1,25	5625,85	6226,46	9,65	5,41	5,35	1,14
6	10,34	13,30	22,23	5805,56	5573,87	4,16	5,70	5,81	1,99
7	16,33	17,93	8,93	6085,82	5473,64	11,18	5,71	6,28	8,95
8	21,48	22,56	4,81	6221,68	5925,76	4,99	6,72	6,74	0,27
9	6,94	9,61	27,75	6424,49	6731,12	4,56	5,35	5,43	1,44
10	16,86	14,24	18,40	6693,32	6510,97	2,80	5,75	5,89	2,38
11	22,38	18,87	18,58	7009,35	6843,17	2,43	6,46	6,35	1,69
12	25,81	23,51	9,79	7146,63	7727,72	7,52	7,40	6,81	8,64
13	12,22	10,55	15,84	8279,59	8148,80	1,60	5,48	5,50	0,35
14	15,97	15,18	5,18	8424,10	8361,08	0,75	6,19	5,97	3,73
15	17,70	19,82	10,68	9108,74	9125,71	0,19	6,13	6,43	4,68
16	22,13	24,45	9,49	10445,59	10442,70	0,03	6,85	6,89	0,60

AG mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.26’ da, F testi sonucu Çizelge 5.22’ de verilmiştir.



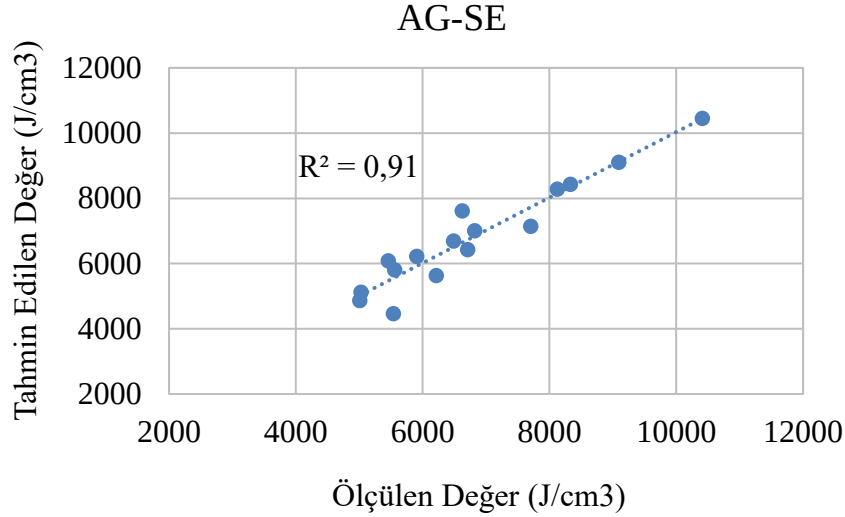
Şekil 5.26 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.22 AG mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	377,532	377,532	75,88
Hata	14	69,659	4,976	
Toplam	15	447,190		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,84$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 75,88 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

AG mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.27’ de, F testi sonucu Çizelge 5.23’ te verilmiştir.



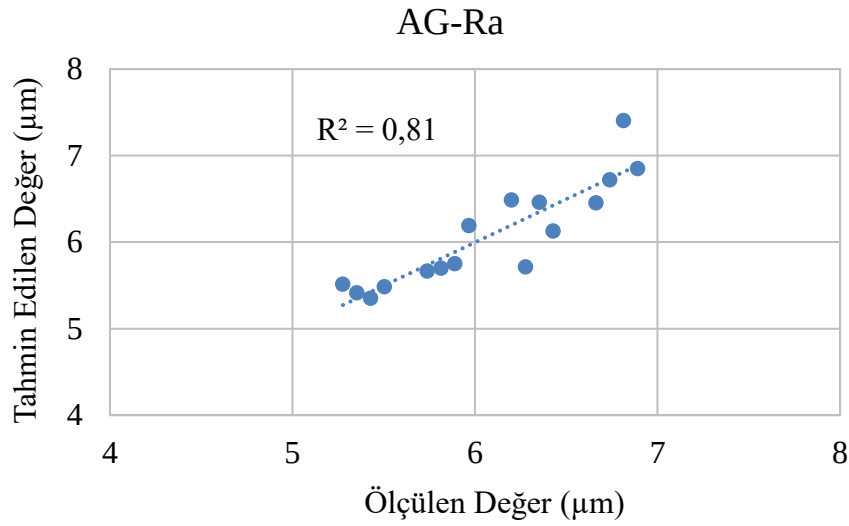
Şekil 5.27 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.23 AG mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	32562186	32562186	141,76
Hata	14	3215725	459693	
Toplam	15	35777911		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,91$ ' dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 141,76 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

AG mermerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.28' de, F testi sonucu Çizelge 5.24' te verilmiştir.



Şekil 5.28 AG mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.24 AG mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	3,530	3,530	58,2 ³
Hata	14	0,849	0,060	
Toplam	15	4,379		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,81$ ' dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 62,15 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu

olduğunu göstermiştir. BB mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri Çizelge 5.25 ve 5.26’da verilmiştir.

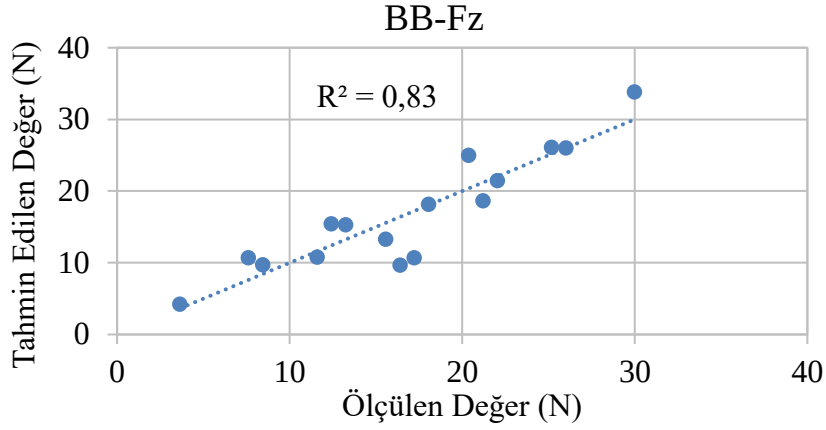
Çizelge 5.25 BB mermer için tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$+13,06813 + (-0,001988 \cdot \text{Devir}) + (0,009614 \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$+13013,65634 + (1,04345 \cdot \text{Devir}) + (-7,34407 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-0,000192 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-0,000013 \cdot \text{Devir}^2) + (0,001359 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2)$
Ra	$+23,49223 + (-0,001334 \cdot \text{Devir}) + (+0,021631 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-7,33\text{E-}07 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (2,12\text{E-}07 \cdot \text{Devir}^2) + (0,000012 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (8,26\text{E-}12 \cdot \text{Devir}^2 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (1,29\text{E-}10 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (-8,04\text{E-}12 \cdot \text{Devir}^3) + (-1,83\text{E-}09 \cdot \text{İlerleme Hızı}^3)$

Çizelge 5.26 BB mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen- Fz	Tahmin- Fz	Hata (%)	Ölçülen- SE	Tahmin- SE	Hata (%)	Ölçülen- Ra	Tahmin- Ra	Hata (%)
1	13,27	15,56	14,72	8986,80	9128,93	1,56	4,34	4,34	0,00
2	24,99	20,37	22,69	7167,54	7260,07	1,27	4,61	4,58	0,66
3	26,09	25,18	3,63	6097,29	6070,75	0,44	5,41	5,50	1,64
4	33,80	29,98	12,73	5466,51	5560,96	1,70	5,78	5,72	1,05
5	10,76	11,59	7,12	10682,75	10281,60	3,90	3,93	3,95	0,51
6	9,65	16,39	41,13	8530,63	8221,00	3,77	4,07	4,03	0,99
7	18,62	21,20	12,17	6942,66	6839,94	1,50	5,02	4,91	2,24
8	26,02	26,01	0,05	6232,59	6138,41	1,53	5,08	5,22	2,68
9	10,71	7,61	40,75	10884,87	11331,68	3,94	3,83	3,82	0,26
10	15,44	12,42	24,35	8681,58	9079,35	4,38	3,73	3,76	0,80
11	10,70	17,22	37,87	7546,33	7506,55	0,53	4,54	4,63	1,94
12	21,46	22,03	2,59	6510,41	6613,29	1,56	5,18	5,07	2,17
13	4,21	3,63	15,88	12527,28	12279,19	2,02	3,56	3,54	0,56
14	9,72	8,44	15,16	9834,90	9835,12	0,00	3,34	3,39	1,47
15	15,30	13,25	15,50	8082,42	8070,59	0,15	4,36	4,29	1,63
16	18,14	18,05	0,48	7028,45	6985,59	0,61	4,83	4,88	1,02

BB mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.29’da, F testi sonucu Çizelge 5.27’ de verilmiştir.

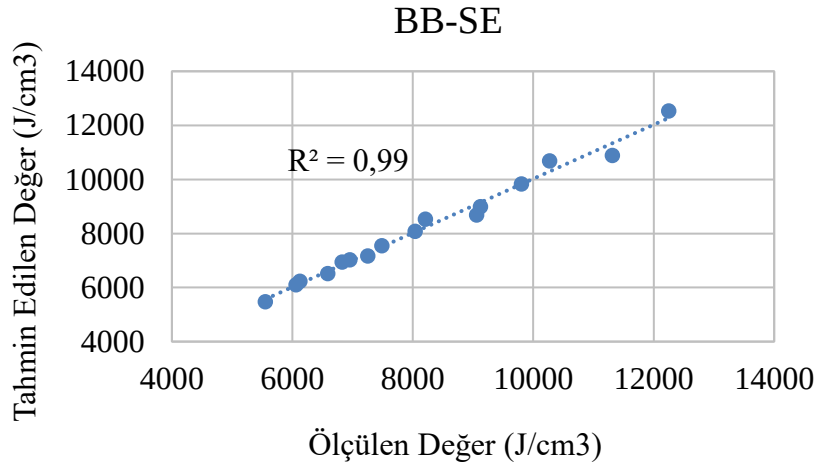


Şekil 5.29 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.27 BB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	643,986	643,986	67,08
Hata	14	134,402	9,600	
Toplam	15	778,388		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,83$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 67,08 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. BB mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.30’ da, F testi sonucu Çizelge 5.28’ de verilmiştir.



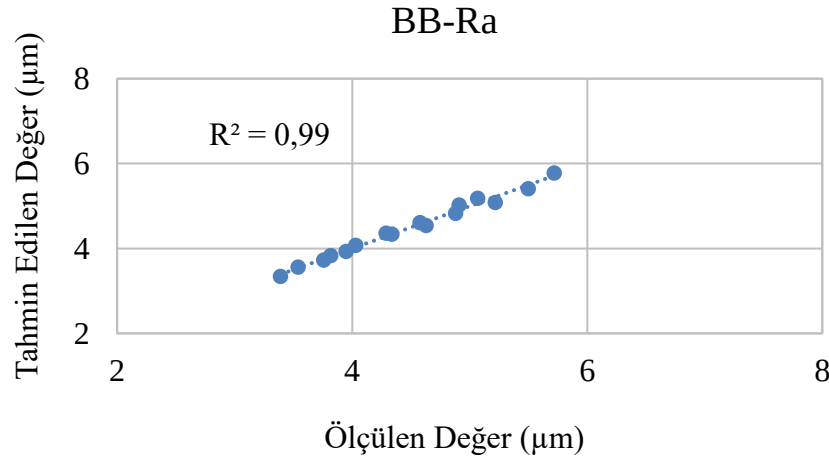
Şekil 5.30 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.28 BB mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	57177829	57177829	1084,87
Hata	14	737867	52705	
Toplam	15	57915697		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,99$ ’ dur. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 1084,87 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

BB mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.31’ de, F testi sonucu Çizelge 5.29’ da verilmiştir.



Şekil 5.31 BB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.29 BB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	39,666	39,666	70,95
Hata	14	7,827	0,559	
Toplam	15	47,493		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,84$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın

olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 70,95 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. MARB mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri Çizelge 5.30 ve 5.31’de verilmiştir.

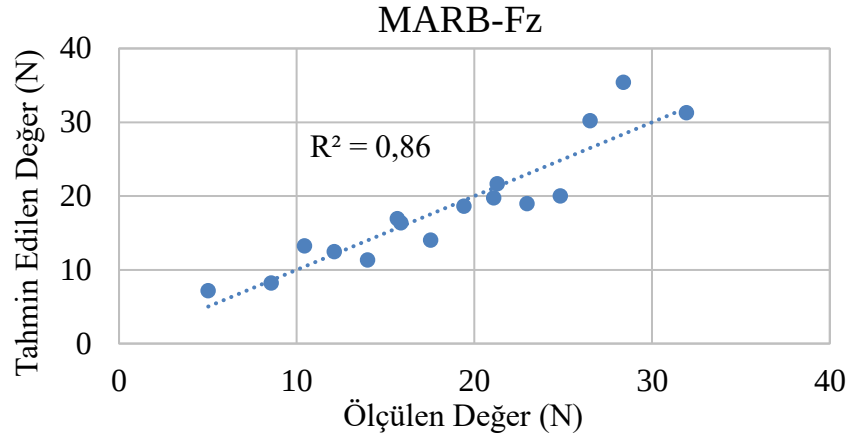
Çizelge 5.30 MARB mermer için tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$+26,89288 + (-0,002710 \cdot \text{Devir}) + (0,007099 \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$14555,51823 + (0,35654 \cdot \text{Devir}) + (-12,17525 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-0,000322 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (0,000043 \cdot \text{Devir}^2) + (0,004835 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (-1,49E-08 \cdot \text{Devir}^2 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (8,29E-08 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (1,18E-09 \cdot \text{Devir}^3) + (-6,95E-071,83E-09 \cdot \text{İlerleme Hızı}^3)$
Ra	$+1,63300 + (0,000338 \cdot \text{Devir}) + (+0,002280 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-1,79704E-07 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı})$

Çizelge 5.31 MARB mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen Fz (N)	Tahmin Fz (N)	Hata (%)	Ölçülen SE (J/cm ³)	Tahmin SE (J/cm ³)	Hata (%)	Ölçülen Ra (µm)	Tahmin Ra (µm)	Hata (%)
1	21,65	21,28	1,73	6234,30	6196,08	0,62	5,54	5,46	1,40
2	20,01	24,83	19,41	4910,50	4993,49	1,66	6,54	6,06	7,84
3	35,41	28,38	24,77	4457,14	4372,67	1,93	7,11	6,67	6,67
4	31,28	31,93	2,04	3772,73	3812,44	1,04	7,39	7,27	1,70
5	16,36	15,86	3,14	7228,88	7249,68	0,29	5,31	5,60	5,19
6	18,62	19,41	4,07	5795,48	5806,59	0,19	5,48	6,02	9,00
7	18,97	22,96	17,38	5013,32	5028,17	0,30	5,66	6,44	12,15
8	30,22	26,51	14,00	4440,02	4393,26	1,06	6,72	6,86	2,10
9	13,25	10,44	26,90	8698,87	8696,08	0,03	6,21	5,74	8,24
10	11,33	13,99	19,02	6996,41	6952,75	0,63	5,73	5,98	4,16
11	14,03	17,54	20,01	5960,80	5957,00	0,06	5,85	6,22	5,95
12	19,76	21,09	6,31	5137,41	5187,66	0,97	6,75	6,46	4,46
13	7,15	5,02	42,39	10571,57	10591,77	0,19	5,81	5,87	1,10
14	8,19	8,57	4,44	8538,90	8488,46	0,59	6,16	5,94	3,77
15	12,44	12,12	2,64	7142,20	7215,64	1,02	6,30	6,00	5,04
16	16,90	15,67	7,85	6295,33	6252,14	0,69	6,10	6,06	0,67

MARB mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.32’ de, F testi sonucu Çizelge 5.32’ de verilmiştir.

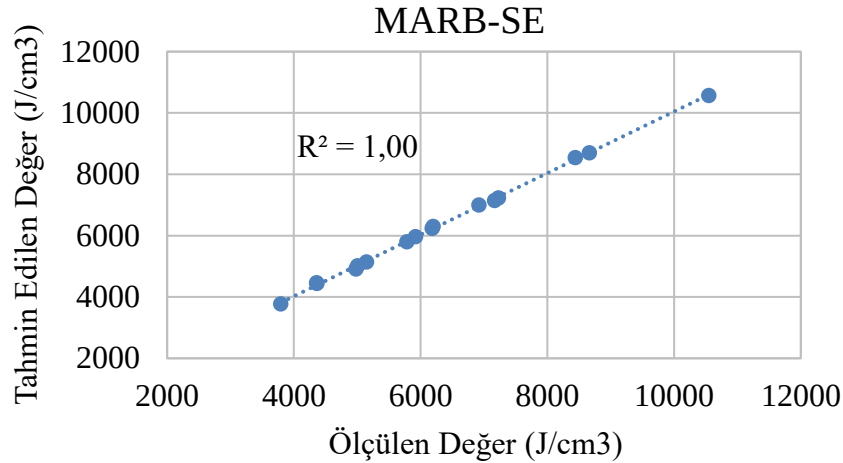


Şekil 5.32 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.32 MARB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	720,213	720,213	84,47
Hata	14	119,365	8,526	
Toplam	15	839,578		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,86$ ’ dır. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 84,47 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. MARB mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.33’ te, F testi sonucu Çizelge 5.33’ te verilmiştir.



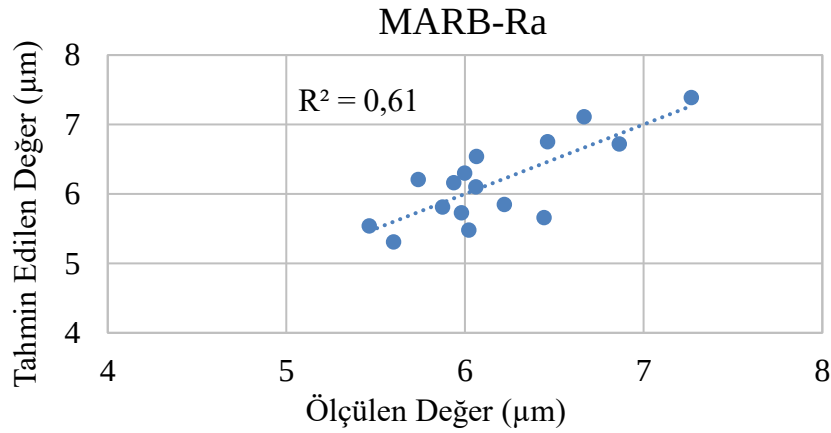
Şekil 5.33 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.33 MARB mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	49183518	49183518	18966,52
Hata	14	36304	2593	
Toplam	15	49219822		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=1,00$ ’ dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere tamamen uyumlu olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 18966,52 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

MARB mermerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.34’ te, F testi sonucu Çizelge 5.33’ de verilmiştir.



Şekil 5.34 MARB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.34 MARB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	2,074	2,074	22,52
Hata	14	1,289	0,092	
Toplam	15	3,363		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,61$ ’ dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere orta düzeyde bir yakınlık gösterdiğini ve modelin tatmin edici bir performans sergilediğini göstermiştir.

Varyans analizinde elde edilen F değeri 22,52 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. MUB mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri çizelge 5.35 ve 5.36’da verilmiştir.

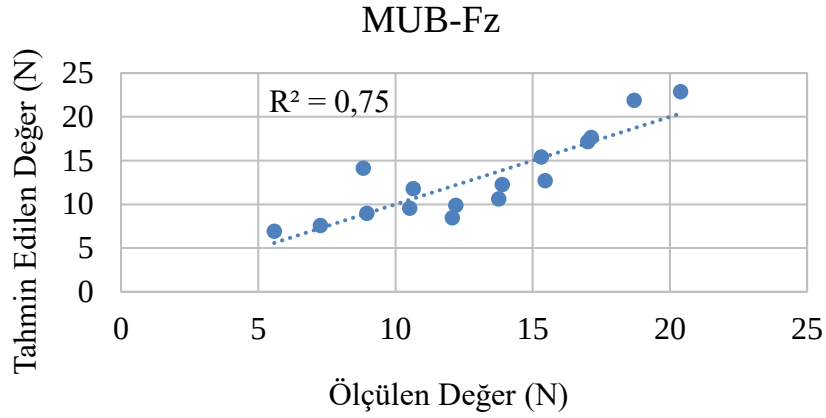
Çizelge 5.35 MUB mermer için tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$+19,98895 + (-0,001623 \cdot \text{Devir}) + (0,003378 \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$31460,36374 + (-7,2358 \cdot \text{Devir}) + (-6,28405 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-0,001253 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (0,001129 \cdot \text{Devir}^2) + (0,003276 \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (6,17\text{E-}08 \cdot \text{Devir}^2 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (7,63\text{E-}09 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı}^2) + (-4,96\text{E-}08 \cdot \text{Devir}^3) + (-3,33\text{E-}07 \cdot \text{İlerleme Hızı}^3)$
Ra	$+2,92109 + (0,000087 \cdot \text{Devir}) + (+0,001263 \cdot \text{İlerleme Hızı})$

Çizelge 5.36 MUB mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen Fz (N)	Tahmin Fz (N)	Hata (%)	Ölçülen SE (J/cm ³)	Tahmin SE (J/cm ³)	Hata (%)	Ölçülen Ra (µm)	Tahmin Ra (µm)	Hata (%)
1	15,39	15,32	0,47	6942,68	6934,58	0,12	5,00	5,34	6,32
2	17,16	17,01	0,90	5509,43	5414,75	1,75	5,76	5,97	3,50
3	21,87	18,70	16,98	4511,51	4555,54	0,97	7,03	6,60	6,51
4	22,88	20,38	12,24	4048,11	4106,88	1,43	7,06	7,23	2,38
5	8,44	12,07	30,09	8097,11	8243,74	1,78	5,73	5,51	3,96
6	10,60	13,76	22,97	6324,34	6361,09	0,58	5,95	6,14	3,14
7	12,71	15,45	17,73	5151,10	5146,70	0,09	6,21	6,77	8,33
8	17,65	17,14	2,98	4529,47	4350,49	4,11	7,64	7,41	3,16
9	14,12	8,83	59,98	10052,47	9795,96	2,62	6,26	5,69	10,10
10	9,56	10,51	9,08	7623,94	7797,19	2,22	6,73	6,32	6,54
11	9,89	12,20	18,96	6560,28	6474,31	1,33	7,46	6,95	7,36
12	12,24	13,89	11,90	5408,02	5577,25	3,03	7,54	7,58	0,53
13	6,93	5,58	24,19	9091,79	9209,78	1,28	5,66	5,86	3,41
14	7,57	7,27	4,14	7456,91	7341,59	1,57	6,14	6,49	5,41
15	8,96	8,96	0,02	6110,56	6156,92	0,75	6,64	7,12	6,78
16	11,78	10,65	10,64	5454,72	5405,70	0,91	7,91	7,75	2,01

MUB mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.35’ te, F testi sonucu Çizelge 5.37’ de verilmiştir.

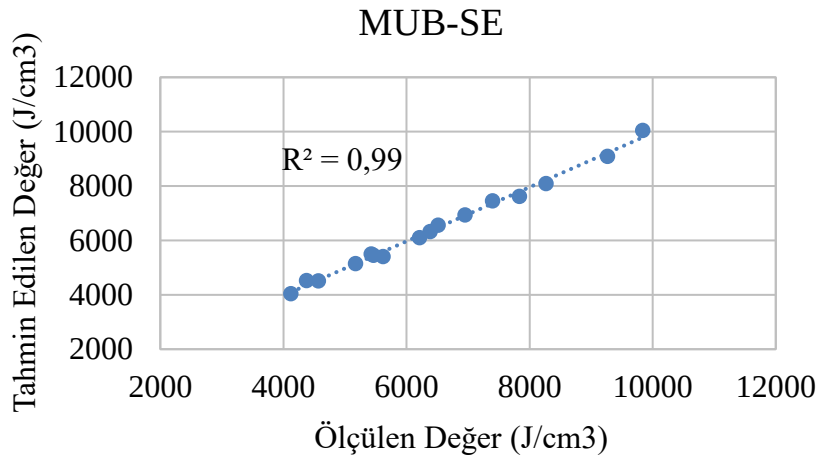


Şekil 5.35 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.37 MUB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	201,846	201,846	42,88
Hata	14	65,905	4,707	
Toplam	15	267,751		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,75$ ’ tir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 42,88 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. MUB mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.36’ da, F testi sonucu Çizelge 5.38’ de verilmiştir.



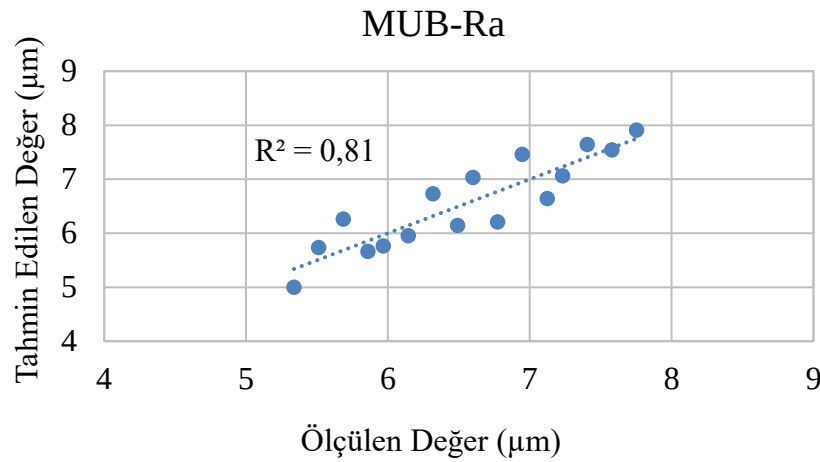
Şekil 5.36 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.38 MUB mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	DF	SS	MS	F
Regresyon	1	43212577	43212577	2550,75
Hata	14	237176	16941	
Toplam	15	43449753		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,99$ ' dur. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 2550,75 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

MUB mermerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.37' de, F testi sonucu Çizelge 5.39' da verilmiştir.



Şekil 5.37 MUB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.39 MUB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	6,947	6,947	60,25
Hata	14	1,614	0,116	
Toplam	15	8,561		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,81$ ' dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın

olduğunu ve tahmin modelinin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 60,25 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

UB mermer için tahmin fonksiyonları ve tahmin değerleri çizelge 5.40 ve 5.41’de verilmiştir.

Çizelge 5.40 UB mermer için tahmin fonksiyonları.

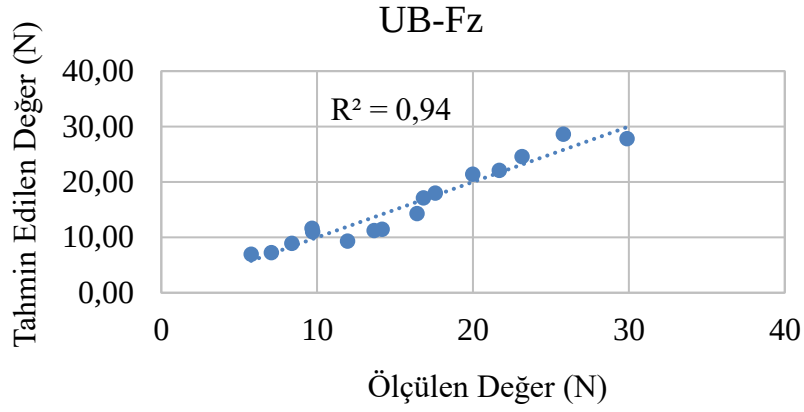
Parametre	Tahmin Fonksiyonları					
Fz	+8,71235	+	(-0,000572*Devir)	+	(0,013790*İlerleme Hızı)	+
	(-9,31912E-07Devir*İlerleme Hızı)					
SE	10442,63077	+	(0,590216*Devir)	+	(-5,93367*İlerleme Hızı)	+
	(-0,000179*Devir*İlerleme Hızı)					
	(0,001134*İlerleme Hızı ²)					
Ra	13,06647	+	(-0,001541*Devir)	+	(-0,00015*İlerleme Hızı)	+
	(-1,06E-08*Devir*İlerleme Hızı)					
	(3,68E-07*İlerleme Hızı ²)					

Çizelge 5.41 UB mermer için tahmin değerleri.

No	Ölçülen	Tahmin	Hata	Ölçülen	Tahmin	Hata	Ölçülen	Tahmin	Hata
	Fz	Fz	(%)	SE	SE	(%)	Ra	Ra	(%)
	(N)	(N)		(J/cm ³)	(J/cm ³)		(µm)	(µm)	
1	17,99	17,58	2,37	6770,64	6775,63	0,07	7,17	6,95	3,13
2	22,05	21,68	1,74	5397,32	5255,96	2,69	7,56	7,49	0,97
3	28,63	25,78	11,05	4400,73	4303,16	2,27	8,05	8,21	1,95
4	27,82	29,88	6,90	3938,83	3917,22	0,55	8,97	9,11	1,58
5	11,23	13,64	17,65	7845,52	8004,01	1,98	5,65	5,87	3,83
6	17,11	16,81	1,79	5920,46	6305,39	6,10	6,27	6,40	2,06
7	21,36	19,97	6,96	5259,71	5173,63	1,66	7,33	7,11	3,15
8	24,58	23,14	6,20	4299,49	4608,74	6,71	8,17	8,01	2,00
9	10,97	9,70	13,08	9796,36	9399,48	4,22	5,11	5,38	5,04
10	9,30	11,93	22,09	7392,34	7521,91	1,72	5,86	5,90	0,67
11	11,46	14,17	19,10	6502,37	6211,19	4,69	6,96	6,60	5,51
12	14,25	16,40	13,15	5675,46	5467,35	3,81	7,39	7,48	1,19
13	6,95	5,76	20,73	10879,67	10962,05	0,75	5,85	5,47	6,92
14	7,24	7,06	2,49	8825,65	8905,51	0,90	5,76	5,98	3,50
15	8,92	8,37	6,60	7394,01	7415,84	0,29	6,54	6,67	1,87
16	11,64	9,67	20,34	6421,57	6493,04	1,10	7,51	7,54	0,40

UB mermerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği

Şekil 5.38’ de, F testi sonucu Çizelge 5.42’ de verilmiştir.

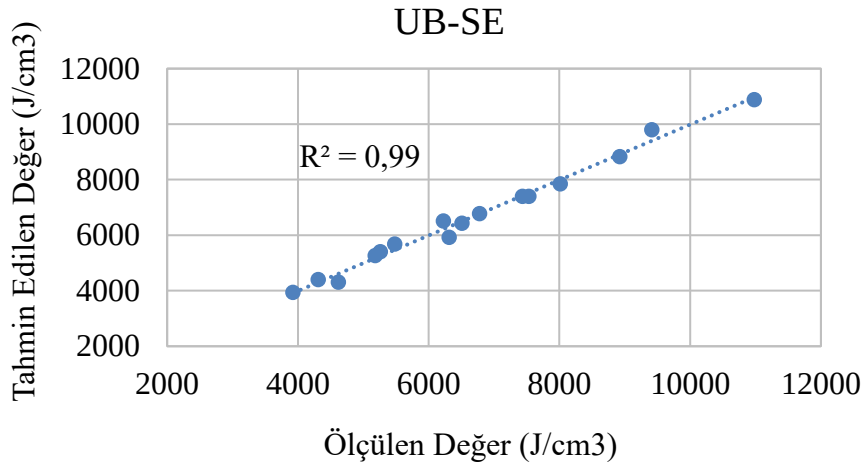


Şekil 5.38 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.42 UB mermer Fz için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	691,939	691,939	212,08
Hata	14	45,676	3,263	
Toplam	15	737,615		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,94$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 212,08 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. Uşak Beyaz mermerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.39’ da, F testi sonucu Çizelge 5.43’ te verilmiştir.

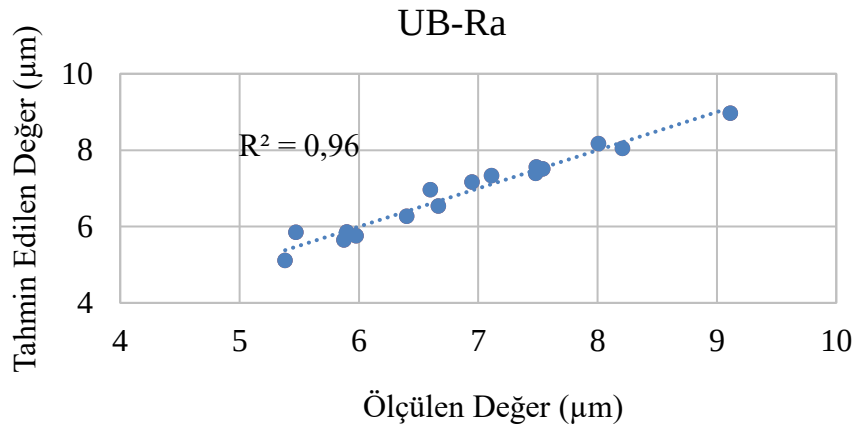


Şekil 5.39 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.43 UB mermer SE için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	56966194	56966194	1280,97
Hata	14	622595	44471	
Toplam	15	57588790		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,99$ ’ dur. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 1280,97 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir. UB mermerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.40’ ta, F testi sonucu Çizelge 5.44’ te verilmiştir.



Şekil 5.40 UB mermerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon grafiği.

Çizelge 5.44 UB mermer Ra için yapılan F testi sonucu.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	15,991	15,991	96,95
Hata	14	0,635	0,045	
Toplam	15	16,625		

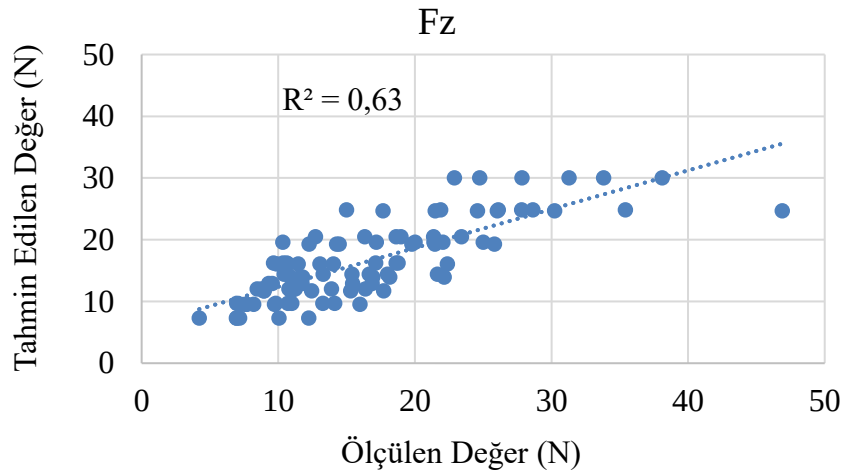
Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,96$ ’ dır. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere büyük ölçüde yakın olduğunu ve tahmin modelinin çok iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 96,95 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;15} = 4,54$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu

olduğunu göstermiştir. Metamorfik kökenli mermerlerin tahmin modellerine ait fonksiyonları Çizelge 5.45’ te verilmiştir.

Çizelge 5.45 Metamorfik kökenli mermerler için geliştirilen tahmin fonksiyonları.

Parametre	Tahmin Fonksiyonları
Fz	$-3,15177 + (0,000319 \cdot \text{Devir}) + (0,016435 \cdot \text{İlerleme Hızı}) + (-1,0014E-06 \cdot \text{Devir} \cdot \text{İlerleme Hızı})$
SE	$+6979,72075 + (0,450015 \cdot \text{Devir}) + (-1,95388 \cdot \text{İlerleme Hızı})$
Ra	$+4,63046 + (-0,000102 \cdot \text{Devir}) + (-0,001071 \cdot \text{İlerleme Hızı})$

Beyaz mermerlerin Fz için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.41’ de, F testi sonucu Çizelge 5.46’ de verilmiştir.



Şekil 5.41 Metamorfik kökenli mermerlerin ölçülen ve tahmin edilen Fz değerlerinin regresyon analiz grafiği.

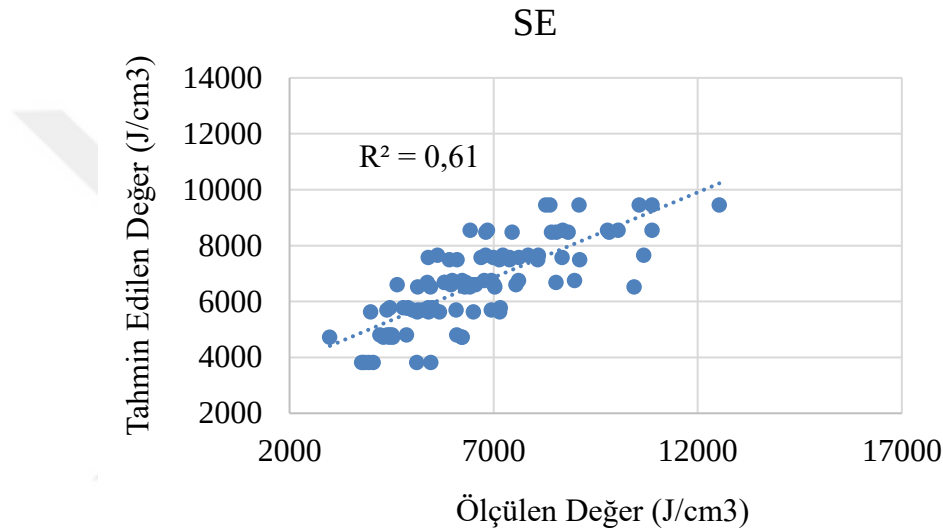
Çizelge 5.46 Metamorfik kökenli Fz değerleri için F testi analizi

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	2259,84	2259,84	158,71
Hata	94	1338,44	14,24	
Toplam	95	3598,29		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,63$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere orta düzeyde bir

yakınlık gösterdiğini ve modelin tatmin edici bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 158,71 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;95} = 3,94$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

Metamorfik kökenli mermerlerin SE için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.42’ de, F testi sonucu Çizelge 5.47’ de verilmiştir.



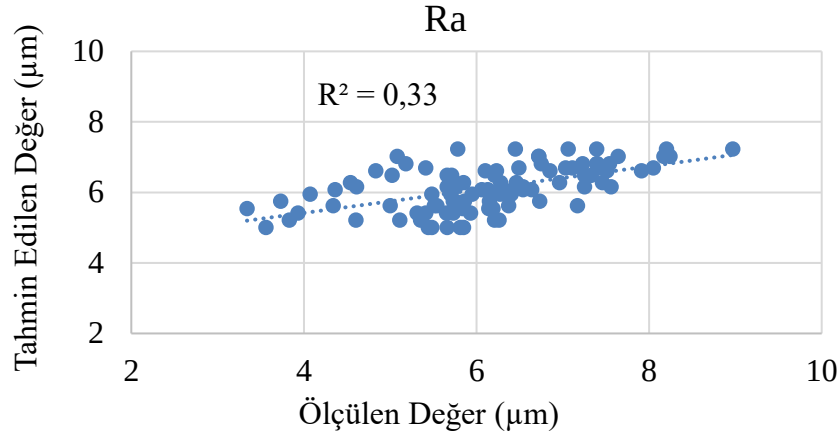
Şekil 5.42 Metamorfik kökenli mermerin ölçülen ve tahmin edilen SE değerlerinin regresyon analiz grafiği.

Çizelge 5.47 Metamorfik kökenli mermerlerin SE değerlerin için F testi analizi.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	129045219	129045219	146,69
Hata	94	82690831	879690	
Toplam	95	211736051		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,61$ ’ dir. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere orta düzeyde bir yakınlık gösterdiğini ve modelin tatmin edici bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 146,69 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;95} = 3,94$ değerinden büyüktür. Bu sonuç, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında uyumlu olduğunu göstermiştir.

Metamorfik kökenli mermerlerin Ra için ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki regresyon grafiği Şekil 5.43’ te, F testi sonucu Çizelge 5.48’ de verilmiştir.



Şekil 5.43 Metamorfik kökenli mermerlerin ölçülen ve tahmin edilen Ra değerlerinin regresyon analiz grafiği.

Çizelge 5.48 Metamorfik kökenli mermerlerin Ra değerleri için F testi analizi.

	SD	KT	OKH	F
Regresyon	1	13,055	13,055	46,48
Hata	94	26,400	0,281	
Toplam	95	39,454		

Ölçülen ve tahmin değerler arasında yapılan regresyon analizi sonucunda determinasyon katsayısı $R^2=0,33$ ’ tür. Tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlere düşük düzeyde bir yakınlık gösterdiğini ve modelin zayıf bir performans sergilediğini göstermiştir. Varyans analizinde elde edilen F değeri 46,48 olup, dağılım tablosundaki $F_{0,05;1;95} = 3,94$ değerinden büyüktür. Model istatistiksel olarak anlamlıdır, yani bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerinde bir etkisi vardır. Bu sonuç, modelin genel olarak anlamlı olduğunu ancak bağımlı değişkeni açıklamada yetersiz kaldığını göstermiştir.

5.3 Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Mermer frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü; ürünün estetik, fonksiyonel ve ekonomik değerini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle Ra pürüzlülük değerinin optimizasyonda en düşük değerde olması istenmekte olup önem derecesi 5’ tir. Fz kuvveti mermer yüzeyinde aksel yönde kuvvet uygulayarak doğrudan etkiye neden

olduğundan dolayı en düşük değerde ve önem seviyesi 4 olarak seçilmiştir. Özgül enerji birim hacimde malzeme kaldırmak için gereken enerji miktarını, malzeme kaldırma oranı ise çıkarılan malzeme miktarını ifade etmektedir. Bu nedenle verimliliği arttırmak amacıyla en düşük enerji tüketiminde en yüksek verimle kesme yapılabilmesi için önem seviyeleri 4 olarak seçilmiştir. Buradaki amaç hem ürün kalitesini hem de üretim süreçlerinin etkinliğini arttırmayı sağlamaktır. Çizelge 5.49'da parametre kısıtları verilmiştir.

Çizelge 5.49 Parametre kısıtları.

Parametreler	Hedef	Önem Derecesi
Fz	En düşük	4
MRR	En yüksek	4
SE	En düşük	4
Ra	En düşük	5

State Ease 360 programı kullanılarak altı farklı mermer ve bu mermerlerin bir arada genel olarak değerlendirildiği en uygun işleme parametreleri ve tahmin değerleri Çizelge 5.50' de verilmiştir. RSM optimizasyonu sonucunda programın vermiş olduğu uygunluk oranı, özellikle birden fazla yanıtın optimize edilmesi gerektiği durumlarda (Fz, MRR, Ra ve SE) çözümün genel uygunluğunu değerlendirmek için kullanılır. Bu değer, 0 ile 1 arasında bir aralıkta yer alır ve optimizasyon sürecinin başarısını gösterir. Uygunluk oranının 1'e yakın olması optimizasyon sonucunun hedeflere tam olarak uygun olduğunu, 0'a yakın olması ise çözümün hedeflere uygun olmadığını veya optimizasyonun başarısız olduğunu ifade etmektedir.

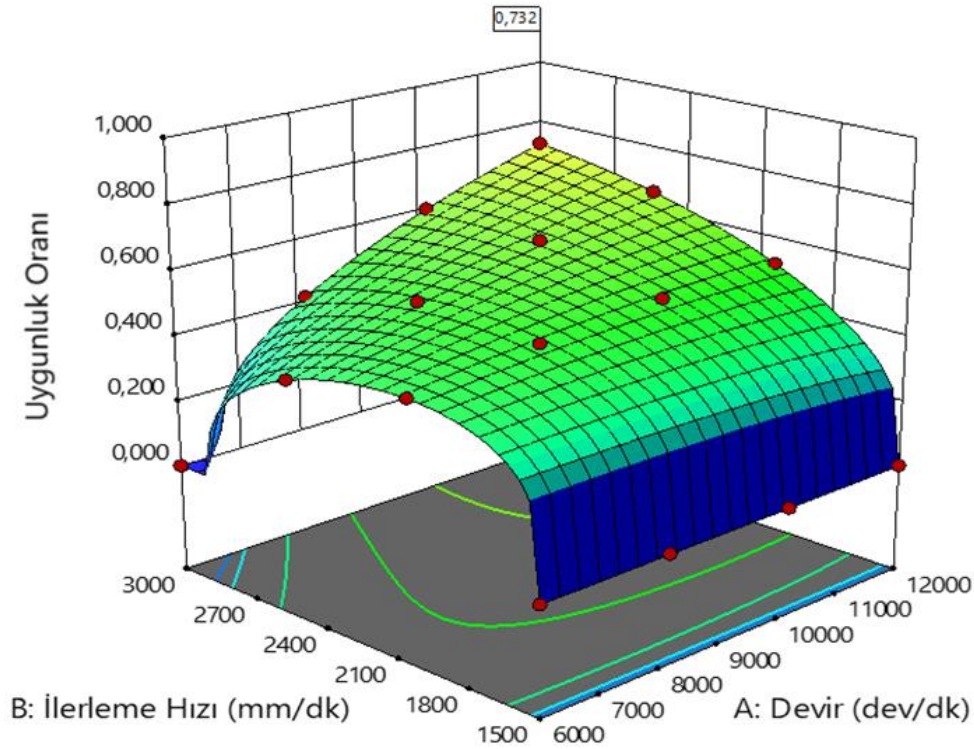
Çizelge 5.50 Mermerlerin en uygun işlem koşulları.

Numune Kodu	Devir (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Fz (N)	MRR (cm ³ /dk)	Ra (μm)	SE (J/cm ³)	Uygunluk Oranı
AB	12000	3000	10,18	7,20	6,48	4577,60	0,73
AG	6000	2224	14,41	5,34	5,95	5130,33	0,59
BB	12000	2900	15,68	6,97	4,61	7042,75	0,66
MARB	12000	3000	14,49	7,20	6,06	5869,50	0,75
MUB	6000	2549	19,48	6,12	6,68	4790,55	0,62
UB	12000	3000	9,67	7,20	7,16	6126,06	0,71
ROP	12000	3000	13,94	7,20	6,61	6518,27	0,65

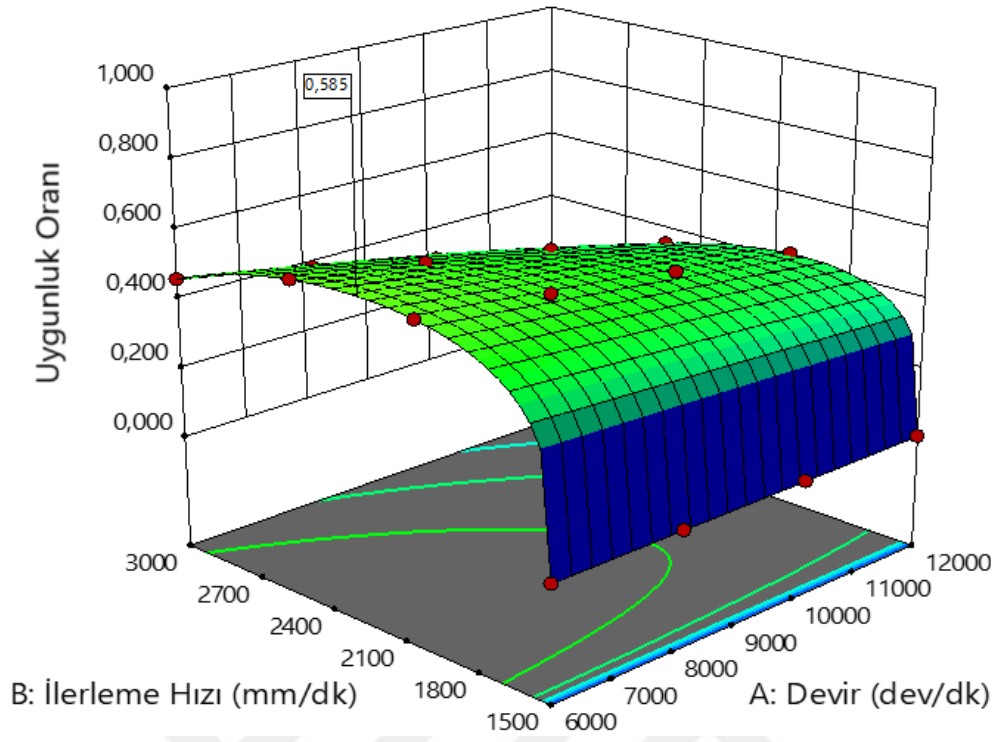
Optimizasyon sonucunda elde edilen uygunluk oranları, hedeflere oldukça yakın sonuçlar göstermiş ve çözümler genel olarak başarılı bulunmuştur. Tüm mermer türlerine ait uygunluk oranı sonuçları, Şekil 5.44-49' da grafikler halinde sunulmuştur. Bu grafikler, hangi parametre kombinasyonlarının en yüksek uygunluk oranı skorlarını sağladığını göstermek ve optimizasyon süreçlerinde karar vermeyi kolaylaştırmak amacıyla hazırlanmıştır.

Grafiklerde renk kodlaması kullanılmıştır; düşük uygunluk oranı değerleri soğuk mavi tonlarıyla, yüksek uygunluk oranı değerleri ise sıcak sarı tonlarıyla temsil edilmektedir. Grafik üzerindeki kırmızı noktalar tasarım noktalarını ifade etmektedir. Ayrıca en yüksek uygunluk oranı düzeyi grafik üzerinde gösterilmektedir. Bu şekiller, farklı parametre kombinasyonlarının etkilerini hızlı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

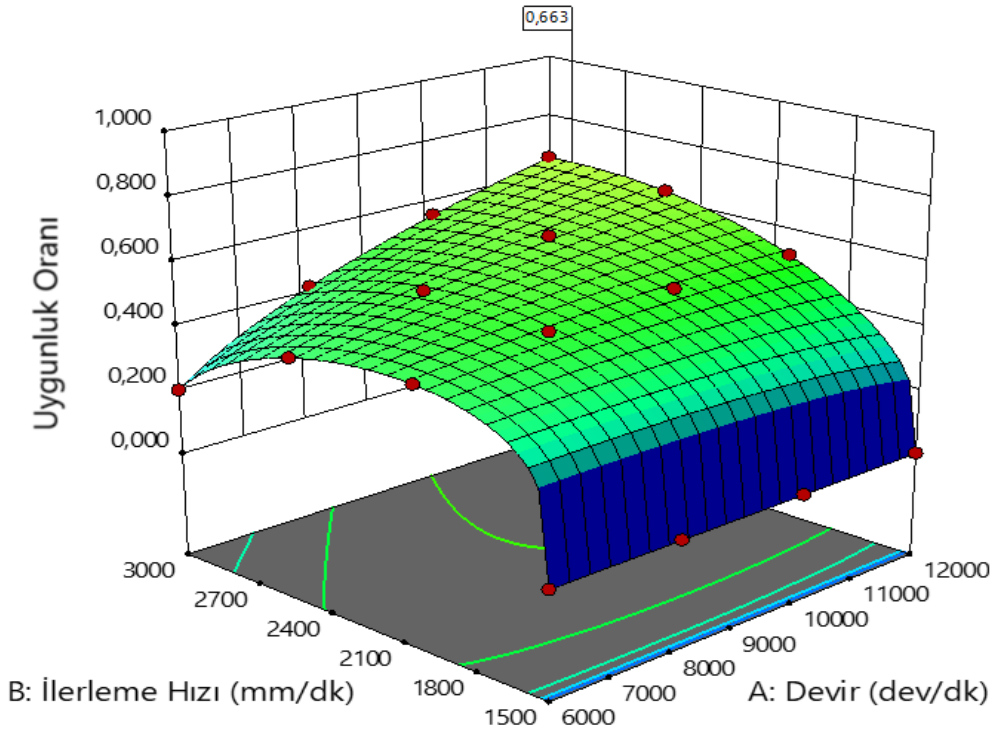
Ayrıca, program otomatik olarak en uygun noktayı tespit etmekte ve bu noktayı bir bayrakla işaretlemektedir. Bu özellik, süreç optimizasyonuna doğrudan katkı sağlayarak, en ideal parametre kombinasyonunun kolayca belirlenmesine yardımcı olmaktadır.



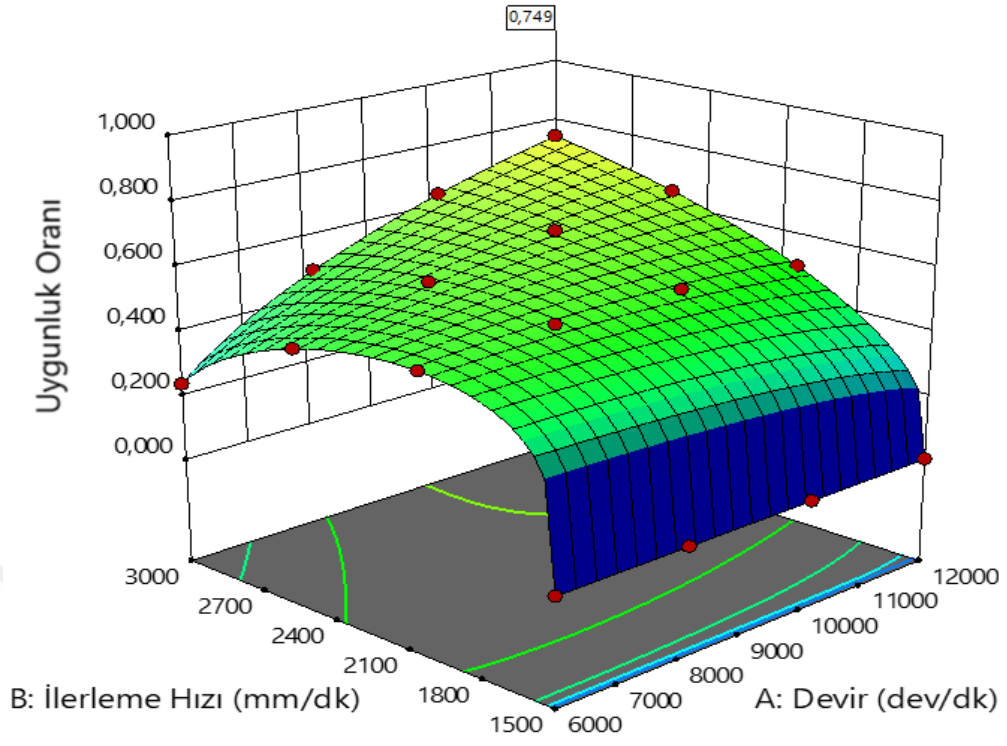
Şekil 5.44 AB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.



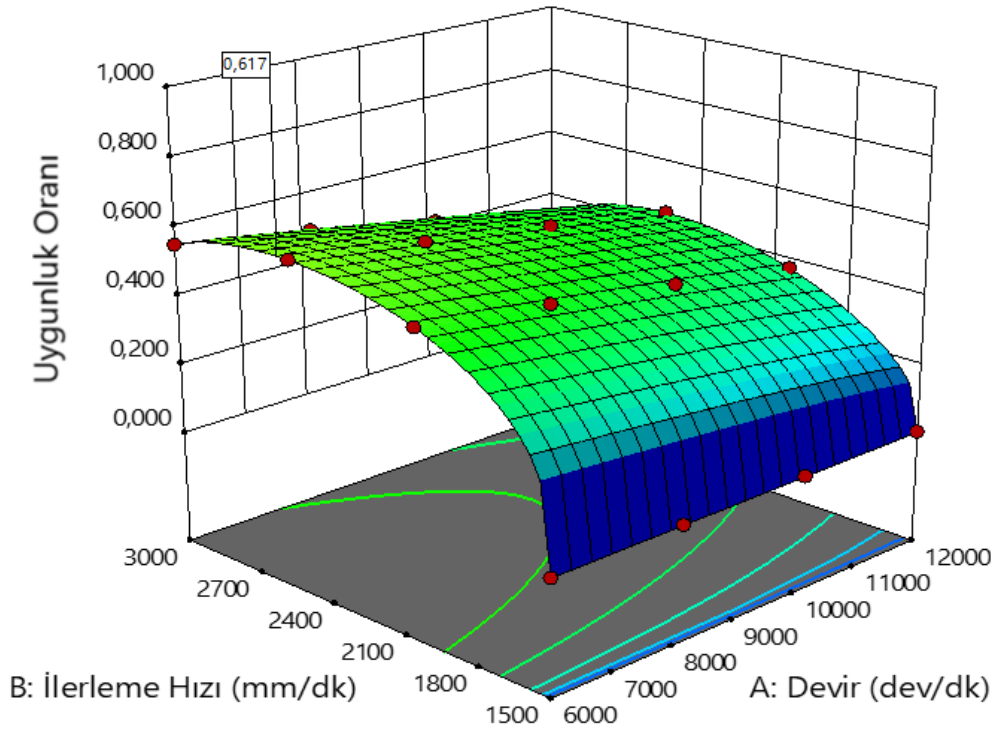
Şekil 5.45 AG için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.



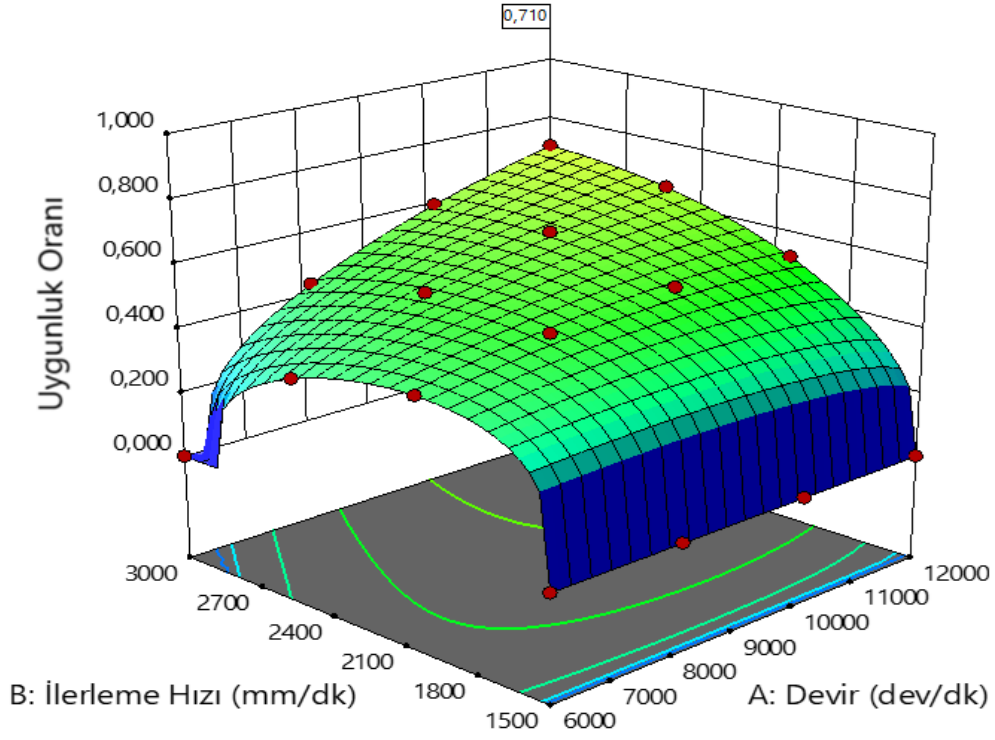
Şekil 5.46 BB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.



Şekil 5.47 MARB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.



Şekil 5.48 MUB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.

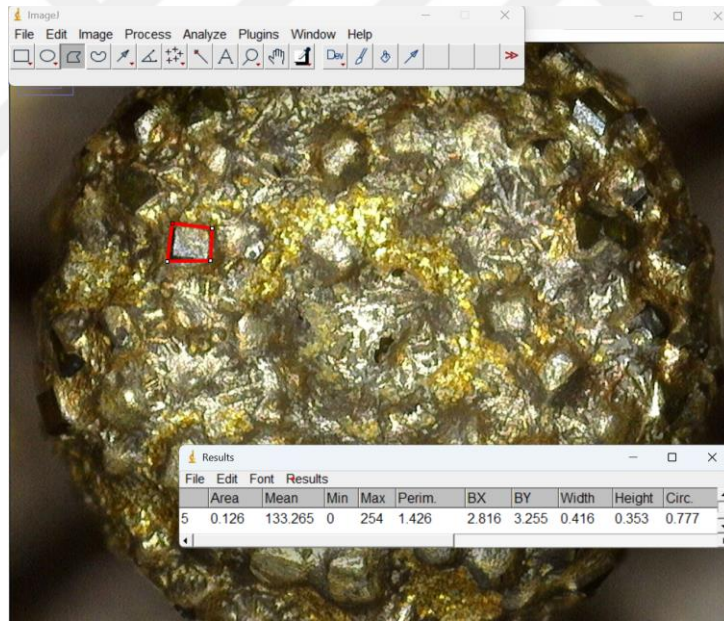


Şekil 5.49 UB için uygunluk oranlarının 3D yüzey grafiği.

RSM analiziyle oluşturulan uygunluk oranı 3D yüzey grafikleri, sayısal optimizasyon sonuçlarının görsel doğrulamasını sağlamıştır. Grafikler, her bir mermer türü için en uygun işlem parametrelerini net bir şekilde ortaya koymuş ve sayısal analiz ile elde edilen sonuçlarla uyum göstermiş ve süreç optimizasyonunun güvenilirliğini artırmıştır.

6. FREZE TAKIMLARIN AŞINMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

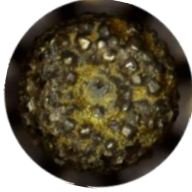
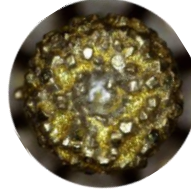
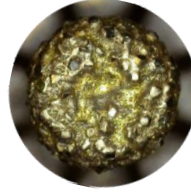
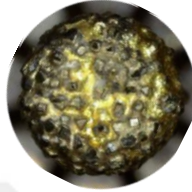
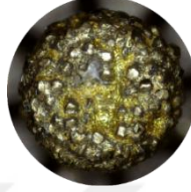
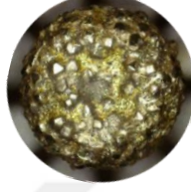
Günümüzde yapı ve dekorasyon sektöründe yaygın olarak kullanılan AB, AG, BB, MARB, MUB ve UB mermerlerin vakumla sert lehimlenmiş elmas freze takımların aşınma davranışları optimum frezeleme parametreleri koşullarında incelenerek, takım-malzeme etkileşiminin dinamiklerini ve aşınma mekanizmalarının tespit etmek amacıyla aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, işleme verimliliğinin artırılması ve nihai ürün kalitesinin iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahip bulgular sunulmuştur. Elmas freze takımların aşınma durumunu detaylı bir şekilde incelemek amacıyla 1, 3, 5 ve 7 m²'lik adımlarla aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde her mermer türü için ayrı ayrı kullanılan takımların kesim yüzeyindeki elmas taneleri sayılmıştır. Aşınma davranışının kademeli ilerleyişi mikroskopik düzeyde incelenmiş olup, her bir adımda takım yüzeyinin detaylı görüntüleri SEM ve Dino-Lite Dijital Mikroskop ile görüntülenmiştir.



Şekil 6.1 Elmas tanelerin yüzey alanı ölçümleri.

Her adımda elmas tanelerin aşınma türleri incelenmiştir. Ayrıca aktif olarak kesim yapan elmas tanelerin Şekil 6.1' deki gibi ImageJ programı ile aşınan yüzey alanları (mm²) ve takımın aktif kesim yapan yüzey alanı (%) her adımda ölçülmüştür. Firma tarafından üretilmiş takımlarda, elmas tanelerin üzerine kaplama malzemesi sıvanmış ve elmas yüzeyleri kaplanmıştır. Elmas tanelerin yüzeylerini açığa çıkarmak için uygulanman elmas açma işlemi mermerlere göre farklılık göstermiş ve Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

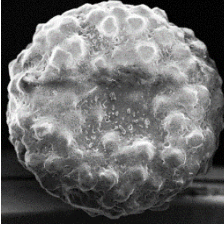
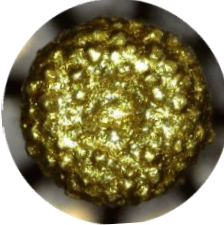
Çizelge 6.1 Elmas açma süreci.

Mermerler Aşama	AB 1 m ²	AG 0,5 m ²	BB 0,5 m ²
Mikroskop görüntüleri			
Mermerler Aşama	MARB 0,25 m ²	MUB 0,25 m ²	UB 0,5 m ²
Mikroskop görüntüleri			

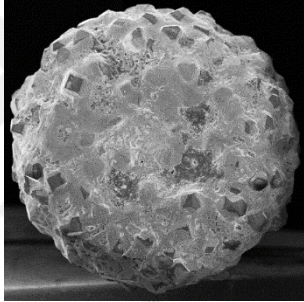
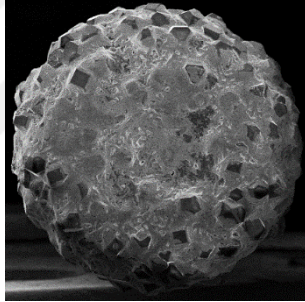
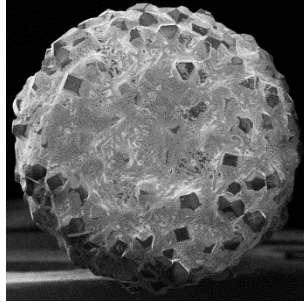
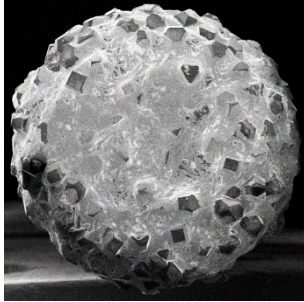
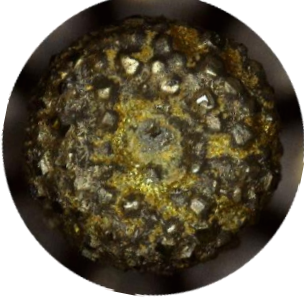
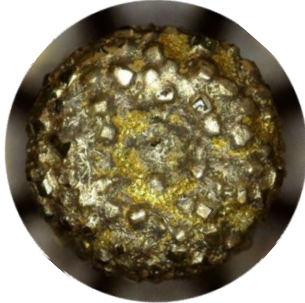
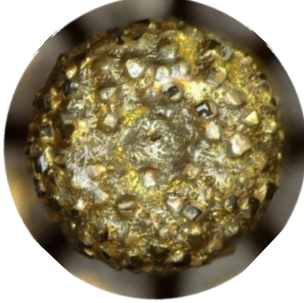
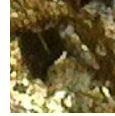
6.1 Afyon Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

AB Mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.2’ de aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.3’ de gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 30 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %21’dir. Aşınma sonucunda 21 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %11’e düşmüştür; burada kesim yüzey alanında %48 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 ve 4 m²’lik alanlarda kenar-köşe aşınması ve kırılma aşınma türleri gözlemlenirken, 4 m²’den sonra elmas tanelerinde parçalanma başlamıştır.

Çizelge 6.2 AB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.

	
Aşınma öncesi takımın SEM görüntüsü	Aşınma öncesi takımın mikroskop görüntüsü
- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 30 - Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 4,018 mm² - Aktif kesim yapan yüzey = %21	

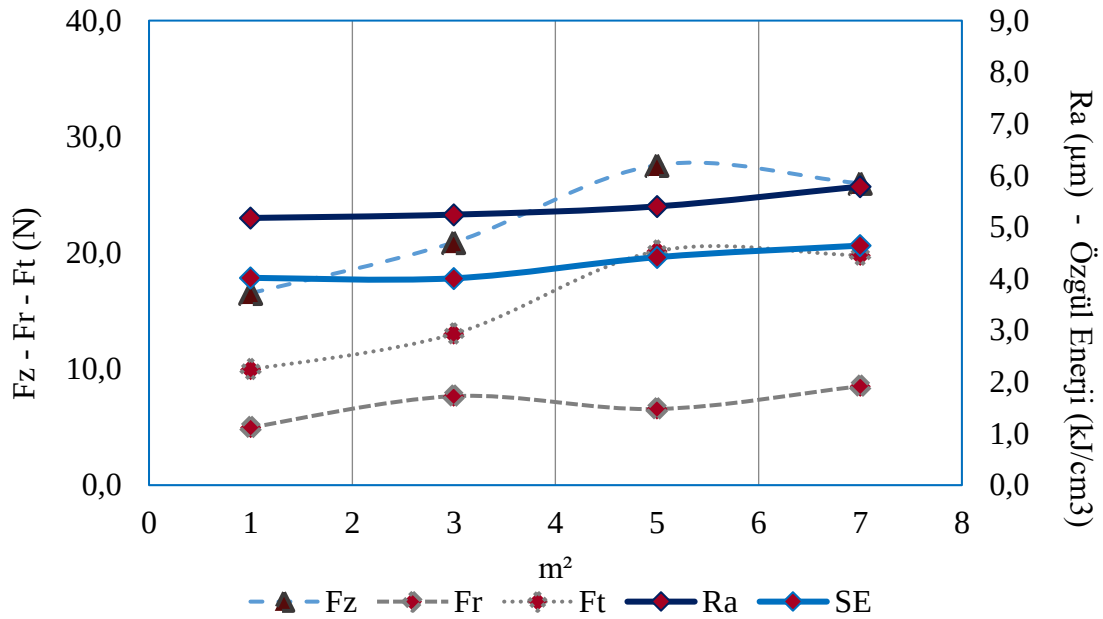
Çizelge 6.3 AB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (AB)	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²					
SEM görüntüleri									
Mikroskop görüntüleri									
Aşınan elmas türleri ve görselleri	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Parçalanma	 Kırılma	 Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	7	7	15	21					
Elmasların aşınan yüzey alanı	0,187 mm ²	0,319 mm ²	0,764 mm ²	1,887 mm ²					
Aktif Kesim yapan yüzey	% 20	% 19	% 17	% 11					

AB mermerin optimum parametreler (V_c : 12000 dev/dk, f : 3000 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.4’ te, grafiksel gösterimi Şekil 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.4 AB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	16,53	20,91	27,56	25,99
Fr (N)	4,98	7,67	6,56	8,52
Ft (N)	9,96	13,03	20,15	19,79
SE (kJ/cm³)	4,02	4,01	4,42	4,64
Ra (µm)	5,18	5,24	5,40	5,79
Gürültü (dB)	82,3	86,4	86,9	85,2



Şekil 6.2 AB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

Elde edilen veriler incelendiğinde, 1 m²'lik işleme alanından sonra elmas taneciklerinde kenar-köşe aşınması ve kırılma başlamıştır. 4 m²'lik işleme alanından sonra, elmas taneciklerinde kırılma ve parçalanma etkileri gözlemlenmeye başlanmıştır. Ra ve SE değerleri eğrinin yatay eksene yakın yavaş bir artış eğilimi göstermiştir. Fz ve Ft değerleri artan bir eğilim gösterirken, Fr değerinde ise elmasların aşınma durumlarına bağlı olarak dalgalı bir eğri profili ortaya çıkmıştır. Elmas taneciklerinin 7 m²'lik geniş bir işleme alanı

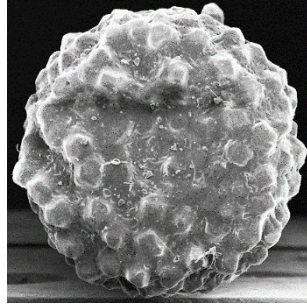
boyunca tamamen kopma olmamıştır. AB mermerin frezelemesinde takımın uzun ömürlülüğünü ve dayanıklılığını göstermektedir.

6.2 Afyon Gri Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

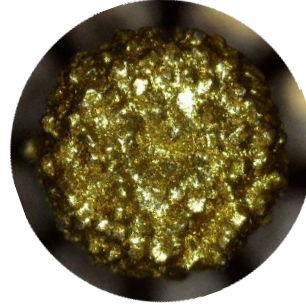
AG Mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.5' te aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.6' da gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 29 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %20'dir.

Aşınma sonucunda 19 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %14'e düşmüştür, burada kesim yüzey alanında % 30 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 ve 3 m²' lik alanlarda kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma şeklinde aşınma türleri gözlemlenirken, 1 m²' den sonra elmas tanelerinde kırılma ve parçalanmalarda artış başlamıştır.

Çizelge 6.5 AG mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.



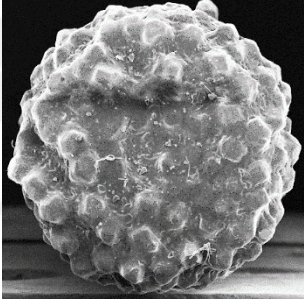
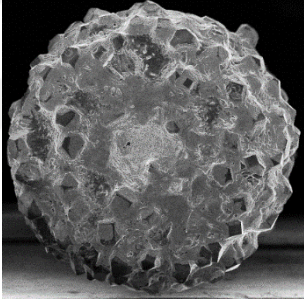
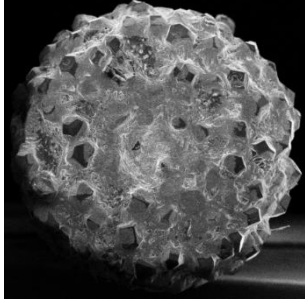
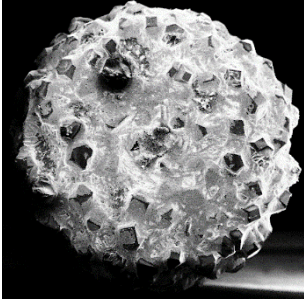
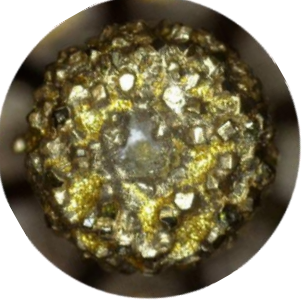
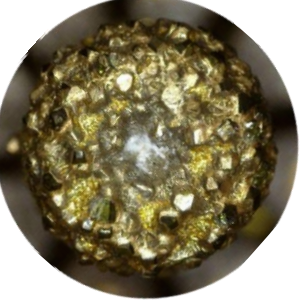
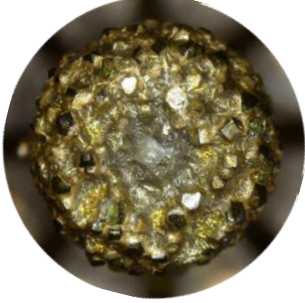
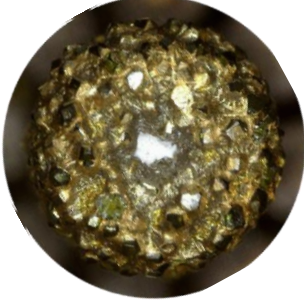
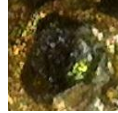
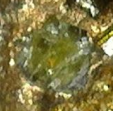
**Aşınma öncesi takımın
SEM görüntüsü**



**Aşınma öncesi takımın
mikroskop görüntüsü**

- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 29
- Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 4,192 mm²
- Aktif kesim yapan yüzey = % 20

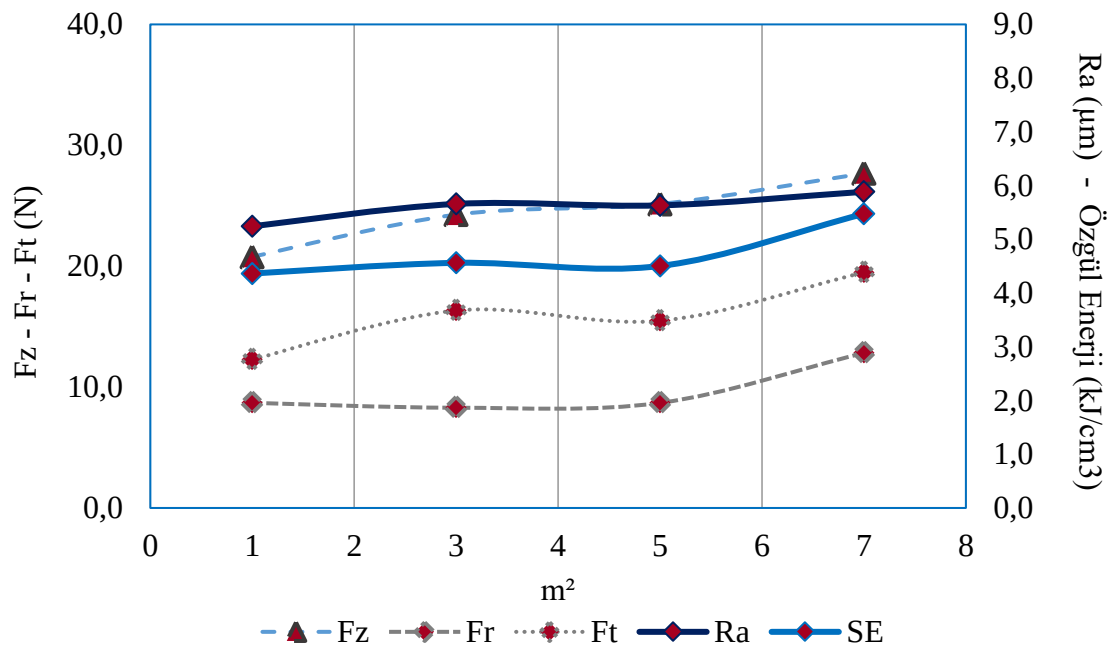
Çizelge 6.6 AG mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (AG)	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
SEM görüntüleri				
Mikroskop görüntüleri				
Aşınan elmas türleri ve görselleri	 Kenar köşe aşınması  Kırılma	 Kırılma  Parçalanma	 Kenar köşe aşınması  Kırılma  Parçalanma	 Kırılma  Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	10	10	16	19
Elmasların aşınan yüzey alanı	0,319	0,624	0,847	1,300
Aktif Kesim yapan yüzey	% 18	% 17	% 16	% 14

AG mermerin optimum parametreler (V_c : 6000 dev/dk, f : 2224 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.7’ de, grafiksel gösterimi Şekil 6.3’ te verilmiştir.

Çizelge 6.7 AG mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	20,78	24,26	25,15	27,68
Fr (N)	8,70	8,29	8,69	12,82
Ft (N)	12,28	16,33	15,49	19,48
SE (kJ/cm ³)	4,36	4,56	4,50	5,47
Ra (µm)	5,24	5,66	5,63	5,89
Gürültü (dB)	78,8	78,9	79,1	77



Şekil 6.3 AG mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

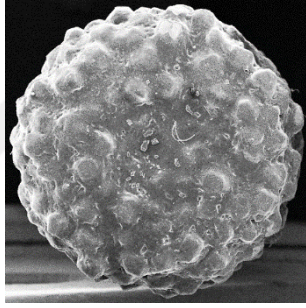
Elde edilen veriler incelendiğinde, 1 m²'lik işleme alanından sonra elmas taneciklerinde parçalanmalar başlamıştır. Ra değeri yavaş bir artış eğilimi göstermiştir. SE, Fr değerleri stabil bir seyir izlerken, 5 m² işleme sonrasında artan bir eğilim göstermiştir. Fr işlem boyunca dalgalı bir eğri sergilemiştir. Genel olarak 5 m²'lik işleme sürecinde takım yüzeydeki elmasların aşınma durumlarına bağlı olarak daha stabil bir aşınma etkisi gözlemlenirken, sonrasında bu etki artış göstermiştir.

6.3 Bursa Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

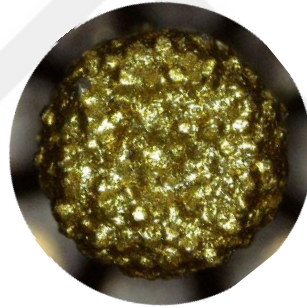
BB Mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.8’ de aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.9’ da gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 32 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %19’ dur.

Aşınma sonucunda 17 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %12’ ye düşmüştür, burada kesim yüzey alanında %37 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 ve 3 m²’lik alanlarda kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma şeklinde aşınma türleri gözlemlenirken, 3 m²’den sonra elmas tanelerinde kırılma ve parçalanmalarda artış başlamıştır.

Çizelge 6.8 BB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.



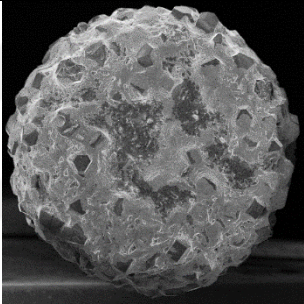
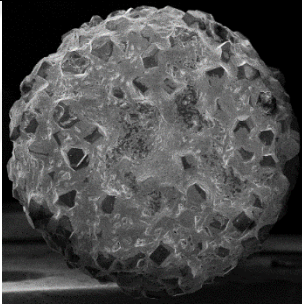
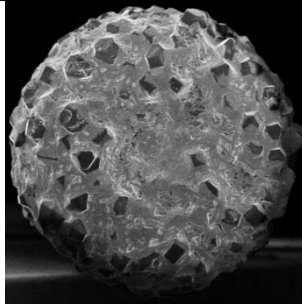
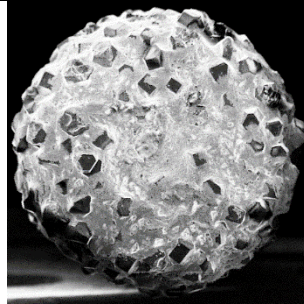
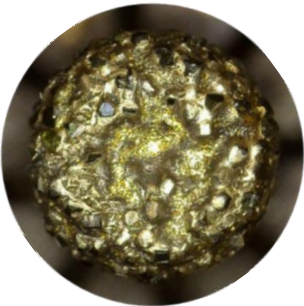
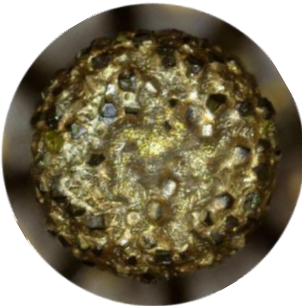
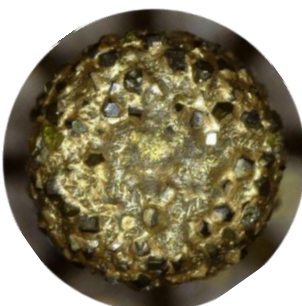
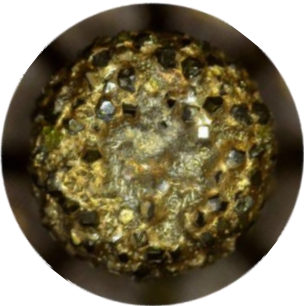
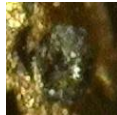
**Aşınma öncesi takımın
SEM görüntüsü**



**Aşınma öncesi takımın
mikroskop görüntüsü**

- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 32
- Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 4,235 mm²
- Aktif kesim yapan yüzey = %19

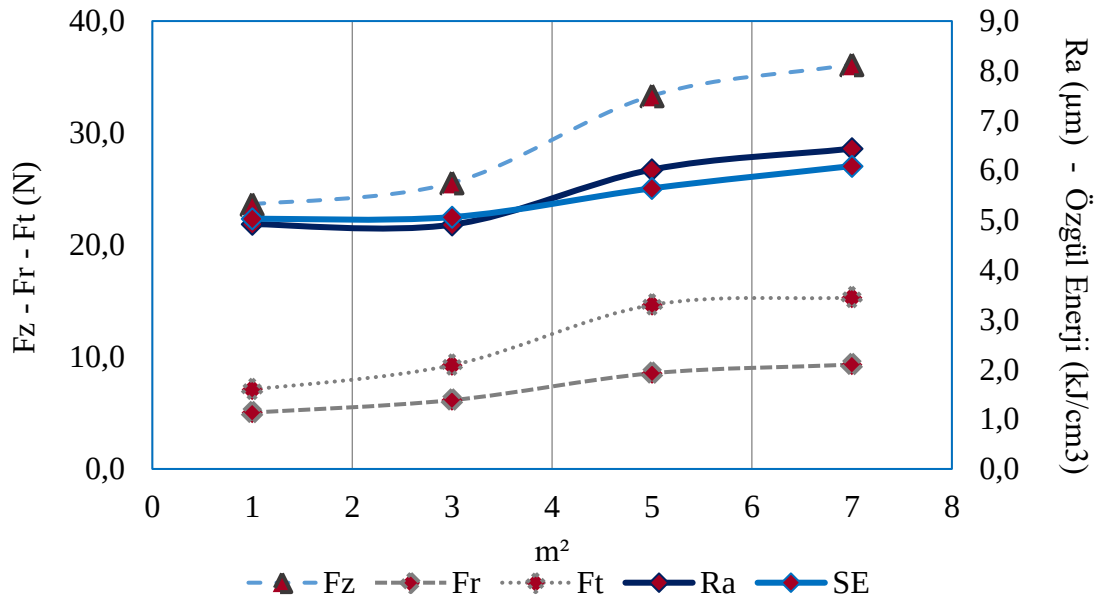
Çizelge 6.9 BB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (BB)	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²					
SEM görüntüleri									
Mikroskop görüntüleri									
Aşınan elmas türleri ve görselleri	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Parçalanma	 Kırılma	 Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	9	11	13	17					
Elmasların aşınan yüzey alanı	0,449	0,683	1,215	1,54					
Aktif Kesim yapan yüzey	% 17	% 16	% 14	% 12					

BB mermerin optimum parametreler (V_c : 12000 dev/dk, f : 2900 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.10’ da, grafiksel gösterimi Şekil 6.4’ te verilmiştir.

Çizelge 6.10 BB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	23,64	25,56	33,34	36,13
Fr (N)	5,04	6,15	8,55	9,32
Ft (N)	7,10	9,27	14,65	15,31
SE (kJ/cm³)	5,03	5,06	5,64	6,09
Ra (µm)	4,92	4,91	6,02	6,44
Gürültü (dB)	84,1	86,3	86,1	86,3



Şekil 6.4 BB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

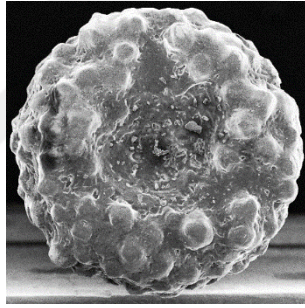
Fz, Fr ve Ft değerleri grafikte yataya yakın artış eğiliminde olup $3m^2$ 'den sonra elmaslardaki parçalanmanın etkisiyle daha hızlı bir artış görülmüştür. Ra ve SE eğrisi ise $3 m^2$ 'ye kadar stabil bir seyir izlerken, bu noktadan sonra aşınmanın etkisiyle artış göstermeye başlamıştır. Elmas tanelerdeki parçalanmalar, işleme verilerinin artmasına neden olmuş ve takım performansını olumsuz yönde etkilemiştir.

6.4 Marmara Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

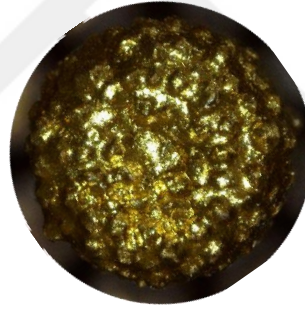
MARB mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.11' de aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.12' de gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 35 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %24'dir.

Aşınma sonucunda 33 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %11'e düşmüştür; burada kesim yüzey alanında %54 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 m²'den itibaren elmaslarda kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma aşınma türleri gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.11 MARB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.



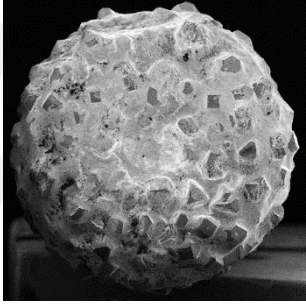
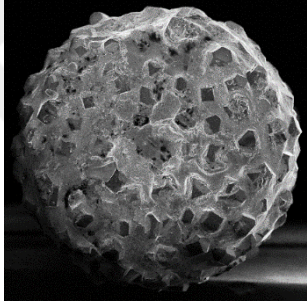
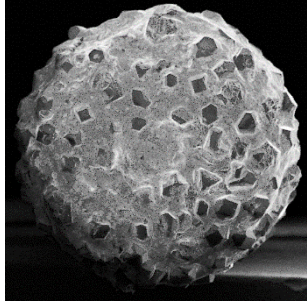
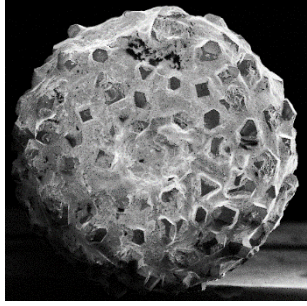
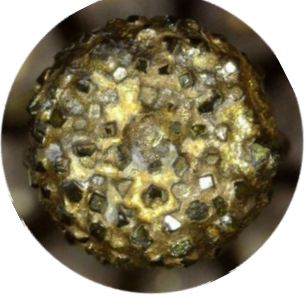
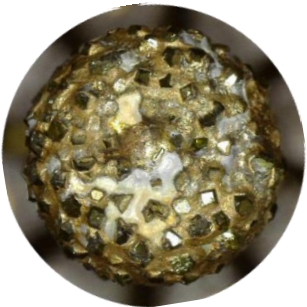
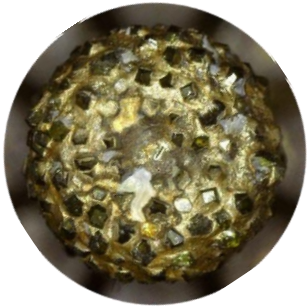
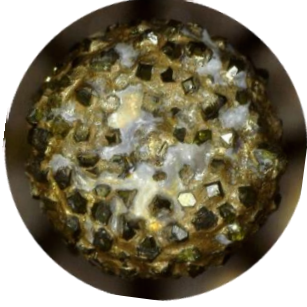
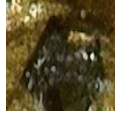
**Aşınma öncesi takımın
SEM görüntüsü**



**Aşınma öncesi takımın
mikroskop görüntüsü**

-
- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 35
 - Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 5,804 mm²
 - Aktif kesim yapan yüzey = %24
-

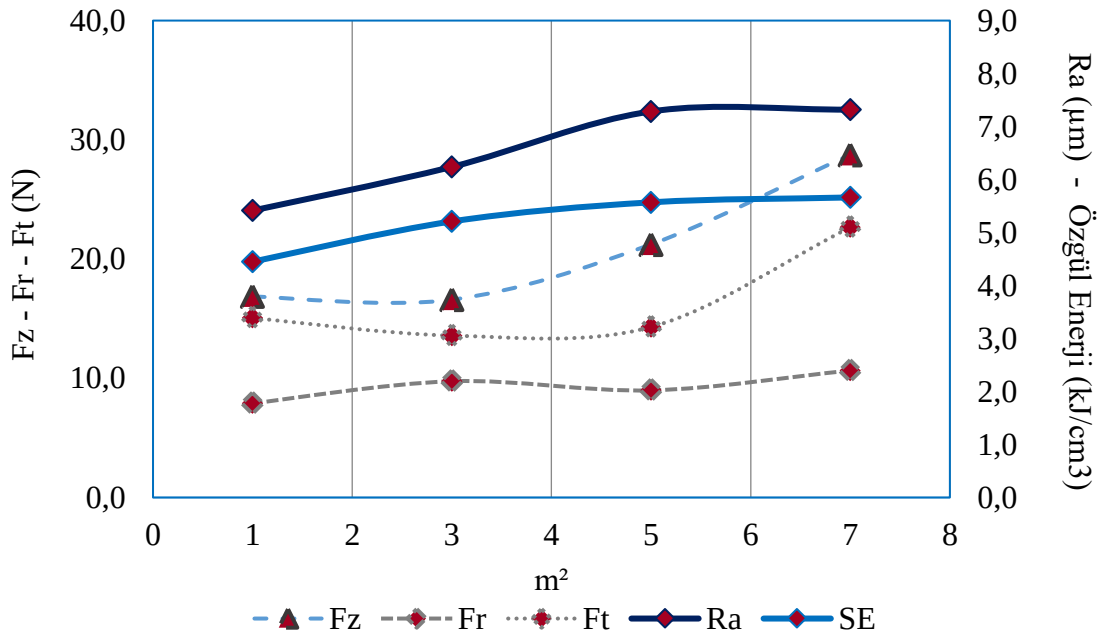
Çizelge 6.12 MARB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (MARB)	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
SEM görüntüleri				
Mikroskop görüntüleri				
Aşınan elmas türleri ve görselleri	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması  Parçalanma	 Kenar köşe aşınması  Kırılma  Parçalanma	 Kenar köşe aşınması Kırılma  Parçalanma  Parçalanma  Kırılma
Aşınan elmas sayısı	21	23	28	33
Elmasların aşınan yüzey alanı	1,477	1,877	2,257	3,171
Aktif Kesim yapan yüzey	%18	%17	%15	%11

MARB mermerin optimum parametreler (V_c : 12000 dev/dk, f : 3000 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.13’ te, grafiksel gösterimi Şekil 6.5’ te verilmiştir.

Çizelge 6.13 MARB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	16,86	16,59	21,23	28,74
Fr (N)	7,90	9,75	8,99	10,65
Ft (N)	15,06	13,58	14,30	22,66
SE (kJ/cm ³)	4,45	5,21	5,57	5,66
Ra (µm)	5,42	6,24	7,29	7,32
Gürültü (dB)	81,20	85,7	87,20	82,30



Şekil 6.5 MARB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

Frezeleme işlemlerinin başlangıcından itibaren elmaslarda meydana gelen hızlı aşınma ve malzeme yapışması, Ra ve SE değerlerinde sürekli bir artış eğilimine neden olmuştur. 3 m²'den sonra Fz değerinde, 5 m²'den sonra ise Ft değerinde belirgin bir yükseliş olmuştur. Fr değeri ise düzensiz bir dalgalanma profili sergilemiştir. Elmas tanelerdeki hızlı aşınma ve takım üzerine malzeme yapışması, takım performansının düşmesine,

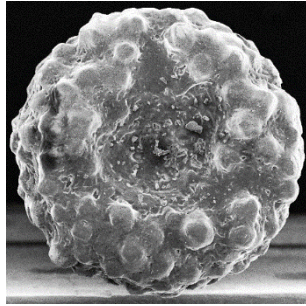
enerji tüketiminin artmasına ve yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilenmesine yol açmıştır. Mermerin dolomit içeriği, takım aşınmasının işleme verimliliği üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

6.5 Muğla Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

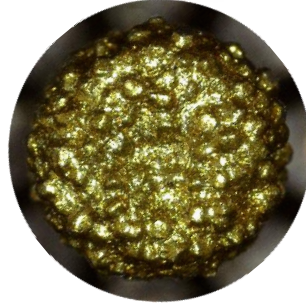
MUB mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.14' te aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.15' de gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 32 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %24'dir.

Aşınma sonucunda 26 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %11'e düşmüştür, burada kesim yüzey alanında %54 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 m²'den itibaren kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma aşınma türleri gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.14 MUB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.



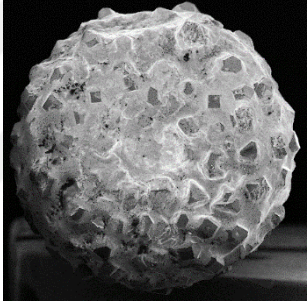
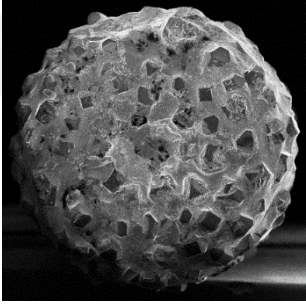
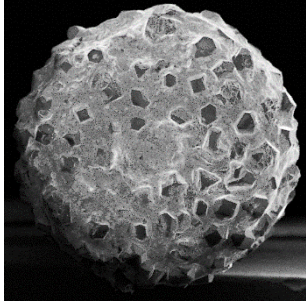
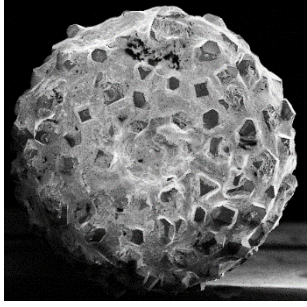
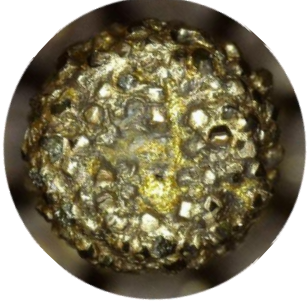
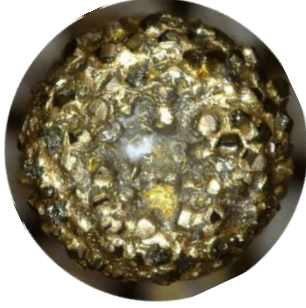
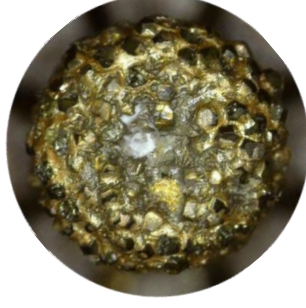
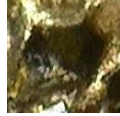
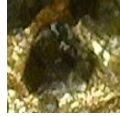
**Aşınma öncesi takımın
SEM görüntüsü**



**Aşınma öncesi takımın
mikroskop görüntüsü**

- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 32
- Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 5,482 mm²
- Aktif kesim yapan yüzey = %24

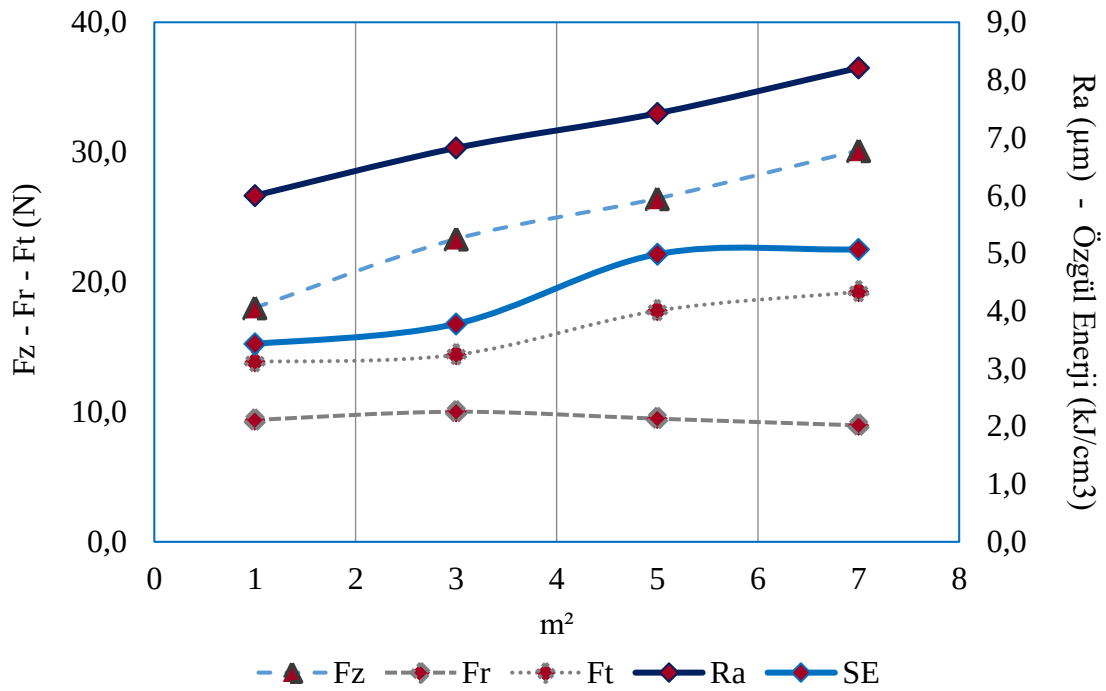
Çizelge 6.15 MUB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (MUB)	1 m ²			3 m ²		5 m ²		7 m ²	
SEM görüntüleri									
Mikroskop görüntüleri									
Aşınan elmas türleri ve görselleri									
	Kenar köşe aşınması	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	15			18		22		26	
Elmasların aşınan yüzey alanı	1,133			1,371		2,155		3,035	
Aktif Kesim yapan yüzey	% 19			% 18		% 14		% 11	

MUB mermerin optimum parametreler (V_c : 6000 dev/dk, f : 2549 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.16’ da, grafiksel gösterimi Şekil 6.6’ da verilmiştir.

Çizelge 6.16 MUB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	18,02	23,32	26,43	30,13
Fr (N)	9,38	10,01	9,48	8,96
Ft (N)	13,86	14,40	17,79	19,25
SE (kJ/cm ³)	3,43	3,78	4,98	5,07
Ra (µm)	6,00	6,82	7,42	8,21
Gürültü (dB)	75,6	77,4	78,9	78,1



Şekil 6.6 MUB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

İri taneli MUB mermer üzerinde gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde, 1 m²’den sonra aşınma ve parçalanmaların etkisiyle işleme parametrelerinde önemli değişimler meydana geldiği görülmüştür. Ra ve Fz değeri elmas tanelerdeki parçalanmanın doğrudan bir sonucu olarak sürekli bir artış göstermiştir. Elmas kesim yüzey alanındaki değişime bağlı olarak SE değerinde 3-5 m² arası belirgin bir artış olmuştur. Fr değeri frezeme süresi

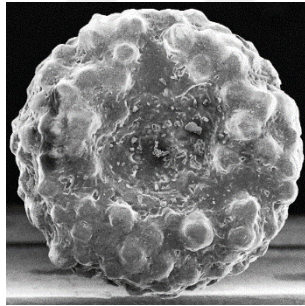
boyunca stabil bir seyir izlemiştir. 3 m²'den sonra ise Ft değerinde yükseliş olmuştur. MUB mermerin iri mineral taneli yapısı, takım üzerinde aşınma süreci ilerledikçe elmas taneciklerinde kırılma ve parçalanma etkisi ile hızlı bir performans kaybı gerçekleşmiştir.

6.6 Uşak Beyaz Mermerin Takım Aşınma Performansının İncelenmesi

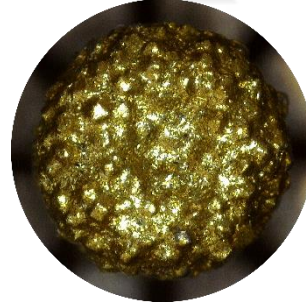
UB mermerin aşınma işlemi öncesi elmas durumları ve yüzey görüntüleri Çizelge 6.17' de aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin SEM görüntüleri mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.18' de gösterilmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 28 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %17'dir.

Aşınma sonucunda 23 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %9'a düşmüştür, burada kesim yüzey alanında %61 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 ve 3 m²'lik alanlarda kenar-köşe aşınması ve kırılma aşınma türleri gözlemlenirken, 4 m²'den sonra elmas tanelerinde parçalanma başlamıştır.

Çizelge 6.17 UB mermer için elmasların aşınma öncesi durumu.



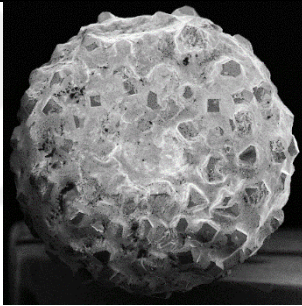
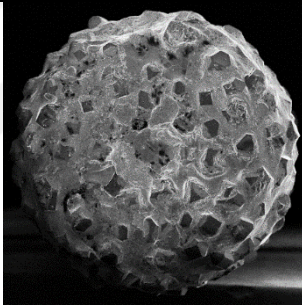
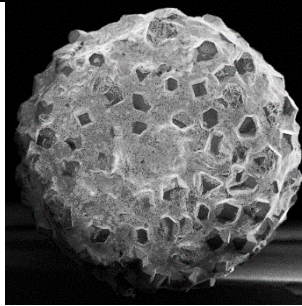
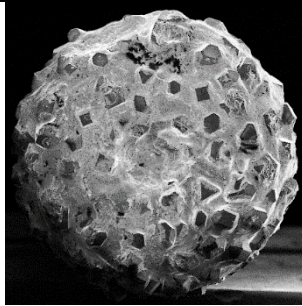
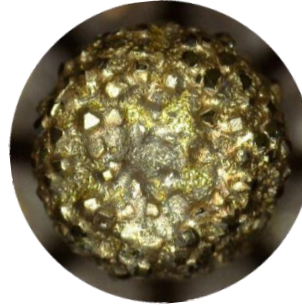
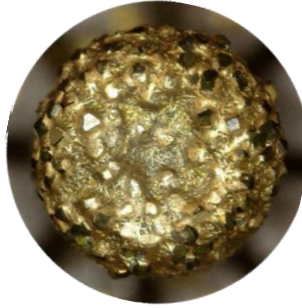
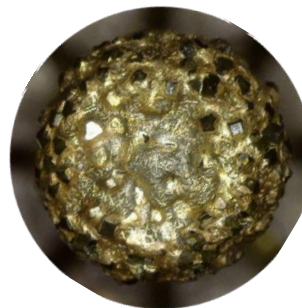
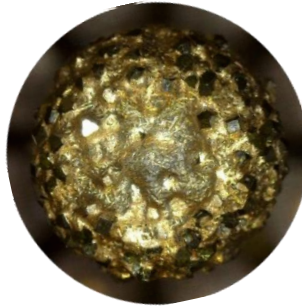
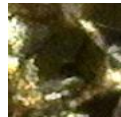
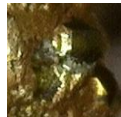
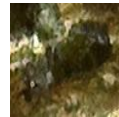
**Aşınma öncesi takımın
SEM görüntüsü**



**Aşınma öncesi takımın
mikroskop görüntüsü**

-
- Kesme yüzeyindeki toplam elmas sayısı = 28
 - Kesme yüzeyindeki elmasların kesme yüzey alanı = 3,583 mm²
 - Aktif kesim yapan yüzey = %17
-

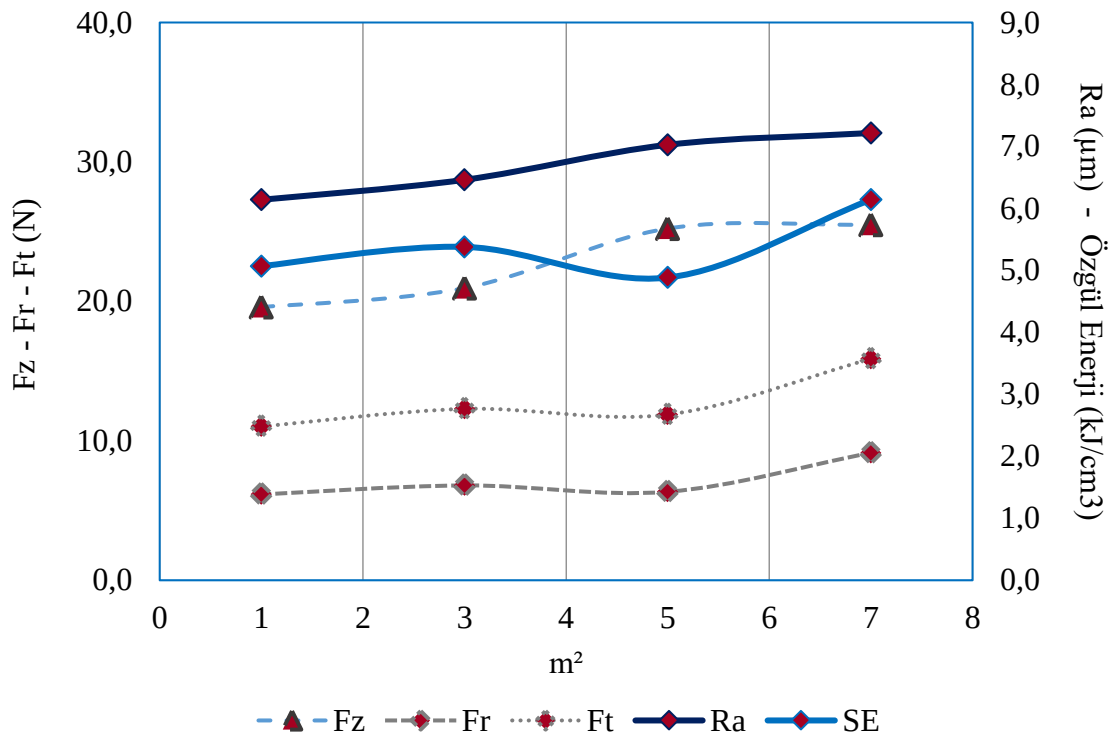
Çizelge 6.18 UB mermer için aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (UB)	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²					
SEM görüntüleri									
Mikroskop görüntüleri									
Aşınan elmas türleri ve görselleri	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Kenar köşe aşınması	 Kırılma	 Parçalanma	 Kırılma	 Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	13	19	19	23					
Elmasların aşınan yüzey alanı	0,843	1,118	1,427	1,669					
Aktif Kesim yapan yüzey	13	12	10	9					

UB mermerin optimum parametreler (V_c : 12000 dev/dk, f : 3000 mm/dk) ile yapılan aşınma deneylerinde elde edilen verileri Çizelge 6.19’ da, grafiksel gösterimi Şekil 6.7’ de verilmiştir.

Çizelge 6.19 UB mermerin aşınma süresince elde edilen ölçüm verileri.

Aşamalar	1 m ²	3 m ²	5 m ²	7 m ²
Fz (N)	19,59	20,95	25,22	25,50
Fr (N)	6,16	6,80	6,35	9,14
Ft (N)	11,02	12,29	11,89	15,88
SE (kJ/cm ³)	5,07	5,38	4,88	6,14
Ra (µm)	6,14	6,46	7,03	7,22
Gürültü (dB)	85,2	86,6	83,3	83,2



Şekil 6.7 UB mermerin aşınma verilerinin grafik üzerinde gösterimi.

Kesme kuvvetleri açısından 3 m²’den sonra Fz değeri, 5 m²’den sonra ise ve Fr ve Ft değerinde belirgin artış olmuştur. Ra değeri işleme süresince sürekli bir artış göstermiştir SE değeri stabil seyir göstermiş olup, 5m²’de elmaslardaki parçalanmanın gerçekleşmesiyle anlık olarak düşüş gerçekleşirken sonrasında belirgin bir artış olmuştur.

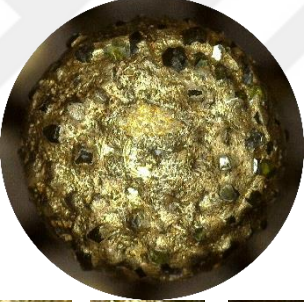
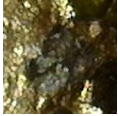
6.7 AG Mermerin Referans Optimum Parametreye göre Aşınmanın İncelenmesi

AG mermerin aşınma durumunun kademeli ilerleyişinin mikroskop görüntüleri ile aşınma işlem verileri Çizelge 6.20' de gösterilmiştir. AG mermerin optimize değerleri Vc 6000, f 2224 olarak elde edilmiştir. ROP ise Vc 12000, f 3000 şeklindedir. Bu nedenle AG mermer için elde edilen ROP ile aşınma deneyleri yapılarak aşınma durumu incelenmiştir. Aktif kesim yapan elmas sayısı 34 adet olup, bu elmasların kesim yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı %20'dir. Aşınma sonucunda 32 adet elmas aşınmış ve kesim yapan yüzey alanı %7'ye düşmüştür; burada kesim yüzey alanında %65 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma türleri arasında 1 m²'lik alanlarda kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma aşınma türleri gözlemlenmiştir.

AG mermerin karakteristik optimum (KOP) parametreleri ile karşılaştırıldığında 7 m²'lik işleme sonucunda ROP parametrelerle %47,72 oranında daha fazla aşınma olmuştur. Ayrıca KOP ile elmaslarda parçalanma oluşumu 3m²'de oluşurken, ROP' ta 1 m²'de oluşmuştur. ROP ile yapılan frezeleme işleminde takım elmaslar hızla aşınmıştır. Bu bulgular, mermerlerin karakteristik özellikleri optimizasyon sürecinde belirlenen girdi parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, bu parametrelerin takım aşınmasında doğrudan etkili bir rol oynadığını açıkça göstermektedir.

AG mermeri üzerinde ROP ile yapılan aşınma deneyi, mermerin karakteristik özelliklerinin optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. ROP genel bir referans yaklaşımı sunmakla birlikte, her mermerin kendine özgü karakteristik özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.20 AG için ROP sonucu aşınma görüntüleri ve ölçümleri.

Aşamalar (AG)	1 m ²			3 m ²		5 m ²		7 m ²	
Mikroskop görüntüleri									
Aşınan elmas türleri ve görselleri									
	Kenar köşe aşınması	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma	Kırılma	Parçalanma
Aşınan elmas sayısı	18			24		29		32	
Elmasların aşınan yüzey alanı	0,319			0,624		0,847		1,300	
Aktif Kesim yapan yüzey	% 14			% 11		% 8		% 7	

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Doğal taş sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip mermerlerin işlenmesinde, elmas freze takımlarının aşınma performansı hem işleme maliyetleri hem de elde edilen yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Çalışmada, uygulamada yaygın olarak kullanılan altı farklı mermer türü için vakumla lehimleme teknolojisi ile üretilen kaplamalı elmas takımların frezeleme sürecindeki davranışları, enerji verimliliği ve yüzey kalitesi değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerin mermer işleme endüstrisinde daha verimli ve ekonomik üretim yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmiştir. Belirlenen optimum frezeleme parametreleri, elmas freze takımının aşınma davranışı ve mekanizmaları takım aşınma mekanizmaları ve bu mekanizmaların işleme parametreleriyle olan ilişkisi ele alınarak, endüstriyel uygulamalar için önemli çıkarımlar yapılmıştır.

Vakumla kaplama yöntemi ile elmas tanelerinin takım yüzeyine sağlam bir şekilde bağlanması sağlanmıştır. Yapılan testler sonucunda 7 m²'lik işleme sonrasında bile elmaslarda kopma olmaması, kaplama yönteminin aşırı aşınma koşullarında bile elmasları tutma kabiliyetini koruduğunu göstermektedir. Bu durum, uygulanan kaplama yönteminin etkinliğini ve elmas tanelerinin takım yüzeyine olan bağlanma dayanımını göstermiş olup, takım ömrünü uzatma ve işleme maliyetlerini düşürme potansiyeline sahip önemli bir gelişme olmuştur.

Aşınma deneyleri, 1, 3, 5 ve 7 m² olmak üzere 4 farklı aşınma seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Her aşamada, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve harcanan enerji değerleri ölçülmüştür. Deneylerde, elmas taneler takım gövdesine bir bağlayıcı malzeme ile tutturulmuş ve bu bağlayıcı malzeme belirli bir aşınma seviyesine kadar elmasları tamamen kaplamıştır. Mermer frezelemede elmas takımların kaplama malzemesi ile bağlanması, belirli bir aşınma seviyesine kadar olumlu sonuçlar vermiştir.

Elmaslarla gözlenen aşınma şekilleri genel olarak kenar-köşe aşınması, kırılma ve parçalanma şeklindedir. Aşınma süresince MARB mermerde yapışma yoğunluğu oldukça yüksek olmuştur, bunun nedeni mermerin yapısındaki dolomit olmasından

kaynaklanmaktadır. Diğer numunelerde ise MARB mermerdeki gibi yapışma yoğunluğu yüksek değildir.

Çalışmada, farklı mermer türlerinin işlenmesi sırasında kesme kuvvetlerinin ve takım performansının değişimini ortaya konmuştur. Frezeleme süresinde kırılan ve parçalanan elmaslar özgül enerji değerlerinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Tüm mermer numunelerinde kaplama malzemesinin aşınmasıyla birlikte elmas tanecikleri kademeli olarak açığa çıkmakta ve bu süreçte kesme kuvvetlerinde, yüzey pürüzlülüğünde ve özgül enerji tüketiminde belirgin bir azalma olmuştur. Bu durum, elmasların daha fazla açığa çıkması ve kesme işlemine daha etkin katılımıyla ilişkilidir. Elmasların aşınma sürecinde belirli bir noktaya kadar kararlı bir kesme performansı sunarken, sonrasında performansta düşüşler yaşanmıştır

Fr ve Ft kuvvetleri aşınma süreci boyunca nispeten sabit seyir izlemekte ve hafif bir artış göstermektedir. Genel olarak aşınma süreci boyunca elmas aşınmasının Fr ve Ft kuvvetleri üzerindeki daha az etkisi olmuştur. Fz kuvveti tüm mermerler için artış eğiliminde olmuştur. Fz' nin artışı, elmasların aşınmasıyla birlikte daha fazla baskı kuvveti uygulamış ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemiştir. Kuvvetlerdeki değişimler yüzey pürüzlülüğü ve özgül enerji değerleriyle uyumluluk göstermektedir.

Deney numunelerinin mekanik özellikleri ile optimum parametreleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Optimum parametreler ile mekanik dayanım verileri.

Numune Kodu	Optimum		Basınç	Aşınma
	Vc (dev/dk)	f (mm/dk)	Dayanımı (MPa)	Direnci (mm)
AB	12000	3000	77	24,6
BB	12000	2900	80	21,1
UB	12000	3000	79	20,4
AG	6000	2224	92	18,6
MUB	6000	2549	106	18,2
MARB	12000	3000	70	18,4

Mermerlerin basınç dayanımı ve aşınma direnci özellikleri ile optimum işleme parametreleri arasında ilişki olduğu görülmüştür. Basınç ve aşınma dayanımları düşük olan mermerler (AB, BB ve UB) yüksek devir ve ilerleme hızlarında; basınç ve aşınma dayanımları yüksek olan mermerler (AG ve MUB) ise düşük hız ve ilerleme hızlarında optimum sonuçlar vermiştir. MARB mermer ise basınç (70 MPa) ve aşınma dayanımları (18,4 mm) düşük olmasına rağmen dolomit içeriği nedeniyle yüksek devir ve ilerleme hızlarında optimum parametre elde edilmiştir.

İnce mineral tane boyutları (AB, 206,7 μm ve BB 123,0 μm), elmas takımlarda daha az aşındırıcı etki gösterirken, iri mineral tane boyutları (AG, 340,6 μm , MUB, 475,2 μm ve UB, 501,7 μm) daha fazla aşındırıcı etki göstermiştir. İnce mineral taneli mermerler, elmaslara daha az direnç göstererek elmasların mermere daha kontrollü bir şekilde nüfuz etmesine ve daha geç aşınmasına neden olmuştur. İri mineral taneli mermerler, elmas tanelerinin daha hızlı ve düzensiz bir şekilde aşınmasına neden olmuştur. İri taneler, elmas tanelerine daha büyük ve ani kuvvetler uygulayarak, takımın aşınma hızını artırmaktadır. Özellikle Marmara Beyaz mermerin dolomitik yapısı ince taneli yapıda (88,0 μm) olmasına rağmen elmasların hızla aşınmasına neden olmuştur. Ayrıca dolomitik yapı, takım üzerinde yoğun bir yapışma olmasına ve takımın hızla aşınmasına yol açmıştır. Marmara Beyaz mermer takım üzerinde en hızlı aşındırıcı etki göstermiş ve takımın aktif kesim yapan yüzey alanı %54 oranında azalmıştır. İnce taneli mermerlerde aşınma sonucu kesim oranlarında %30-48 arasında olurken iri taneli mermerlerde kesim oranlarında %54-61 oranında azalma olmuştur. Mineral tane boyutu elmas tanelerinin aşınma hızı üzerinde etkin olmaktadır.

AB ve AG mermerleri aynı il sınırları içerisinde çıkarılmasına rağmen; AG mermeri daha düşük V_c ve f ile işlenmeye daha uygunken, AB mermeri daha yüksek parametrelerle işlenebilmektedir. Bu durum her iki mermer türünün kendine özgü farklı yapısal özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca AG mermeri üzerinde ROP ile yapılan deney sonucunda takımın %48 oranında daha fazla aşınması, mermerin karakteristik özelliklerinin optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda mermerlerin karakteristik

özellikleri yalnızca optimum parametrelerin belirlenmesinde değil, aynı zamanda işlem verimliliği ve takım ömrü üzerinde de kritik bir faktör olmuştur. KOP, yalnızca işlem verimliliği ve takım ömrünü artırmakla kalmayıp, aynı zamanda mermerlerin yapısal özelliklerine uygun bir işleme stratejisi geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında yapılan regresyon analizlerinde genel olarak %80 ve üzeri sonuçlar elde edilmiş olup tüm mermer türleri için güçlü ilişkiler bulunmuştur. Ayrıca yapılan F testi sonuçlarının hepsinde ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında yüksek bir uyumluluk olduğu görülmüştür. Modelin tahmin gücünün; güçlü, güvenilir ve geçerli olduğunu göstermiştir.

Mermerinin işlenmesinde karşılaşılan önemli zorluklardan biri, elmas freze takımlarının hızlı aşınması ve bu durumun yol açtığı yüksek işleme maliyetleridir. Elde edilen sonuçlar, vakumla kaplamalı elmas takımların geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük aşınma oranları ve daha yüksek işleme performansı sunduğunu ortaya koymaktadır. Vakumla kaplamalı elmas takımların, mermerinin daha verimli ve düşük maliyetli işlenmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Gelecekte, farklı mermer türleri göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılması önerilmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Altıntaş Y, 2012, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press, United States of America.
- 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.
- Bagnall R, 2022, Beginner's Guide to CNC Machining in Wood, Fox Chapel Publishing Company, Fox Chapel and Fox Chapel Publishing Company, 903 Square St Mount Joy, PA.
- Box EP G, Draper R N, 2007, Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses, Wiley Interscience a John Wiley & Sons Inc. Publication, Hoboken, New Jersey, USA.
- Chattopadhyay A B, 2017, Machining and Machine Tools, Wiley India Pvt. Ltd., Daryaganj, New Delhi.
- Cserta E, Gyurika I G, 2021, Effects of The Granite-Forming Minerals on The Surface Roughness in The Milling Processes, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112, 3041–3052, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06534-w>.
- European Standards Institute (EN), 2003, Natural stone test methods determination of Knoop hardness, Brussels, Standard No. EN 14205, English.
- European Standards Institute (EN), 2006, Natural Stone Test Determination of Real Density, Apparent Density, Total and Open Porosity, Brussels, Standard No. EN 1936, English.
- European Standards Institute (EN), 2008 Characterization Of Waste And Soil-Determination Of Elemental Composition By X-Ray Fluorescence, Brussels, Standard No. EN 15309, English.
- European Standards Institute (EN), 2013, Natural Stone Test Methods Determination Of Compressive Strength, Brussels, Standard No. EN 1926, English.

- European Standards Institute (EN), 2014, Natural Stone Test Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure, Brussels, Standard No. EN 13755, English.
- European Standards Institute (EN), 2017, Natural Stone Test Determination of Abrasion Resistance, Brussels, Standard No. EN 14157, English.
- European Standards Institute (EN), 2022, Natural Stone Test Determination of Flexural Strength Under Concentrated Load, Brussels, Standard No. EN 12372, English.
- Ford E, 2016, Make: Getting Started with CNC, Maker Media, The United States of America.
- Gálos M, Gyurika I G, 2014, Quality Measuring Numbers of Milled Edges of Granite Surfaces, Civil Engineering, 58 (2), 121–129, <https://doi.org/10.3311/PPci.2158>.
- Guangyu Y, Yuhou W, Dehong Z, He Wang, 2016, Simulation and Experiment Study on Cutting Force of Coated Tool Milling Natural Marble, Mechanika, 22 (4), 297-302.
- Gyurika I G, 2018, Researching the Effects of Feedrate and Diamond Grain Size on Edge Chipping of Milled Granites, Tehnički Vjesnik, 25, 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.
- Haynes G, 2015, Milling Machines & Milling Operations, Cyber Press, Case Western Reserve University, Ohio.
- Howarth D F, Rowlands J C, 1987, Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation With Drillability and Strength Properties, Rock Mechanics and Rock Engineering, 20, 57-85.
- Kenda J, Kopač J, 2009, Diamond Tools for Machining of Granite and Their Wear, Journal of Mechanical Engineering, 55 (12), 775-780.
- Khuri I A, 2005, Response Surface Methodology and Related Topic, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

- Li X, Zhang Q, Li J, Zha J, 2018, A Numerical Study of Rock Scratch Tests Using The Particle-Based Numerical Manifold Method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 78, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.029>.
- Lu F, Li H X, Gabor C, Wang Y Y, Zhao J B, 2020, Tool Wear Analysis of Multi-Layer Diamond Coated Tools for Cutting White Marble, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 789, 1-6, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012034>.
- Montgomery C D, 2020, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons Inc. Tenth Edition, Hoboken, New Jersey, USA.
- Nee Y C A, 2015, *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer-Verlag, London, UK.
- Öz O, 2018, Doğal Taşların CNC Makinesi ile İşlenmesinde Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi Uygulanarak Yüzey Kalitesinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özkan E, Öz O, 2020, 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>.
- Özkan E, Öz O, 2021, 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, 2023, Limra Kireçtaşının CNC Doğal Taş İşleme Makinesinde İşleme Parametrelerinin ve Yüzey Kalitesinin Araştırılması, *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 12 (24), 13-27.
- Özkan E, Öz O, Tuğral N, 2023, Investigation of The Effect of Radial Width and Axial Depth Parameters on Surface Quality in Milling of White Marbles, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 1267-1280.
- Prikryl R, Török A, 2010, *Natural Stone Resources for Historical Monuments*, The Geological Society Special Publications 333, London, United Kingdom.

- Rao R V, 2010, Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes, Springer Series in Advanced Manufacturing, New York, USA.
- Rao S S, 2020, Engineering Optimization Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., Fifth Edition, Hoboken, New Jersey, USA.
- Rockwell P, 1993, The Art of Stoneworking a Reference Guide, Cambridge University Press, New York, USA.
- Sarıışık G, 2021, Investigation on Cutting Parameter Models and Processability Index in 3D Marble Products With Milled Tools, Arabian Journal of Geosciences, 14, 1854, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08256-z>.
- Sarıışık G, Özkan E, 2016, Bilgisayar Kontrollü Makine (CNC) ile Mermerlerin İşlenebilirliğinde Kesme Kuvveti ve Spesifik Enerjinin Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 420-430, <https://doi.org/10.5578/fmbd.27592>.
- Sarıışık G, Özkan E, 2017, Mermerlerin CNC Makinesi ile İşlenmesinde Kesme Kuvvetleri ve Spesifik Kesme Enerjisinin İstatistiksel Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 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>.
- Schulz B, 2020, Manual of Natural Stone Modern Usage of a Classic Building Material, Detail Publishing, Munich, Germany.
- Tuğral N, 2019, CNC Makinesinde Gerçek Mermerlerin Kesme Genişliğinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turchetta S, Polini W, Buyuksagis I S, 2009, Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy, Advances in Mechanical Engineering, 1, <https://doi.org/10.1155/2009/175817>.

- Turchetta S, 2012, Cutting Force and Diamond Tool Wear in Stone Machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 61, 441–448, <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3717-4>.
- Uhlmann E, Manthei M, 2015, Analysis of The Cutting Process For Milling of Marble and Sandstone With an End Mill Cutter, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology (IPK), Berlin.
- Wang S, Zhang J, Dong P, 2020a, Comparison of Wear Characteristics of Diamond Segments Under Different Sawing Modes in Sawing Hard Stone, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 87, 105149. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105149>.
- Wang F, Liu S, Guo Z, Cao L, 2020b, 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>.
- Wu Z, Buck D, Jin D, Guo X, Cao P, Zhu Z, 2021, Investigation on Milling Quality of Stone–Plastic Composite Using Response Surface Methodology, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 74 (5), 2063-2070, <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05024-y>.
- Yin F C, Ji Q Z, Wang C Z, 2021, Research on Machining Error Prediction And Compensation Technology for a Stone-Carving Robotic Manipulator, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 1683-1700, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07230-z>.
- Yel A, 2024, Doğal Taşların Frezeleme İşlemlerinde Kullanılan Elektrolize Kaplamalı Elmas Freze Takımlarının Aşınma Mekanizmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yin F, Qingzhi J, Cun C, 2022, Data-Driven Modeling and Prediction Analysis for Surface Roughness of Special-Shaped Stone by Robotic Grinding, *IEEE Access*, 10, 67615- 67629, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179818>.
- Yin F, Zhang H, 2024, Contouring Error Prediction and Optimization of Stone Relief for Robotic Milling, *Sharif University of Technology*, 31 (16), 1431-1449, <https://doi.org/10.24200/sci.2023.59368.6200>.

- Zhao D, Yan G, Wu Q, 2014, Research on Wear Characteristics of CVD Composite Coated Tool in Natural Marble Cutting, *Advanced Materials Research*, 941-944, 1644-1649, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.1644>.
- Zhu Z, Buck D, Guo X, Cao P, 2020, High-Quality and High-Efficiency Machining of Stone-Plastic Composite With Diamond Helical Cutters, *Journal of Manufacturing Processes*, *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 914-922, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.004>.
- Zhu Z, Buck D, Guo X, Cao P, Wang J, 2020, Cutting Performance in The Helical Milling of Stone-Plastic Composite With Diamond Tools, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 119-129.
- Zhu Z, Buck D, Guo X, Cao P, Wang J, 2020, Assessment of Cutting Forces and Temperature in Tapered Milling of Stone–Plastic Composite Using Response Surface Methodology, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 72 (11), 3917–3925, <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04368-1>.

- Özkan E, Öz O, 2020, 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>.
- Özkan E, Öz O, 2023, Limra Kireçtaşının CNC Doğal Taş İşleme Makinesinde İşleme Parametrelerinin ve Yüzey Kalitesinin Araştırılması, MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi, 12(24), 13-27.
- Özkan E, Öz O, Tuğral N, 2023, Investigation of The Effect of Radial Width and Axial Depth Parameters on Surface Quality in Milling of White Marbles, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 1267-1280.
- Öz O, Özkan E, 2024, Effect of Diamond Grain Sizes on Cutting Forces and Specific Energy in Marble Milling Processes, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.