



**DOĞAL TAŞLARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDE
KULLANILAN ELEKTROLİZE KAPLAMALI
ELMAS FREZE TAKIMLARININ AŞINMA
MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YEL

Danışman

Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.52 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞAL TAŞLARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDE KLLANILAN
ELEKTROLİZE KAPLAMALI ELMAS FREZE TAKIMLARININ
AŞINMA MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI

Ali YEL

Danışman

Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24 / 07 / 2024

Ali YEL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞAL TAŞLARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTROLİZE KAPLAMALI ELMAS FREZE TAKIMLARININ AŞINMA MEKANİZMASININ ARAŞTIRILMASI

Ali YEL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erkan ÖZKAN

Bu araştırmada, doğal taşlar üzerinde elektrolize kaplamalı elmas freze takımlar kullanılarak yapılacak frezeleme işleminde amaç; en düşük maliyetle en yüksek üretim miktarına ulaşmak, maksimum yüzey kalitesi elde etmek ve freze takım ömürlerini en verimli şekilde kullanmaktır. İyi seçilemeyen işleme parametreleri, işlenen malzemenin bozulması, yüzey kalitesinin düşüklüğü ve freze takımlarının kullanım ömründen önce aşınması gibi ekonomik kayıplara da sebep olmaktadır. Taguchi deney tasarımının S/N oranı analizi olan “en küçük en iyi” yaklaşımına dayalı istatistiksel analizler yapılarak en uygun işleme parametreleri (Mermer için kesme hızı 188 m/dk, ilerleme hızı 1500 mm/dk; dolomitik mermer için kesme hızı 226 m/dk, ilerleme hızı 1500 mm/dk) bulunmuştur. Belirlenen parametrelere göre 1 m²'lik alan frezelemesinde elmas uçlardaki aşınma durumları tespit edilmiştir. Elektrolize kaplamalı elmas freze takımının en verimli halde kullanılması için optimum işleme parametrelerinin seçimi, ekonomikliğin sağlanmasında önemli bir faktördür.

2024, vii + 47 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğal Taş, Frezeleme, Elektrolize Kaplamalı Elmas Freze, Aşınma

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE WEAR MECHANISM OF ELECTROLISED COATED DIAMOND MILLING TOOLS USED IN MILLING PROCESSES OF NATURAL STONE

Ali YEL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Erkan ÖZKAN

This research, aim is to achieve the highest production quantity at the lowest cost, obtain maximum surface quality, and utilize diamond end mill tool life as efficiently as possible through the milling operation performed on marbles using electroplated diamond end mills. Poorly selected processing parameters can also cause economic losses such as deterioration of the processed material, poor surface quality, and premature wear of the end mills. Statistical analyses based on the "smaller-the-better" approach of Taguchi experimental design S/N ratio analysis were performed to find the most suitable processing parameters (for marble: cutting speed 188 m/min, feed rate 1500 mm/min; for dolomitic marble: cutting speed 226 m/min, feed rate 1500 mm/min). According to the determined parameters, the wear conditions of the diamond tips were detected during the milling of a 1 m² area. The selection of optimum processing parameters is an important factor in ensuring the most efficient use of the electroplated diamond end mills and in achieving cost-effectiveness.

2024, vii + 47 pages

Keywords: Natural Stone, Milling, Electroplated Diamond Milling, Wear

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Erkan ÖZKAN'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın gr. Gr. Oğuzhan Z'e her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

'Doğal Taşların Frezeleme İşlemlerinde Kullanılan Elektrolize Kaplamalı Elmas Freze Takımlarının Aşınma Mekanizmasının Araştırılması' isimli tezime ve 22.FEN.BİL.52 numaralı projeye yapılan desteklerden dolay BAPK' ya teşekkür ederim.

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

Ali YEL
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
RESİMLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
3. MATERYAL ve METOT	12
3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi	12
3.2 Elektrolize Kaplamalı Elmas Freze Takımı	13
3.3 Çalışmalarda Kullanılan Doğal Taşlar	13
3.4 Taguchi Yöntemi	16
3.5 Deneysel Çalışmalar	18
3.6 İstatistiksel Analizler	27
3.7 Özgül Enerji Ölçümleri	30
3.8 Kuvvet Değeri Ölçümleri	30
3.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	31
4. BULGULAR	33
4.1 Bursa Beyaz Mermer İçin S/N Analizi.....	34
4.2 Marmara Dolomitik Mermer İçin S/N Analizi	36
4.3 Aşınma Mekanizmasının Araştırılması	39
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	42
6. KAYNAKLAR	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 4.1 S/N Oranı Grafiği (Bursa Beyaz mermer).	35
Şekil 4.2 S/N Oranı Grafiği (Marmara Dolomitik mermer).	38



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi teknik özellikleri.....	12
Çizelge 3.2 Elektrolize kaplamalı elmas freze takım teknik özellikleri.....	13
Çizelge 3.3 Numunelerin fiziko-mekanik özellikleri.....	14
Çizelge 3.4 Numunelerin petrografik özellikleri.	14
Çizelge 3.5 Numunelerin X-Ray fluorescence (XRF) analiz sonuçları.	14
Çizelge 3.6 Ortogonal dizin tablosu.....	16
Çizelge 3.6 (Devam) Ortogonal dizin tablosu.	17
Çizelge 3.7 Deney parametreleri.....	18
Çizelge 3.8 Taguchi yöntemi uygulanarak oluşturulan L16 ortogonal dizim modeli.....	19
Çizelge 3.9 Varyans analiz tablosu.	27
Çizelge 4.1 Analiz sonuçları (Bursa Beyaz mermer).....	34
Çizelge 4.2 Rank ve delta değerleri (Bursa Beyaz mermer).....	35
Çizelge 4.3 Varyans analizi (Bursa Beyaz mermer).	36
Çizelge 4.4 Analiz sonuçları (Marmara Dolomitik mermer).	36
Çizelge 4.4 (Devam) Analiz sonuçları (Marmara Dolomitik mermer).	37
Çizelge 4.5 Rank ve delta değerleri (Marmara Dolomitik mermer).	37
Çizelge 4.6 Varyans analizi (Marmara Dolomitik mermer).	38

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Doğal taş dikey işleme makinesi.	12
Resim 3.2 Elektrolize kaplamalı elmas freze takımı.	13
Resim 3.3 Bursa Beyaz Mermer ve Marmara Dolomitik Mermer ince kesit görüntüleri (Kal=Kalsit mineralleri, Dol=Dolomit mineralleri).	15
Resim 3.4 Çalışma alanı.	20
Resim 3.5 120x50 mm ölçülerindeki dikdörtgen alanlar.	20
Resim 3.6 Takım yolu atamaları.	21
Resim 3.7 Örnek takım atama aşamaları.	22
Resim 3.8 Simülasyon aşamaları.	23
Resim 3.9 Deneysel tezgâhı düzeneği.	24
Resim 3.10 PLC cihazı.	25
Resim 3.11 Defne Lab Soft yazılımının ekran görüntüsü.	25
Resim 3.12 Bursa Beyaz mermer numunesinin nihai görüntüsü.	26
Resim 3.13 Marmara Dolomitik mermer numunesinin nihai görüntüsü.	26
Resim 3.14 %95 güven aralığında F dağılımı için tablo değerleri.	29
Resim 3.15 Hioki yüksek hassasiyetli güç analizör cihazı.	30
Resim 3.16 Defne LabSOFT yazılımı örnek ölçüm görüntüsü.	31
Resim 3.17 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile örnek ölçüm.	32
Resim 3.18 Nikon C-PS model mikroskop kamera.	39
Resim 3.19 Bursa Beyaz mermer aşınma tipleri.	40
Resim 3.20 Marmara Dolomit mermer aşınma tipleri.	41

1. GİRİŞ

CNC (Bilgisayar Kontrollü Makineler), sembollerle kodlanarak tasarlanan ve insan müdahalesi gerektirmeden mantıksal işleme sırasına göre nihai ürün çıkarabilen sistemlerdir. CNC makineler, üç boyutlu mermer tasarımlarını seri ve yüksek hassasiyetle üretebilir. İşlenen malzemenin yüzey pürüzlülüğü, işleme kalitesinin belirleyici bir faktördür ve pürüzlülük, işleme parametrelerine bağlı olarak değişir. CNC makineler, yazılı programa göre çalışarak insan müdahalesi olmadan ürün üretebilirler ve doğaltaş firmaları tarafından tercih edilirler. CNC makinelerin en önemli özelliği, işleme kalitesiyle birlikte malzemenin geometrisini, boyutunu ve yüzeyini kapsamasıdır. CNC frezeleme işlemleri için çeşitli CAM programları kullanılır ve bu programlar tasarım sürecinde farklı işlem seçenekleri sunar. CNC makineleri, doğaltaş sektöründe yaygın olarak kullanılmakta ve üreticilere rekabet avantajı sağlayarak ülke ekonomisine katkıda bulunmaktadır (Sarıışık ve Özkan 2016, 2017, 2018).

Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş malzemelerin kalitesini belirleyen kritik bir faktördür ve bu pürüzlülük tüm yüzey boyunca homojen olmalıdır. İşleme parametrelerinin doğru seçimi, gereksiz zaman ve maliyet kayıplarını engellerken yüksek kaliteli üretimi destekler.

Doğaltaşlarla frezeleme işleminin temel prensibi, düşük maliyetle yüksek üretim sağlanarak yüksek ürün kalitesine ulaşmaktır. Bu süreçte doğru işleme parametrelerinin seçimi büyük önem taşır çünkü yanlış seçimler ekonomik kayıplara ve düşük kaliteli ürünlere yol açabilir. El ile yapılan parametre seçimi ise istenmeyen sonuçlara neden olabilir ve en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etmeyi zorlaştırabilir. Bu nedenle, en üst düzeyde yüzey kalitesini sağlamak için optimal işleme parametrelerinin seçimi, ekonomiklik ve kaliteli üretimi bir arada sunar (Bozdoğan 2012, Kara 2012, Meydaneri 2014).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Araştırmaların sonuçlarına göre, birçok araştırmacı farklı alaşımli paslanmaz çelik malzemelerin, karbür kaplamalı veya kaplamasız takımlarla CNC tezgahında işlenmesi sürecinde kesme kuvvetleri ile optimal yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için en uygun işleme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmalarda, kesici uç çapı, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve talaş kalınlığı gibi çeşitli seviyelerde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar, bir frezeleme işleminde en kritik parametrelerin kesicinin kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği olduğunu ortaya koymuştur.

Bozdoğan (2012) çalışmasında, iş parçası olarak PMD 23 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Çoklu-katmanlı TiAlN kaplamalı kesici takımlar kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak ilerleme hızı, kesme hızı, kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetlerinin en uygun değerlerini araştırmıştır. Deneylerde Taguchi metodolojisi uygulanmıştır. Deney sonuçlarının etkilerini belirlemek için varyans analizi, parametreler arasındaki etkileşim regresyon analizi ile modellenmiştir. Çalışma sonucunda Taguchi deney tasarımının etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerine ilerleme hızı, kesme kuvveti değerlerine ise kesme derinliğinin etkin faktör olduğu tespit edilmiştir.

Kara (2012) çalışmasında, GS 24Mn5 N çelik döküm malzemesi üzerinde frezeleme işlemleri uygulanarak nihai yüzeyin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işleme parametrelerinin etki oranlarını belirlemiştir. Kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve takım diş sayısı gibi parametreler üzerinde yapılan deneylerde Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar, kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını ve en önemli faktör olduğunu göstermiştir. İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı, kesme hızıyla ters orantılı olduğu belirlenmiştir. Talaş derinliği ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu ancak talaş derinliği ve takım diş sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Taguchi deney tasarımının deneyleri azaltarak zaman ve maliyet kaybını engellediği belirtilmiştir.

Memiş (2015) çalışmasında, AISI 2205 paslanmaz çeliğin CNC torna tezgahında işlenmesi sırasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülükleri ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylede Kistler 9257B dinamometre ve Mahr Perthometer M1 yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılarak kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. SNMG 120408 NM4 WSM20 ve SNMG 120408 NR4 WSM20 kesici takımların kullanıldığı deneylede, farklı kesme parametreleri denenmiştir. En iyi yüzey pürüzlülük ve en düşük kesme kuvveti değerlerinin SNMG 120408 NR4 WSM20 kesici takımlarla elde edildiği belirlenmiştir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artmasıyla ise kesme kuvvetlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Sarışık ve Özkan (2016) çalışmalarında, bilgisayar kontrollü makine (CNC) ile mermerlerin frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti ve spesifik enerjisi incelenmiştir. Sektörde yaygın olarak kullanılan 5 farklı mermer üzerinde yapılan çalışmada, parmak frezeli kesici takım (6.0 mm) ile farklı işleme türleri, 1.2, 1.6 ve 2.0 mm kesme derinliği (ve 2000, 2500 ve 3000 mm/dak ilerleme hızı parametreleri seçilmiştir. Yapılan frezeleme deneylelerinde F_z , F_c ve F_t kuvvet değerleri ile özgül enerji değerlerinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Mermerlerin kuvvet ve enerji değerleri açısından işleme türü, işlem derinliği ve ilerleme hızı arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar belirlenmiştir ($p < 0.001$). Sonuç olarak, çalışmada işleme türü, kesme derinliği ve ilerleme hızının mermerlerin işlenebilirliğini etkilediği sonucuna varılmıştır.

Sarışık ve Özkan (2017) çalışmalarında, mermerlerin CNC frezeleme makinesi ile frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Deneylede 7 farklı beyaz renkli mermer, 6.0 mm çapında parmak frezeli kesici uç, farklı kesme derinliği (1.2, 1.6 ve 2.0 mm) ve farklı ilerleme hızı (2000, 2500 ve 3000 mm/dk) parametreleri kullanılmıştır. Teğetsel kesme kuvveti (F_t), radyal kesme kuvveti (F_c) ve spesifik kesme enerji değerlerinin istatistiksel analizi ANOVA yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme kuvvetleri ve spesifik kesme enerjisi üzerindeki etkisi doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Kesme kuvveti ve spesifik kesme enerjisi değerlerinde kesme derinliği

ve ilerleme hızı arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir. Bu sonuçlar, mermerlerin işlenebilirliğinde kesme derinliği ve ilerleme hızının etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen verilerle, mermerlerin fiziko-mekanik özellikleri ve spesifik kesme enerjisi üzerinden CNC makinelerinin verimliliğini önceden tahmin etmek için regresyon denklemleri geliştirilmiştir.

Sarıışık ve Özkan (2018) çalışmalarında, doğal taşların işlenebilirliği üzerinde etkili olan kesme kuvvetleri (C_f), özgül enerji (S_e) ve özgül kesme enerjisi (S_c) gibi parametreler incelenmiştir. Toplamda 12 farklı doğal taş türü (7 mermer, 3 traverten, 2 kireçtaşı) jeolojik oluşumlarına göre sınıflandırılmış ve çeşitli karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur. Çalışma, doğal taşların işlenmesi sırasında kesme kuvvetlerinin deneysel olarak ölçülmesi, çeşitli kesme parametrelerinin hesaplanması ve istatistiksel analizlerden oluşmaktadır. Kesme derinliği ve ilerleme hızı, doğal taşların frezelemede önemli parametreler olarak tespit edilmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikler ile kesme kuvvetleri, özgül enerji ve özgül kesme enerjisi değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve belirlenen katsayı değeri (R^2) ≥ 0.821 olarak bulunmuştur. Doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri, kesme kuvvetleri ile özgül enerji ve özgül kesme enerjisi değerlerinin tahmininde önemli parametreler olarak ortaya çıkmıştır.

Özkan vd. (2023) çalışmalarında, beyaz mermerin işlenmesinde yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri ve parametreler incelenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak beş farklı mermer deneylerde kullanılmıştır. Optimal parametre seviyeleri ve etkileri belirlenmiş. Aksiyel derinlik birincil etkili parametre olarak görülürken, radyal derinlik ikincil etkili parametre olarak belirlenmiştir. Besleme hızının genel olarak etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ile mineral tane boyutu arasında anlamlı bir ilişki saptanmıştır. Tane boyutunun mermerlerin yüzey kalitesini etkilediği gözlenmiştir.

Özkan ve Öz (2020) çalışmalarında, bilgisayar sayısal kontrol (CNC) makinesinde kireçtaşlarının frezeleme işleminde üretim performansını ve ürün kalitesini artırmak için optimal parametre kombinasyonlarını araştırdı. Deneysel çalışmalar tortul kökenli dört farklı kireçtaşı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, CNC üzerinde 6 mm karbür kesici takımla Taguchi L9 dikdörtgensel dizi tasarımı kullanılarak yapılmıştır.

Kireçtaşlarının optimal işleme parametreleri için Taguchi yöntemi kullanılarak sinyal/gürültü (S/N) oranı belirlenmiş. Parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri varyans analizi kullanılarak belirlenmiş. Müşterilerin beğenisini kazanan yüzey özelliklerini belirlemek zaman alıcı ve maliyetli bulunmuş. Heterojen kireçtaşlarını frezelemek için optimal işleme parametrelerini seçmek için doğrulama testleri yapılmış. Üreticilere yeni araçlar üretmelerine ve operatörlere ürün kalitesini artırmalarına ve işleme maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olmak için karbür uç frezeleme kullanılarak optimal işleme parametreleri belirlenmiştir.

Özkan ve Öz (2021) çalışmalarında, mermer işlemede kesme parametrelerini bilgisayar kontrollü makine (CNC) temelli olarak belirlemek, ürün kalitesi açısından önemini vurgulamıştır. Bu çalışmanın amacı, mermerlerin CNC frezeleme işleminde ürün yüzey kalitesini artırmak için işleme parametrelerini seçmek için Taguchi deney tasarım yöntemini kullanmaktır. Deneyler altı metamorfik kaya üzerinde 6 mm çaplı kesici uç ile gerçekleştirildi. Deneyler, Taguchi deney tasarım yöntemi (L9 dikdörtgensel dizi) kullanılarak yapılmıştır. "Daha düşük olan daha iyidir" yaklaşımına dayalı S/N (sinyal/gürültü) oranı, uygun işleme parametrelerini belirlemek için her mermer örneği için ayrı ayrı hesaplanmıştır. En düşük pürüzlülük değerine bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı ve etkili işleme parametreleri varyans analizi kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, derinlik ve besleme hızı parametrelerinin mermer işlemede yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Özkan ve Öz (2023) çalışmalarında, Limra kireçtaşı numunelerinin CNC makinesi ile işlenmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi için uygun işleme parametrelerinin Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak belirlendiği bir araştırmadır. Ticari adı Finike Limra olan doğaltaş üzerinde 6 mm çapında karbür kesici uç kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, işleme parametreleri belirlenmiştir. Yapılan deneylerde, işleme parametrelerinin etkileri değerlendirilmiş ve en küçük yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşılan optimal parametreler tespit edilmiştir. İstatistiksel analizler sonucunda, kesme derinliği ve kesme hızının yüzey işlemede önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.

Yuvaraj ve Suresh (2019) Bu çalışmalarında, Inconel 718 malzemesi bir iş parçası olarak ele alınmış ve iş parçasını işlemek için L18 dikdörtgenel dizi (OA) deneysel planı kullanılmıştır. EDM performans karakteristiklerini etkileyen etkili faktörler, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir. Gri-Taguchi tekniğinin ideal çözüme benzerlik sırasına göre tercih sırası için TOPSIS yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar çok fazla değildir, ancak bu yöntemler çoklu amaçlı optimizasyon için kolayca uygulanmıştır. Bu yöntemler, mevcut sınırlı verilerle en iyi sonuçları sağlamıştır. İşleme faktörlerinin en iyi kombinasyonu, gri-Taguchi ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan deneylere göre, voltaj (V) ve darbe kapatma süresi (t_{off}) çıkış performansına önemli katkıda bulunmuştur. Gri-Taguchi ile elde edilen en iyi giriş parametre kombinasyonu, geliştirilmiş yanıt için sırasıyla 10 A, 30 V, 200 μs ve 20 μs olup, EDM parametreleri için akım (I), V, darbe açma süresi (t_{on}) ve t_{off} 'tur. Ayrıca, performans ölçütleri olan işleme hızı (MR), takım aşınma hızı (TWR), fazla kesim (OC) ve konik fazla kesim (TOC) için en iyi parametre ayarı (I = 10 A, V = 30 V, $t_{on} = 100 \mu s$ ve $t_{off} = 20 \mu s$) TOPSIS yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, voltajı değiştirerek talaşlı aşınma davranışı taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile incelenmiştir.

Tuğral (2019) bu çalışmasında, CNC makinesi kullanılarak 6 farklı beyaz mermerde yapılan frezeleme işleminden sonra en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için kesme genişliği, ilerleme hızı ve kesme derinliği parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Optimal parametre düzeylerini belirlemek için S/N oranları 'daha küçük daha iyi' prensibiyle hesaplanmıştır. Varyans analizi (ANOVA) işleme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi doğrulamıştır. Ayrıca, doğaltaşların tane boyutları ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmaların sonuçlarına göre, farklı beyaz mermer türlerinde belirli işleme parametreleri kullanılarak en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Genel olarak, 1 mm derinlik en iyi sonucu vermiştir. Ancak Bursa Kemalpaşa Beyaz mermerde yapılan işlemde doku farklılığı nedeniyle sonuçlar etkilenmiştir. Kesme genişliği arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Bu durum, kesme genişliği ve kesme derinliğinin en önemli parametreler olduğunu göstermektedir.

Öz (2018) bu çalışmasında, doğaltaşların CNC frezeleme işlemlerinde minimum yüzey pürüzlülüğüne ulaşmak için kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi işleme parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi deney tasarımı yöntemini kullanmaktadır. 14 farklı doğaltaş üzerinde yapılan frezeleme işlemleri, Taguchi deney tasarımı yöntemi olan L9 ortogonal dizisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimal işleme parametrelerini belirlemek için her doğaltaş için "daha küçük olan daha iyi" prensibine dayalı S/N oranları hesaplanmıştır. Varyans analizi (ANOVA), korelasyon ve regresyon analizi, işleme parametrelerinin ve doğaltaşların petrografik ve fiziko-mekanik özelliklerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanılmıştır. Araştırmanın sonuçları, kesme derinliğinin en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Petrografik özellikler göz önüne alındığında, özellikle kayaların ortalama tane boyutunun yüzey pürüzlülüğünde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Tien vd. (2020) bu çalışmalarında, Al6061'in uç frezeleme işlemi sırasında kesme parametrelerinin ve freze helisel açısının optimum belirlenmesine yönelik bir optimizasyon çalışmasını göstermektedir. Bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme hızı, radial kesme derinliği ve freze helisel açısı da dahil olmak üzere frezeleme işlemi parametrelerinin ve takım geometrisinin etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bu faktörlerin optimum kesme parametreleri ve helisel açı üzerindeki etkilerini tahmin etmek için bir simülasyon deneyi, bir bilgisayar programı aracılığıyla tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Optimum kesme hızı, ilerleme hızı, radial kesme derinliği ve freze helisel açısını hesaplamak için bir regresyon denklemi önerilmiştir. Parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO), işleme sürecini etkileyen faktörlerin deneysel ilişkilerinden belirlenen sınırlayıcı koşulları dikkate alarak optimal parametreleri elde etmek için önerilmiştir.

Gyurika ve Szalay (2019) çalışmalarında; değişken kesme hızının granit malzemeleri frezeleme sırasında iş parçası kenarlarına olan etkisini incelemiştirlerdir. Araştırma için beş granit levha üzerinde beş farklı ortalama tane büyüklüğünde örnek yüzeyler oluşturulmuştur ve beş kesme hızı değeri kullanılmıştır. Daha sonra ortalama yüzey pürüzlülüğündeki ve ortalama kenar çipteki değişiklikler incelenmiştir. Araştırma sonuçlarından, kesme hızında bir artış olması durumunda ortalama kenar çipte oranının

bir sınıra hıza ulaşana kadar azalacağı sonucuna varılabilir. Daha yüksek bir kesme hızı durumunda, referans eğilimin belirlenemeyeceği görülebilir. Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen istatistik analiz, değişken kesme hızı uygulandığında, örnek yüzey kenarının kalitesindeki değişimin ortalama yüzey pürüzlülüğü gelişim eğilimlerinden çıkarılabileceği sonucuna varılmıştır.

Cserta ve Gyurika (2021) çalışmalarında; deneylerde üç farklı granit örneğinin yüzeyinde farklı kesme hızlarına sahip altı yüzey incelenmiştir. Çeşitli minerallerin rengi ışık mikroskopisi kullanılarak belirlendi ve bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını difraktometresi (XRD) örneklerin kompozisyonunu analiz etmek için kullanılmış ve bir konfokal mikroskop her mineralin yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılmıştır. Araştırmaların sonuçlarına göre, granit oluşturan mineraller ile yüzey pürüzlülüğü arasında farklı ilişkiler görüldüğü belirtilmiştir. Bu çalışmada alan tabanlı yüzey pürüzlülüğü kullanıldı çünkü daha doğru veriler sağlamış. Sonuçlardan, farklı yüzey oluşturan minerallerin pürüzlülüğünün büyük ölçüde değiştiğini ve bu da yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerine neden olduğu belirtilmiştir.

Gyurika (2018) çalışmasında; örnek granit yüzeylerin kenarlarındaki çatlakları ve hasarları incelemiştir. Bu makalede incelenen çatkalkar ve hasarlar, frezeleme işlemlerinden kaynaklanmış olup, bu şekildeki işlemler farklı ilerleme hızı hızları ve çeşitli elmas tane boyutları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu makalenin kapsamı içinde, deneylerin sonuçları, kenar çatlaklarının en aza indirilmesiyle ilgili öneriler oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, frezeleme araçlarının segmentlerindeki elmas tanelerinin ortalaması ve uygulanan ilerleme hızının azaltılmasının kenar çatlama hızının büyüklüğünü açıkça etkilediğini göstermektedir.

Zhu vd. (2020) çalışmalarında; elmas kesici takımların taş-plastik kompozitin işlenmesinde kullanımına bilimsel rehberlik sağlamak amacıyla, taş-plastik kompozitin helisel frezeleme sırasında kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkilerinin sonuçlarını sunmaktadır. Helisel açı, mil hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi dört faktör, yanıt yüzey yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Matematiksel modeller geliştirilmiş ve doğrulama testleriyle tanımlanmıştır. Bu sayede kompozit helisel

frezeleme sırasındaki kesme kuvvetleri ve sıcaklık değişimlerini doğru şekilde tahmin etmek mümkün hale gelmiştir. Ardından, her faktörün ve iki faktör arasındaki etkileşimlerin anlamlı katkıları varyans analizi yoluyla belirlenmiş ve kesme kuvvetleri ile sıcaklık eğilimleri yanıt yüzey metodunu kullanarak incelenmiştir. Düşük kesme kuvvetleri ve sıcaklık açısından optimal koşullar, 70°'lik bir helisel açı, 51.3 m/s kesme hızı, diş başına 0.24 mm ilerleme ve 0.5 mm kesme derinliği olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, taş-plastik kompozit malzemenin endüstriyel üretiminde kullanılmak üzere önerilmektedir.

Wang vd. (2020) çalışmalarında, mermerin kaplamalı karbür bilyeli uçlu freze ile yüksek hızda frezeleme işlemi yapılmıştır. Tek faktörlü kesme testleri, freze parametrelerinin kesme kuvvetleri ve mermer talaşı üzerindeki etkisini araştırmak için tasarlanmıştır. Kesme kuvvetlerinin artan ilerleme hızı ile arttığı ve artan kesme hızı ile azaldığı bulunmuştur. Mermer talaşlarının morfolojisi ve parçacık büyüklüğü analiz edilmiştir. Frezeleme işleminde transgranüler kırılmanın baskın arıza modu olduğu bulunmuştur. Ayrıca, mermer talaşlarının parçacık büyüklüğünün artan ilerleme hızı ile arttığı ve artan kesme hızı ile azaldığı bulunmuştur. Kesme kuvvetleri ile talaş oluşumu arasında açık bir pozitif korelasyon olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaya malzemelerinin işlenmesinde malzeme giderme mekanizmasının ve kesme parametrelerinin seçimi konusunda daha iyi bir anlayış için önemli olduğu tespit edilmiştir.

Liu vd. (2020) çalışmalarında; yüzey topografyası, mikro frezeleme SiCp/Al kompozitlerinde yüzey bütünlüğünün önemli bir özelliği olup, iş parçasının performansını ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemiştir. Üç boyutlu yüzey pürüzlülüğü (Sq) ve fraktal boyut (Ds) ile değerlendirilmiştir. Tek faktör deneyi ve doğrusal deney temel alındı, işlem parametrelerinin (diş başına besleme, mil hızı, frezeleme derinliği ve frezeleme genişliği) yüzey topografyası üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, Sq'nun başlıca frezeleme genişliği ve frezeleme derinliği tarafından etkilendiğini ve minimum Sq için en uygun sonuçların: $a_e = 1.5$ mm, $a_p = 0.08$ mm, $n = 12000$ dev/dak ve $f_z = 1$ μ m/z olduğunu göstermiştir. Ds ise başlıca frezeleme genişliği tarafından etkilenmekte olup, maksimum Ds için en uygun

parametrelerin: $a_e = 1$ mm, $n = 14000$ dev/dak, $f_z = 1.5$ $\mu\text{m}/z$ ve $a_p = 0.12$ mm olduğu görülmüştür. S_q ve D_s arasında zayıf negatif bir korelasyon bulunmaktadır. Ayrıca, D_s , ana kusurlara daha duyarlıdır ve genel olarak büyük bir D_s , iyi bir yüzeye karşılık gelmiştir.

Moayyedean vd. (2020) çalışmalarında; Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak frezeleme işleminde Hardox 600 (yüksek aşınma direncine sahip sert ve dayanıklı çelik ve 600 HBW sertliğine sahip) yüzey pürüzlülüğü üzerinde farklı işleme parametrelerinin etkisini değerlendirmiştir. Seçilen işlem parametreleri, besleme hızı, mil hızı, kesme derinliği ve radial batmadır. Parametrelerin sayısı ve seviyeleri L9 olduğundan, Taguchi'nin ortogonal bir dizisi seçilmiştir. Dokuz deney için yüzey pürüzlülüğü verileri toplanmış. İdeal seviyeyi ve her parametrenin katkı yüzdesini belirlemek için Sinyal-Gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi hesaplaması yapılmıştır. Dahası, S/N oranının tahmin edilen değerini belirlemek için matematik model oluşturulmuş ve matematik modeli doğrulamak için deneyler uygulanmıştır. Matematiksel model ve deneysel sonuç arasındaki hata marjının, işleme sürecini etkileyen kontrol edilemeyen parametrelerden kaynaklanan %5,5 olduğu bulunmuş. Yüksek sertliğe sahip çelik (Hardox 600) frezeleme prosedüründe radial batmanın, katkısının %45,33 ile en önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğü çoğunlukla radial batma (D) tarafından etkilenmiş, bunu sırasıyla kesme derinliği (C), mil hızı (B) ve besleme hızı (A) izlemiştir. Seçilen parametrelerin en düşük yüzey pürüzlülük değeri için en uygun seviyesi, radial batma seviye 1, kesme derinliği seviye 1, mil hızı seviye 2 ve besleme hızı seviye 2' olarak tespit edilmiştir.

Othman vd. (2020) çalışmalarında; hipereutectic Al-Si alaşımlarının işlenebilirliğini inceleyerek yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrünü etkileyen işleme parametrelerini araştırmayı amaçlamışlardır. Araştırmada, kuru kesim koşulları altında DLC kaplı yüz freze kesicisi kullanılarak 250 m/dak ve 350 m/dak kesme hızları, 0.02 mm/diş ve 0.04 mm/diş besleme hızları ile 0.3 mm sabit kesme derinliği gibi işleme parametreleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için dik tam faktöriyel (2^3) yöntemi kullanılmıştır. Analizler için ticari Minitab 17 yazılımı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) ve matematiksel öngörü modelleri oluşturulmuştur. Sonuçlar, 0.140 μm 'ye kadar düşük

yüzey pürüzlülüğü ve 105,47 dakika ile en uzun takım ömrü değerlerinin elde edildiğini göstermişlerdir.

Metal frezeleme işlemi sırasında genellikle farklı alaşımlar kullanılır. Bu alaşımların kullanılacağı sektöre göre işleme parametreleri, makineler ve kullanılan araçlar değişiklik gösterir. Frezeleme ve tornalama ile üretilen nihai ürünler endüstride farklı alanlarda kullanılır. Kullanıldıkları alanda uygun değilse, alaşım ve parça işleme parametreleri üzerinde değişiklikler yapılabilir. Ancak, doğal taşlar doğada bulunduğu haliyle kullanıldığından yapısında değişiklik mümkün olmamaktadır. Metal frezelemede uygulanan işleme parametrelerinin doğal taşta referans olarak kullanılması, farklı işleme yöntemleri, araç tipleri ve makine tipleri nedeniyle mümkün değildir. Her oaktan çıkarılan doğal taşın özellikleri açısından birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle, mermerlerde aynı parametrelerin kullanılması takım aşınmasına ve kırılmasına neden olur. Çalışmada, üretimde kalite, tasarım, geliştirme ve verimlilik için belirlenen koşullar altında optimum kesme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi

Bu tez çalışmasında, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Doğal Taş Sektöründe Bilgisayar Kontrollü Makineler (CNC) ile Yeni Ürün Geliştirme ve Tasarımı Eğitimi Birimi laboratuvarında yer alan Megatron Marka 4 Eksenli Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi kullanılmıştır. İşleme Makinesine ait görsel Resim 3.1' de, teknik özellikleri Çizelge 3.1' de, verilmiştir.



Resim 3.1 Doğal taş dikey işleme makinesi.

Çizelge 3.1 Doğal Taş Dikey İşleme Makinesi teknik özellikleri (Öz 2018, Tuğral 2019).

Teknik özellikler	Değerler
Spindle motor	9 kw
Eksen sayısı	4 adet
Motorun devri	24000 rpm
İşleme Alanı Ölçüleri	2000x3000x600 mm
Soğutma suyu	3 l/dk

3.2 Elektrolize Kaplamalı Elmas Freze Takımı

Doğal taş dikey işleme makinesinde işlenebilirlik deneyleri için elektrolize yöntemi ile elmasların metal gövde üzerine kaplanmış freze takım kullanılmıştır. Çalışma için kullanılan freze takımının görseli, Resim 3.2’de, teknik özellikleri de Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Elektrolize kaplamalı elmas freze takımını.

Çizelge 3.2 Elektrolize kaplamalı elmas freze takım teknik özellikleri.

Teknik özellikler	Değerler
Takım uzunluğu	60 mm
Elmas kaplı kısmın uzunluğu	20 mm
Takım çapı	6 mm
Elmas tane boyutu	602 μ m

3.3 Çalışmalarda Kullanılan Doğal Taşlar

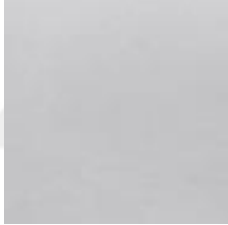
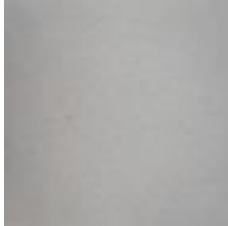
Deney numunesi olarak, uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen Bursa ili ve Marmara adasındaki ocaklardan çıkarılan metamorfik kökenli gerçek mermerler kullanılmıştır. Bu numuneler mermer fabrikalarından 300x300x20 mm boyutlarında kesilmiş olarak temin edilmiştir. Numunelerin fiziko-mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de, petrografik özellikleri Çizelge 3.4’de, X-Ray fluorescence (XRF) metoduyla

incelenen kimyasal yapısı Çizelge 3.5’de verilmiştir. Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermere ait ince kesit görüntüleri Resim 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Numunelerin fiziko-mekanik özellikleri.

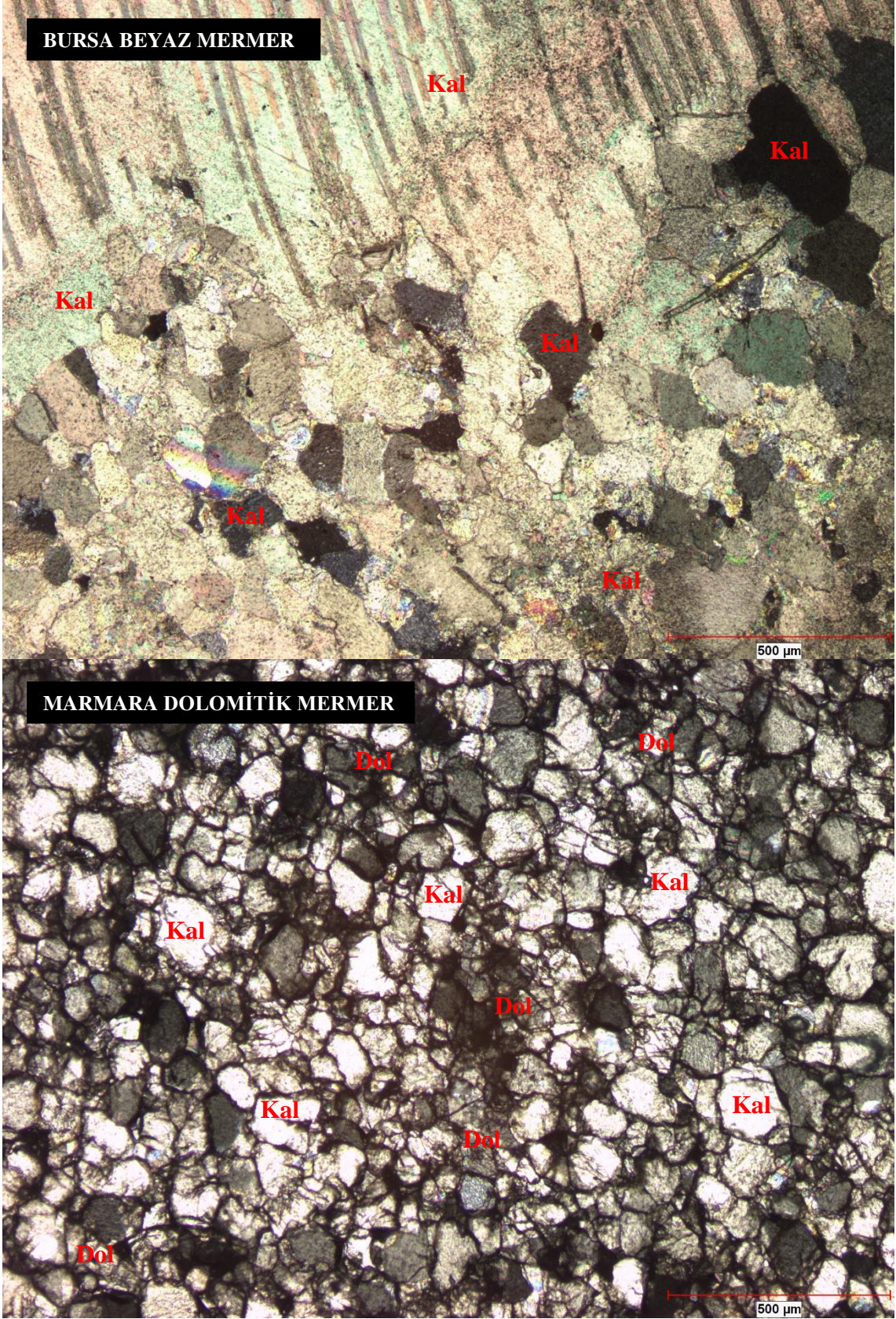
	Porozite (%)	Yoğunluk (kg/m³)	Su emme (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Aşınma Direnci (mm)
Bursa Beyaz Mermer	0,4	2828	0,1	82	13,5	19,4
Marmara Dolomitik Mermer	0,2	2757	0,1	71	10,7	18,1

Çizelge 3.4 Numunelerin petrografik özellikleri.

Numuneler	Numune Yüzey Görselleri	Doku	Tane Genişlikleri		
			Minimum	Maksimum	Ortalama
Bursa Beyaz Mermer		Granoblastik	6,1	1022,1	127,3
Marmara Dolomitik Mermer		Kristalin	21,4	150,7	92,1

Çizelge 3.5 Numunelerin X-Ray fluorescence (XRF) analiz sonuçları.

	Na2O (%)	MgO (%)	Al2O3 (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	SO3 (%)	K2O (%)	CaO (%)	Fe2O3 (%)	SrO (%)
Bursa Beyaz Mermer	0,026	1,428	0,194	0,211	0,019	0,021	0,011	97,953	0,093	0,044
Marmara Dolomitik Mermer	0,024	26,563	0,095	0,269	0,021	0,017	0,011	72,920	0,039	0,041



Resim 3.3 Bursa Beyaz Mermer ve Marmara Dolomitik Mermer ince kesit görüntüleri (Kal=Kalsit mineralleri, Dol=Dolomit mineralleri).

3.4 Taguchi Yöntemi

Taguchi deney tasarımı, deneysel çalışmalara harcanacak zaman ve maliyeti azaltırken, ürün kalitesinin iyileştirilmesinde etkili bir yaklaşımdır. Bu yöntem, tam faktöriyel deney tasarımına kıyasla, daha az sayıda deney gerçekleştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Taguchi yöntemi, istatistiksel bir tekniktir ve önceden belirlenmiş ortogonal dizinler kullanır. Tam faktöriyel deney tasarımında tüm kombinasyonların denendiği duruma kıyasla, Taguchi yönteminde sadece seçilen ortogonal dizinlerdeki deneyler gerçekleştirilir. Bu sayede, deney sayısı önemli ölçüde azaltılır.

Ortogonal dizinler, faktörleri ve seviyelerini gösteren sayı matrisleridir. Her sütun, seçilen faktörleri temsil ederken, her satır ise bu faktörlerin seviyelerini ifade eder. Bu özel tasarımı dizinler sayesinde, daha az sayıda deney ile faktör etkilerinin ve etkileşimlerinin tahmin edilmesi mümkün olmaktadır.

Literatürde yaygın olarak kullanılan Taguchi deney tasarımında, ortogonal dizinler faktör seviyeleri durumuna göre çeşitlilik göstermektedir. Ortogonal dizinlerin adlandırılmasında, "L" harfi dizinin ortogonal olduğunu, bitişikteki rakam ise o dizinin öngördüğü deney sayısını temsil etmektedir. Örneğin, L16 dizisi 16 deney içeren bir ortogonal dizini ifade eder.

Bu çeşitli ortogonal dizinler, faktör sayısı ve seviye sayısına bağlı olarak, Çizelge 3.6'de sunulmuştur. Bu tabloda, kullanılabilir uygun ortogonal dizinler görülmektedir.

Çizelge 3.6 Ortogonal dizin tablosu (Hamzaçebi 2020).

Ortogonal Dizi	Deney Sayısı	Faktör Sayısı	Seviyelerdeki Maksimum Faktör Sayısı			
			Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-

Çizelge 3.6 (Devam) Ortogonal dizin tablosu (Hamzaçebi 2020).

Ortogonal Dizi	Deney Sayısı	Faktör Sayısı	Seviyelerdeki Maksimum Faktör Sayısı			
			Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
L16	16	15	15	-	-	-
L16'	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L32'	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L36'	36	16	3	13	-	-
...

Taguchi deney tasarımında, performans kriteri olarak sinyal/gürültü (S/N) oranı kullanılmaktadır. Bu oran, ölçülen değer (sinyal) istenmeyen faktörlerden (gürültü) kaynaklanan etkilerini azaltmaya yönelik bir istatistiksel ölçüttür. S/N oranı, ölçülen sinyalin (S) gürültü faktörüne (N) oranıdır ve dB (desibel) birimi ile ifade edilir. Gürültü faktörleri, üretim sırasında kontrol edilemeyen ancak deney sırasında kontrol edilebilen faktörlerdir. Sinyal faktörleri ise ayarlanabilen veya kontrol edilen faktörlerdir.

Taguchi yönteminin iki temel amacı; ürün karakteristiklerini hedef değerlere yaklaştırmak ve değişkenliği/sapmayı en aza indirmektir. Bu amaçlara bağlı olarak, üç farklı S/N oranı fonksiyonu kullanılmaktadır:

- En küçük en iyi (Smaller-the-better): Ölçüm değerindeki küçülme ile iyileşmenin arttığı fonksiyon tipidir. İdeal değer 0'dır ve sapma pozitif yöndedir.
- En büyük en iyi (Larger-the-better): Ölçüm değerindeki artış ile iyileşmenin arttığı fonksiyon tipidir. İdeal değer sonsuz, sapma ise negatif yöndedir.
- Nominal en iyi (Nominal-the-best): Ölçüm değerinin hedef değere yaklaşması ile iyileşmenin arttığı fonksiyon tipidir. İdeal değer hedef değerdir ve sapma pozitif veya negatif yönde olabilir.

Bu S/N oranı en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplama formülleri, Eşitlik 3.1’de verilmektedir.

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \log[yi^2/n] \quad (3.1)$$

Bu çalışmada çıktı parametreleri olan kuvvet değerleri, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin en düşük değerlerde olması istenmektedir. Buna göre uygun işleme parametre kombinasyonlarının belirlenmesi nedeniyle S/N oranının en küçük en iyi yaklaşımı uygulanacaktır (Taguchi vd 2005, Roy 2010, Mitra 2008).

3.5 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda, mermerlerin frezeleme deneyleri çizgisel işleme türü seçilerek modellenmiştir. CNC doğal taş işleme makinesinde, farklı seviyelerdeki kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerine göre mermerlerin frezeleme deneyleri Taguchi deney tasarımı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalar (Öz 2018, Tuğral 2019, Özkan ve Öz 2020,2021,2023, Özkan vd. 2023) dikkate alınarak kesme derinliği parametresi 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Sektördeki uygulamalarda elektrolize kaplamalı elmas takım çapının %40’ı oranında kesme genişliği parametresi uygulandığından bu çalışmada 6 mm takım çapının %40’ı olan 2,4 mm kesme genişliği sabit parametre olarak uygulanmıştır.

Bu çalışmalarda işlenen mermer numuneler için kullanılan işleme parametreleri Çizelge 3.7’de verilmiştir. Taguchi yöntemi uygulanarak oluşturulan L16 ortogonal dizim modeli ise Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Deney parametreleri.

Parametreler	Değerler
Kesme Hızı (m/dk)	113-151-188-226
İlerleme Hızı (mm/dk)	1500-2000-2500-3000
Kesme Derinliği (mm)	1
Kesme Genişliği (mm)	2,4

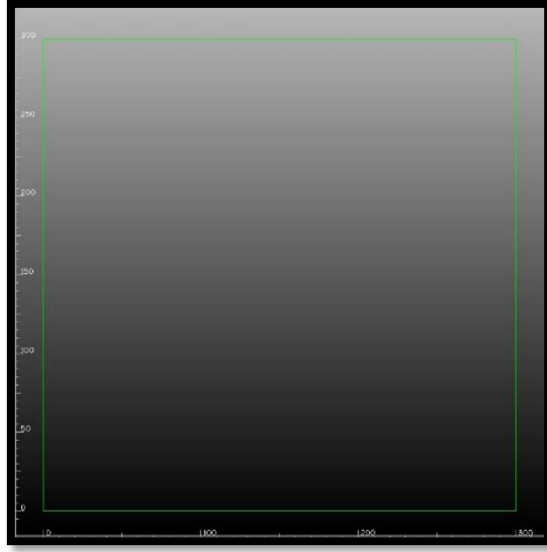
Çizelge 3.8 Taguchi yöntemi uygulanarak oluşturulan L16 ortogonal dizim modeli.

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)
1	113	1500
2	113	2000
3	113	2500
4	113	3000
5	151	1500
6	151	2000
7	151	2500
8	151	3000
9	188	1500
10	188	2000
11	188	2500
12	188	3000
13	226	1500
14	226	2000
15	226	2500
16	226	3000

Taguchi yöntemi uygulanarak oluşturulan L16 ortogonal dizim modellenmesi ve sayısal kontrol (NC) kodlarının oluşturulmasında AlphaCAM Stone yazılımı kullanılmıştır. AlphaCAM Stone yazılımında 300x300 mm numune boyutlarına göre çalışma alanı oluşturulur, bu çalışma alanı üzerinde L16 ortogonal dizimde belirlenen deney sırasıyla boşaltma alanları oluşturulur. Her bir boşaltma alanına ayrı ayrı belirlenen parametre ve seviyeler kullanılarak takım yolu ataması gerçekleştirilmiştir.

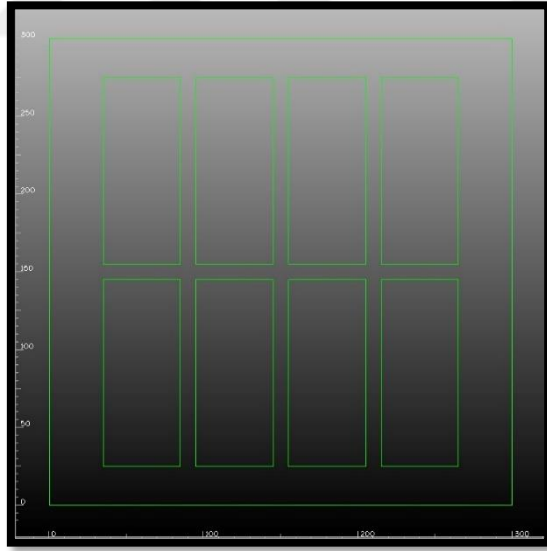
Çalışmada kullanılmak üzere fabrikadan alınan ebatlanmış numunelerin kalınlık ölçülerinde milimetrik farklar olmaktadır. Bu yüzden alınan ölçümlerde verilerin hassasiyetini arttırmak için deney çalışmaları öncesinde numune yüzeyinden 2 mm derinlikte tesviye işlemi yapılarak deney çalışmasına hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan numuneler AlphaCAM programında deney tasarımına göre modelleme işlemlerine başlanılmıştır. İlk olarak numune eni ve boyu 300x300 mm olan ölçülerde çalışma alanı oluşturulmuştur. Resim 3.4'te oluşturulan çalışma alanı gösterilmiştir.



Resim 3.4 Çalışma alanı.

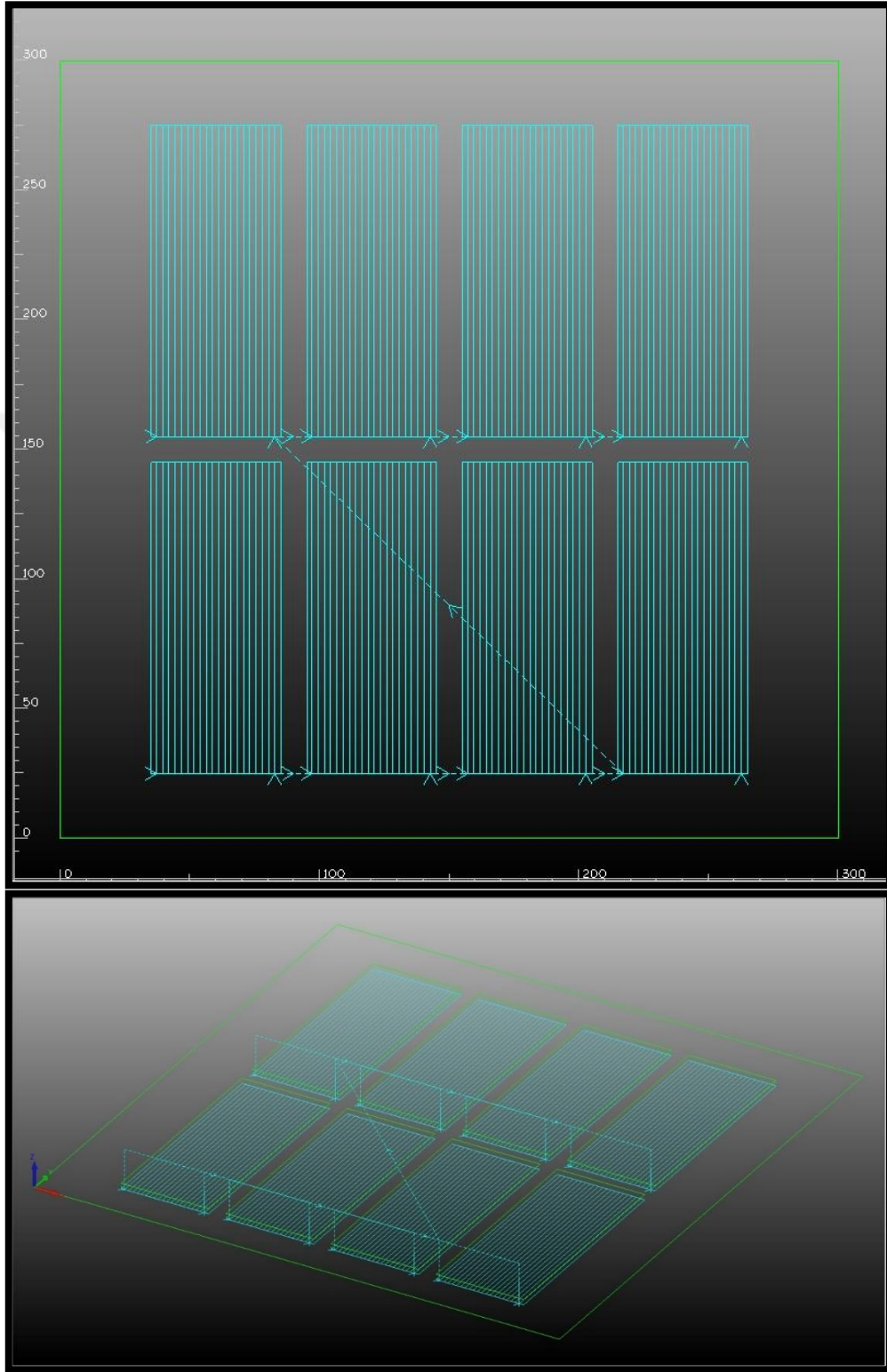
Çalışma alanı içerisine deney tasarımına göre 120 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde her bir numunede 8'er adet olacak şekilde toplam 16 adet dikdörtgenler hazırlanmıştır. Resim 3.5'de alanlar gösterilmiştir.



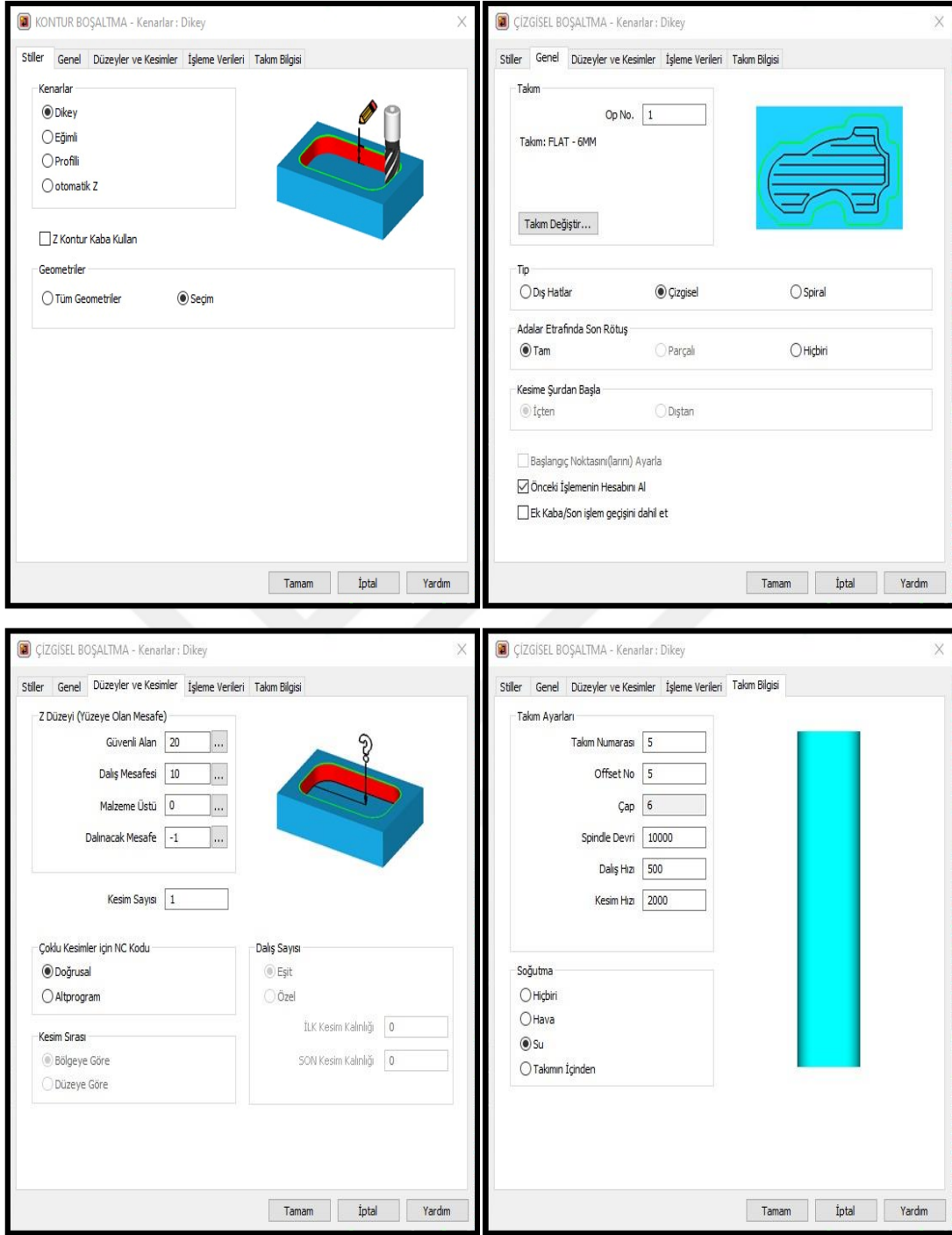
Resim 3.5 120x50 mm ölçülerindeki dikdörtgen alanlar.

Deneylerde kullanılan 6mm çapındaki elektrolize kaplamalı freze takım oluşturulan model üzerine tanımlanmıştır. Her bir dikdörtgen alanına deney tasarımdaki kesme hızı ve ilerleme hızı değerlerine göre ayrı ayrı takım yolu atamaları tanımlanmıştır. Resim 3.6'da takım yolu atamaları gösterilmiştir. AlphaCAM üzerinde örnek takım atama

aşamaları Resim 3.7'de gösterilmiştir.

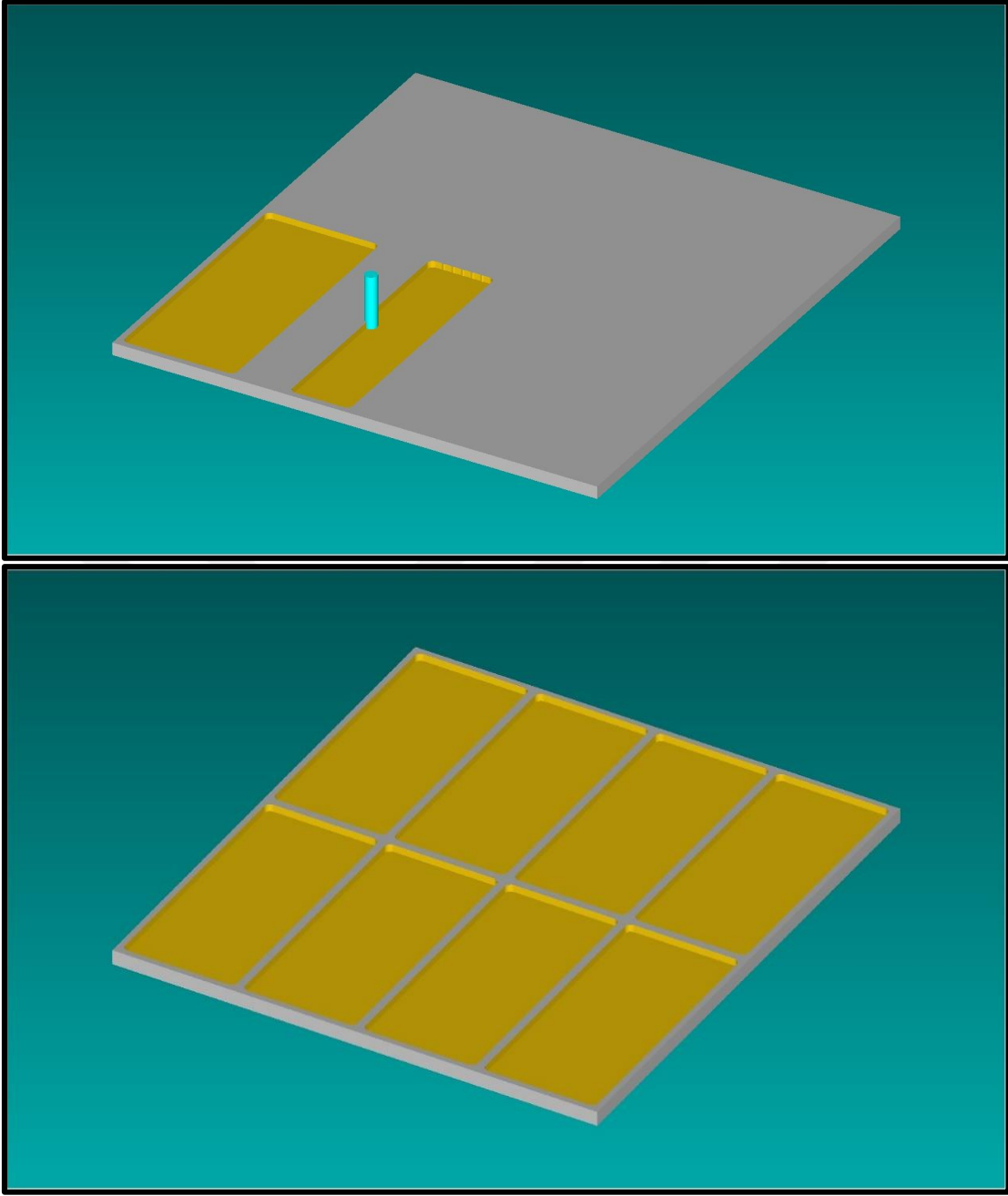


Resim 3.6 Takım yolu atamaları.



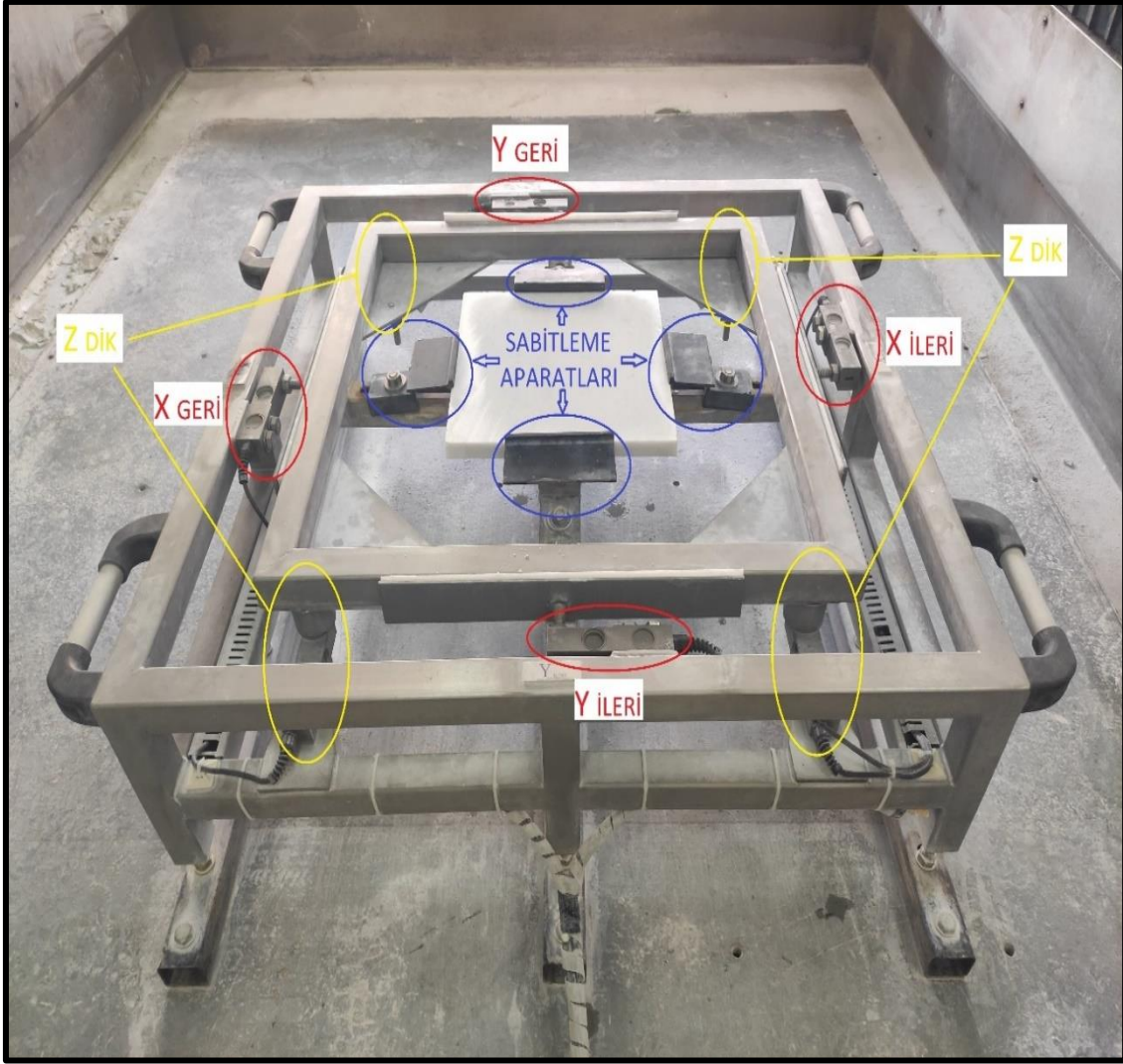
Resim 3.7 Örnek takım atama aşamaları.

Modellemenin tamamlanmasının ardından deney öncesi işlem aşamaları 3 boyutlu simülasyon ile görsel olarak kontrol edilmiştir. Simülasyon aşamaları Resim 3.8'de verilmiştir.



Resim 3.8 Simülasyon aşamaları.

Deney numunelerinin yerleştirildiği ve ölçümlerin alındığı CNC tezgâhı üzerinde bulunan sehpa AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. X eksenî yönünde (ileri-geri) 2 adet, Y eksenî yönünde (ileri-geri) 2 adet ve Z eksenî yönünde 4 adet kuvvet (Newton) değerini ölçebilen yük hücreleri bulunmaktadır. Numune sehpa üzerine 4 kenarından ayarlanabilir aparatlar ile sabitlenmiştir. Resim 3.9’da deney tezgâhı düzeneği gösterilmiştir.



Resim 3.9 Deneş tezgâhı düzeneği.

Yük hücrelerinden gelen veriler 0-2 mili volt arası sinyallerle transmitter vasıtasıyla 0-10 V sinyal aralığında çevrilerek önce cihazın analog girişine gelir ve oradan da PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)' ye aktarılır.

Analog girişinden gelen veriler Programlanabilir Mantıksal Denetleyici cihazı içindeki yazılım ile işlenir. Bu veriler ethernet bağlantısı üzerinden Defne Lab Soft yazılımına iletilir. Yazılım içerisindeki tüm ölçüm verileri Microsoft Excel programına tablolar halinde aktarılır ve kaydedilir.

PLC cihazı Resim 3.10'da, Defne Lab Soft yazılımının ekran görüntüsü de Resim 3.11'de verilmiştir.

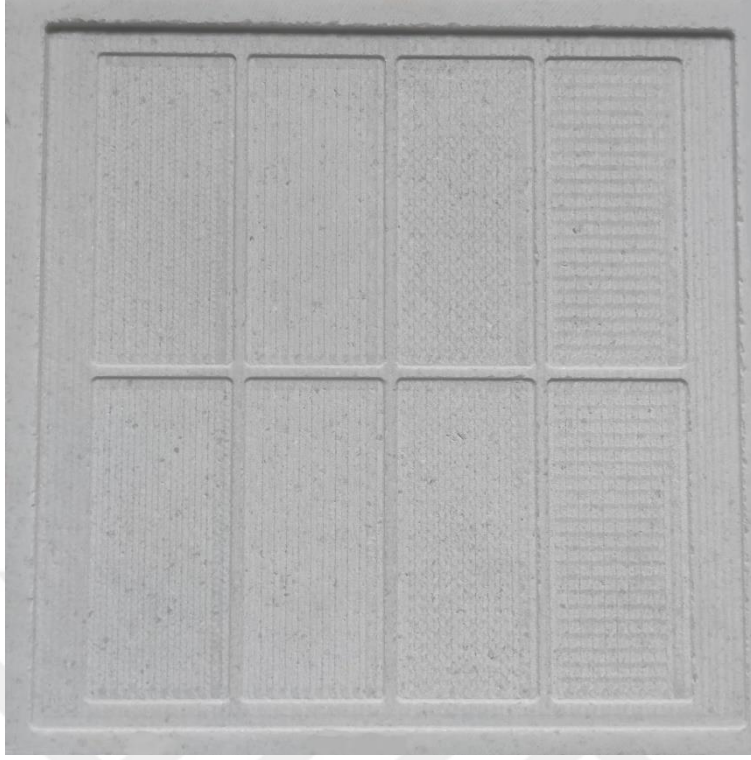


Resim 3.10 PLC cihazı.



Resim 3.11 Defne Lab Soft yazılımının ekran görüntüsü.

Deneylerde kullanılan Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin frezeleme işlemleri sonrasındaki nihai görünüşleri Resim 3.12 ve Resim 3.13'te verilmiştir.



Resim 3.12 Bursa Beyaz mermer numunesinin nihai görüntüsü.



Resim 3.13 Marmara Dolomitik mermer numunesinin nihai görüntüsü.

3.6 İstatistiksel Analizler

İşleme parametrelerinin çıktı faktörleri olan kuvvet değerleri, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğüne olan etki oranını tespit etmek için sırasıyla; serbestlik derecesi, farkların kareleri, kareler toplamı, kareler ortalaması ve % etkinlik oranı hesaplanarak bulunur. Varyans analiz hesaplama formülleri Çizelge 3.9’de verilmiştir. Farkların kareleri = (Ortalama Değer - S/N Oranı)² formülü ile hesaplanarak bulunur. S/N oranının hesabı sonucunda elde edilen rank ve delta tablosundan ortalama değer bulunur.

Çizelge 3.9 Varyans analiz tablosu.

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Hesaplama
Deneme	k-1	KT _{Deneme}	KO _{Deneme}	KO _{Deneme} / KO _{Hata}
Hata	N-k	KT _{Hata}	KO _{Hata}	
Genel	N-1	KT _{Genel}		

$$KT_{GENEL} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{T^2}{N} \quad (3.2)$$

$$KT_{GENEL} = \sum_{j=1}^k \frac{T_j^2}{n} - \frac{T^2}{N} \quad (3.3)$$

$$KT_{HATA} = KT_{GENEL} - KT_{DENEME} \quad (3.4)$$

$$KO_{DENEME} = KT_{DENEME} - sd_{DENEME} \quad (3.5)$$

$$KO_{HATA} = KT_{HATA} - sd_{HATA} \quad (3.6)$$

- N = Toplam gözlem sayısı
- T = Tüm gözlemlerin toplamı
- $Y_i = i$. Gözlem değeri
- sd = Serbestlik derecesi
- $T_j = j$ inci denemeye ait ortalama
- n = Deneme sayısı

F hipotezine göre yapılan varyans analizinde, F testi hangi faktörlerin etkili olduğunu gösterir.

Bu çalışmada hipotezler;

- H_0 : İşlem parametrelerinin çıktı faktörleri üzerinde etkisi yoktur.
- H_1 : İşlem parametrelerinin çıktı faktörleri üzerinde etkisi vardır.

Hipotezlerin doğruluğu Resim 3.14'teki karşılık gelen F değeri ile hesaplanan F değerleri karşılaştırılarak belirlenir. Hipotez doğruluğu %95 güven aralığında belirlenir.

Gruplar arası serbestlik derecesi 1 ve grup içi serbestlik derecesi 15 olan standart F değeri yani $F_{0,05;1;15}$ değeri 4,54'dır.

H_0 hipotezi %95 güven seviyesinde tabloda hesaplanan F değeri, $F_{0,05;1;15}=4,54$ değerinden büyük ($F_{0,05;1;15}=4,54 < F_{tablo}$) olduğu zaman reddedilir ve ilgili parametrelerin çıktı faktörlerinin oluşumunda etkisi olduğu kabul edilir. (Şenoğlu ve Acıtaş 2014, Taguchi vd 2005, Roy 2010, Mitra 2008)

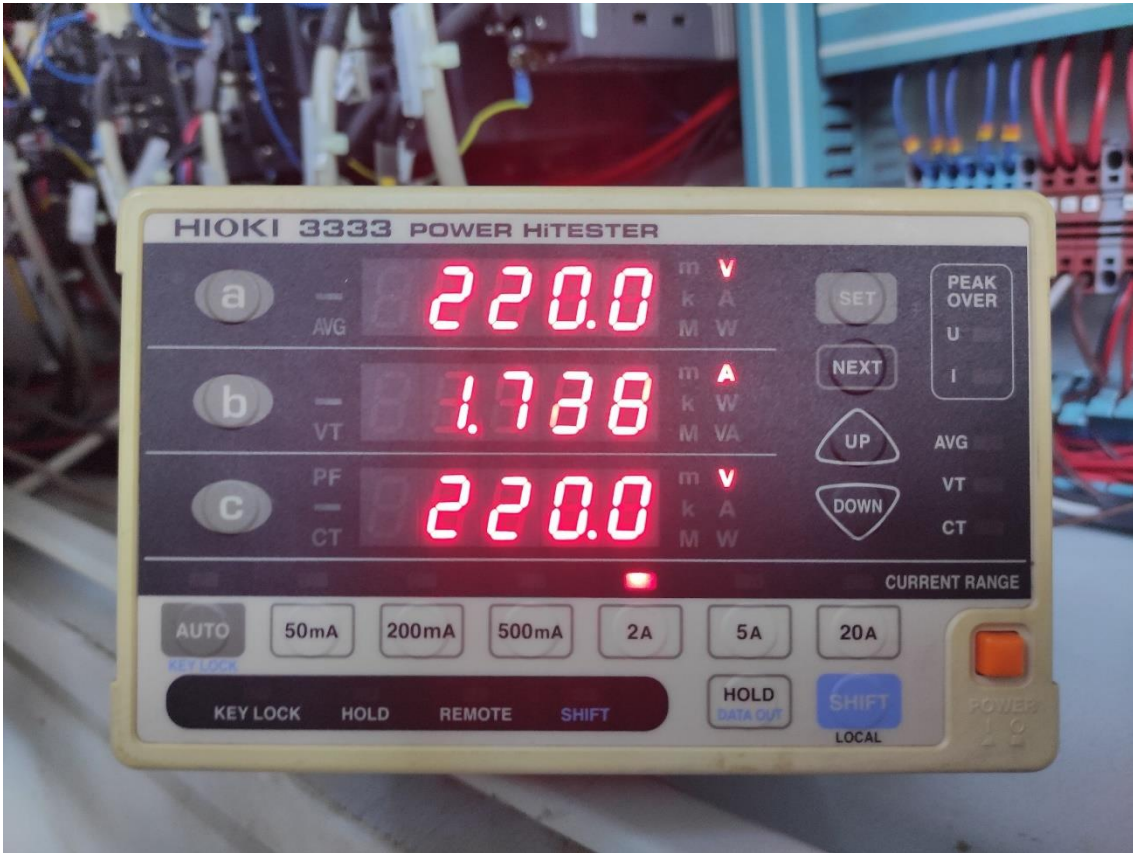
F Dağılımı için Tablo Değerleri: $\alpha = 0.05$

v_2	v_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16
31	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20	2.15
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14
33	4.14	3.28	2.89	2.66	2.50	2.39	2.30	2.23	2.18	2.13
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11
37	4.11	3.25	2.86	2.63	2.47	2.36	2.27	2.20	2.14	2.10
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09
39	4.09	3.24	2.85	2.61	2.46	2.34	2.26	2.19	2.13	2.08
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08
41	4.08	3.23	2.83	2.60	2.44	2.33	2.24	2.17	2.12	2.07
42	4.07	3.22	2.83	2.59	2.44	2.32	2.24	2.17	2.11	2.06
43	4.07	3.21	2.82	2.59	2.43	2.32	2.23	2.16	2.11	2.06
44	4.06	3.21	2.82	2.58	2.43	2.31	2.23	2.16	2.10	2.05
45	4.06	3.20	2.81	2.58	2.42	2.31	2.22	2.15	2.10	2.05
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93
150	3.90	3.06	2.66	2.43	2.27	2.16	2.07	2.00	1.94	1.89
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83

Resim 3.14 %95 güven aralığında F dağılımı için tablo değerleri (Şenoğlu ve Acıtaş 2014).

3.7 Özgül Enerji Ölçümleri

Çalışmada deney numunelerinin frezeleme süresince harcamış oldukları enerji miktarlarını ölçmek için Hioki Yüksek Hassasiyetli Güç Analizör cihazı kullanılmıştır. Cihaz görüntüsü Resim 3.15'te verilmiştir. Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin her birine tasarıma göre oluşturulan 16 adet farklı alanların frezeleme işlemleri için güç ölçümleri alınmıştır. Frezeleme işlemleri boyunca kesintisiz olarak ölçüm değerleri alınıp kaydedilmiştir.



Resim 3.15 Hioki yüksek hassasiyetli güç analizör cihazı.

3.8 Kuvvet Değeri Ölçümleri

Çalışmada deney numunelerinin frezeleme süresince X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen kuvvet (Newton) değerlerini ölçmek için sehpa (Resim 3.9) üzerinde yerleşik olarak bulunan yük hücreleri kullanılmıştır. Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin her birine tasarıma göre oluşturulan 16 adet farklı alanların frezeleme işlemleri için kuvvet (Newton) değerleri alınmıştır. Frezeleme

işlemleri boyunca Defne LabSOFT yazılımı kullanılarak kesintisiz olarak ölçüm değerleri alınmaktadır. Yazılım Microsoft Office programı ile entegre olarak çalışmakta olup, ölçülen tüm veriler Excel dosyası olarak kaydedilmiştir. Defne LabSOFT yazılımı örnek ölçüm görüntüsü Resim 3. ,16' da gösterilmiştir.

Tarih & Saat	X Sol Kurvort (µm)	X Gen Kurvort (µm)	Y Sol Kurvort (µm)	Y Gen Kurvort (µm)	Z Diğ. Kurvort (µm)	Mutlak X Ölçer (µm)	Mutlak Y Ölçer (µm)	Çıç Tüketim (mm)
19.20.28	07.45	-08.12	04.51	30.60	36.38	16.57	35.11	541.50
19.20.28	07.45	-08.12	-03.04	30.60	36.38	16.57	33.64	536.75
19.20.29	04.41	-06.08	04.51	29.22	30.40	10.49	33.73	541.50
19.20.29	05.98	-07.55	-03.04	27.75	29.42	13.53	30.79	541.50
19.20.29	05.98	-08.12	-03.04	30.60	33.44	15.1	33.64	541.50
19.20.29	04.41	-07.55	-03.04	27.75	36.38	11.96	30.79	541.50
19.20.29	07.45	-08.12	-01.57	30.60	36.38	16.57	32.17	536.75
19.20.29	05.98	-07.55	04.51	30.60	33.44	13.53	35.11	541.50
19.20.29	04.41	-07.55	-03.04	30.60	33.44	11.96	33.64	536.75
19.20.29	05.98	-07.55	-03.04	27.75	30.40	13.53	30.79	536.75
19.20.29	05.98	-08.12	-03.04	29.22	33.44	15.1	32.26	536.75
19.20.30	07.45	-07.55	-03.04	29.22	33.44	15	32.26	536.75
19.20.30	05.98	-06.08	-03.04	29.22	33.44	12.06	32.26	541.50
19.20.30	05.98	-08.12	-01.57	26.28	30.40	15.1	27.85	541.50
19.20.30	05.98	-08.12	-03.04	27.75	30.40	15.1	30.79	541.50
19.20.30	07.45	-08.12	-01.57	27.75	36.38	16.57	29.32	541.50
19.20.30	05.98	-08.12	-03.04	26.28	33.44	15.1	29.32	536.75
19.20.30	04.41	-07.55	04.51	23.34	33.44	11.96	27.85	536.75
19.20.30	02.94	-06.08	-03.04	26.28	30.40	5.02	29.32	541.50
19.20.30	05.98	-07.55	-01.57	26.28	33.44	13.53	27.85	541.50
19.20.30	05.98	-06.08	-01.57	27.75	30.40	12.06	29.32	541.50
19.20.30	05.98	-06.08	-03.04	30.60	33.44	12.06	33.64	536.75
19.20.30	05.98	-06.08	-03.04	29.22	33.44	16.57	32.26	541.50
19.20.30	04.41	-07.55	-03.04	29.22	30.42	11.96	32.26	541.50
19.20.30	05.98	-06.08	-01.57	29.22	33.44	12.06	30.79	541.50
19.20.30	07.45	-06.08	-01.57	29.22	36.38	13.53	30.79	541.50
19.20.30	05.98	-07.55	-01.57	29.22	33.44	13.53	30.79	536.75
19.20.30	05.98	-08.12	-03.04	30.60	33.44	15.1	33.64	527.25
19.20.30	05.98	-08.12	-01.57	30.60	36.38	15.1	32.17	522.50
19.20.30	04.41	-08.12	-01.57	30.60	30.40	13.53	32.17	522.50
19.20.30	05.98	-08.12	-03.04	29.22	36.38	15.1	32.26	522.50
19.20.30	04.41	-08.12	-03.04	29.22	33.44	13.53	32.26	517.75
19.20.30	04.41	-08.12	-03.04	29.22	33.44	13.53	32.26	522.50
19.20.30	05.98	-08.12	-01.57	33.54	30.40	15.1	35.11	522.50
19.20.30	04.41	-06.08	-03.04	32.07	33.44	10.49	35.11	522.50

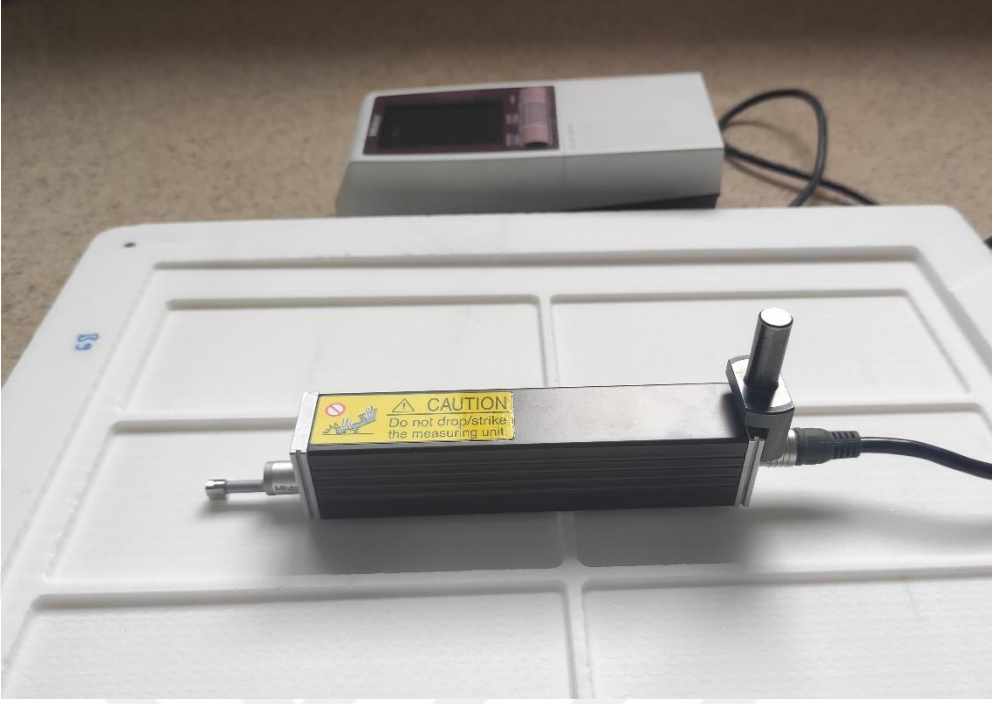
Resim 3.16 Defne LabSOFT yazılımı örnek ölçüm görüntüsü.

3.9 Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüklerini ölçmek için ISO 1997 standardına göre çalışan Mitutoyo SJ-210 model (Resim 3.17) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Taguchi deney tasarımının L16 ortogonal dizimi sonucu ortaya çıkan 16 farklı yüzey için yüzey pürüzlülüğü ölçümleri alınmıştır. Numunelerin yüzey ölçümleri her bir alan için 15 adet Ra yüzey pürüzlülük değerleri dikkate alınarak numune yüzeylerinden toplam 240 adet ölçüm elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülük cihazı, işlem yapılan yüzey üzerine yerleştirilen sürücü ünitesine bağlı dedektörün içinde bir motor vasıtasıyla hareket eden elmas iğne uç ile yatay eksen üzerinde belirli bir mesafe yol olarak ölçüm yapar.



Resim 3.17 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile örnek ölçüm.

4. BULGULAR

Bu araştırmada, kalsiyum karbonat kökenli bazı mermerlerin elektrolize kaplamalı elmas freze işlenebilirlik deneyleri farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin Taguchi deney tasarım yöntemiyle elde edilen veriler işığında, Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin frezeleme deneylerde kullanılan işlem parametrelerin çıktı faktörleri (X, Y ve Z eksenleri kuvvet değerleri, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğü) arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu ıktı faktörleri işleme parametrelerinin değerlendirilmesinde oldukça önemlidir.

Genellikle, Taguchi deney tasarımı, tam faktöriyel deney tasarımına göre daha az deney sayısı gerektirmektedir. Ancak, parametre ve seviye sayısı düşük olduğunda, Taguchi deney tasarımında da tam faktöriyel deney sayısı ile aynı sayıda deney yapılabilir. Tam faktöriyel deney tasarımında 2 parametre ve 4 seviye için $4^2 = 16$ adet deney içerirken Taguchi deney tasarımında ise kullanılan L16 (4^2) ortogonal dizinde 16 deney içermektedir. Bu çalışmadaki parametre sayısı az olduğundan deney sayısı, Taguchi deney tasarımı ile tam faktöriyel deney tasarımı aynı çıkmıştır. Çok sayıda parametre olduğu durumlarda Taguchi deney tasarımı avantajlı olmaktadır. Taguchi yönteminde uygulanan sinyal/gürültü (S/N) oranı analizi ürün veya süreci optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Taguchi'nin varyans analizi elde edilen sonuçların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını doğrular. Varyans analizi, girdi parametrelerinden (kesme hızı ve ilerleme hızı) hangi parametrelerin daha etkili olduğunu ve optimum parametre seviyelerinin neler olduğunu belirlemek için kullanılır (Taguchi ve Phadke 1984, Taguchi vd 2005, Roy 2010, Mitra 2008, Hamzaçebi 2020).

Bu çalışmada esas olarak, elde edilen sonuçların istatistiksel anlamlılığını doğrularak optimum işleme koşullarını belirlenmesinde Taguchi'nin varyans analizi kullanılmıştır.

Kuvvet değerleri, özgül enerji ve Yüzey pürüzlülüğü endüstriyel uygulamalarda en düşük düzeyde olması istenmektedir. Taguchi yönteminin istatistiki analizi yöntemi olan S/N oranı analizleri (en küçük en iyi formlzasyonu) yapılarak en uygun parametre kombinasyonu elde edilir.

Ayrıca varyans analizi ile çıktı faktörleri değerlendirilerek kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin frezeleme işleminde ne kadar etkin olduğu tespit edilir.

4.1 Bursa Beyaz Mermer İçin S/N Analizi

Bursa Beyaz mermer için deney tasarımına göre çıktı faktörlerinin değerleri ve S/N oranı analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

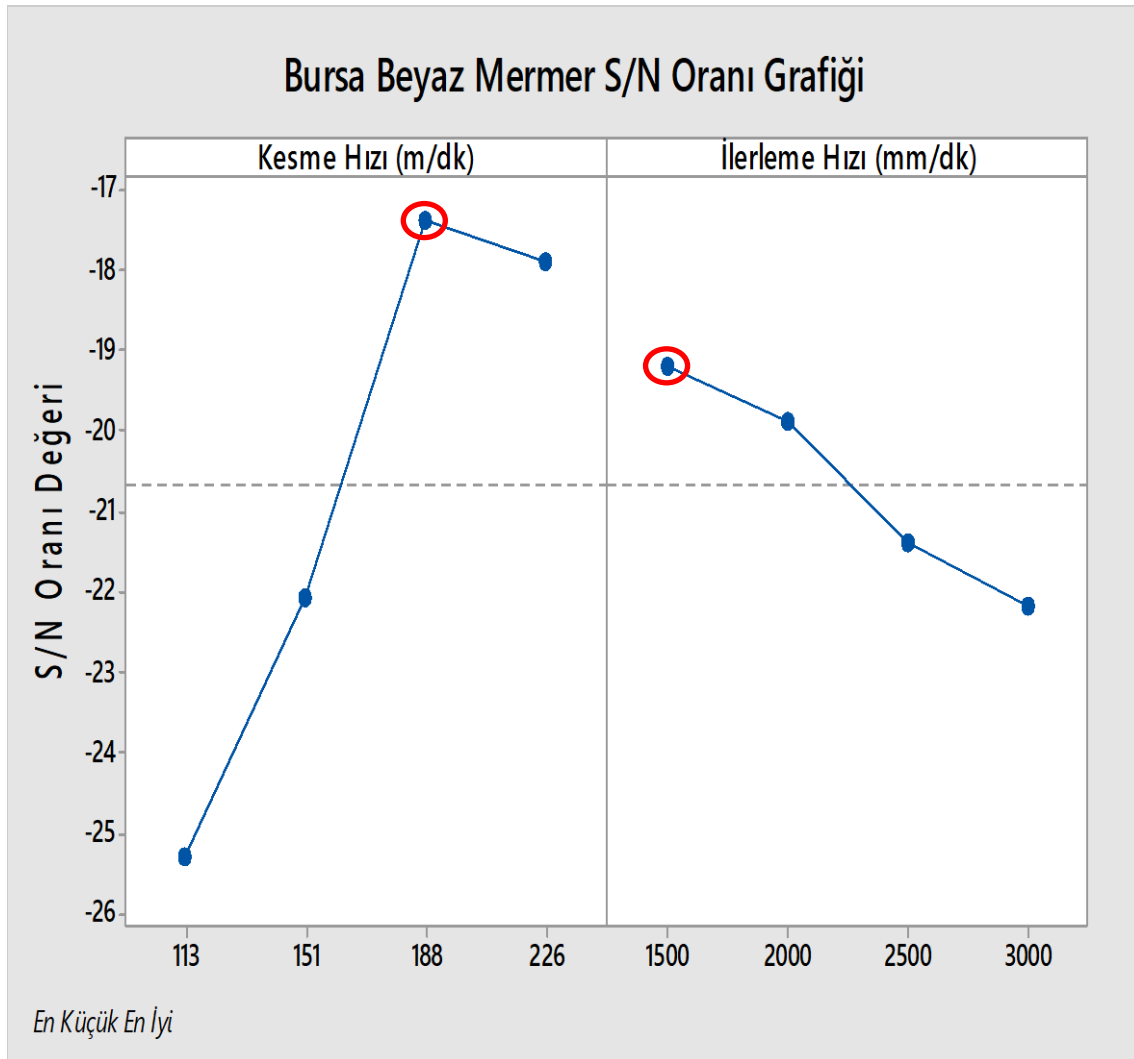
Çizelge 4.1 Analiz sonuçları (Bursa Beyaz mermer).

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Z Ekseni Kuvvet Değeri (N)	X Ekseni Kuvvet Değeri (N)	Y Ekseni Kuvvet Değeri (N)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Özgül Enerji (J/mm ³)	S/N Oranı
1	113	1500	22.86	18.22	19.28	4.73	8.18	-24.2011
2	113	2000	21.77	18.77	20.77	5.32	6.53	-24.2432
3	113	2500	26.67	19.15	24.03	6.11	5.58	-25.3754
4	113	3000	36.99	22.07	28.23	6.89	5.10	-27.3644
5	151	1500	12.78	10.09	10.33	4.70	9.06	-19.7870
6	151	2000	15.13	10.21	12.03	4.99	7.08	-20.4376
7	151	2500	17.90	11.74	17.58	5.82	6.26	-22.2551
8	151	3000	33.51	15.09	21.81	6.99	5.57	-25.8125
9	188	1500	5.87	3.47	4.88	3.97	8.85	-15.1692
10	188	2000	11.85	5.53	5.53	4.18	7.15	-17.3285
11	188	2500	13.50	6.26	8.68	4.76	6.13	-18.5376
12	188	3000	14.06	6.18	8.30	4.62	5.38	-18.5123
13	226	1500	5.85	8.85	6.58	4.02	10.62	-17.5567
14	226	2000	6.59	7.15	10.31	4.03	8.23	-17.5555
15	226	2500	15.78	5.51	8.76	4.83	7.19	-19.3575
16	226	3000	9.26	5.72	8.77	4.62	6.20	-17.0805

Çıktı faktörleri değerleri için S/N oranına bağlı olarak oluşturulan rank ve delta değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. S/N oranı grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Rank ve delta değerleri (Bursa Beyaz mermer).

Level	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	-25.3	-19.18
2	-22.07	-19.89
3	-17.39	-21.38
4	-17.89	-22.19
Delta	7.91	3.01
Rank	1	2



Şekil 4.1 S/N Oranı Grafiği (Bursa Beyaz mermer).

En uygun işleme parametre kombinasyonu kesme hızı 188 m/dk ile ilerleme hızı 1500 mm/dk olarak bulunmuştur. Kesme hızı birincil etkin parametre ilerleme hızı ise ikincil etkin parametre olmuştur. Çıktı faktörlerinin belirlenmesinde işleme parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Varyans analizi (Bursa Beyaz mermer).

Çıktı Faktörleri	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hata	% Etkinlik	F
Kesme Hızı	3	937,85	312,62	25,25	48,99	25,25
İlerleme Hızı	3	864,96	288,32	23,29	45,19	23,29
Hata	9	111,44	12,38		5,82	
Toplam	15	1914,24			100,00	

Bursa Beyaz mermer için Çizelge 4.3'te incelendiğinde, F hipotezine göre yapılan varyans analizinde $F_{\text{kesme hızı}}=25,25 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olup kesme hızı parametresi % 48,99 oranında frezelemede etkin olmaktadır. $F_{\text{ilerleme hızı}}=23,29 > F_{0,05;1;15}=4,54$ olduğundan ilerleme hızı parametresi de % 45,19 etki oranı ile frezeleme işleminde etkin parametre olmaktadır.

4.2 Marmara Dolomitik Mermer İçin S/N Analizi

Marmara Dolomitik mermer için deney tasarımına göre çıktı faktörlerinin değerleri ve S/N oranı analiz sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Analiz sonuçları (Marmara Dolomitik mermer).

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Z Eksen Kuvvet Değeri (N)	X Eksen Kuvvet Değeri (N)	Y Eksen Kuvvet Değeri (N)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Özgül Enerji (J/mm ³)	S/N Oranı
1	113	1500	14.97	8.29	10.60	6.43	6.58	-19.9097
2	113	2000	16.56	11.42	14.74	8.23	5.26	-21.5682

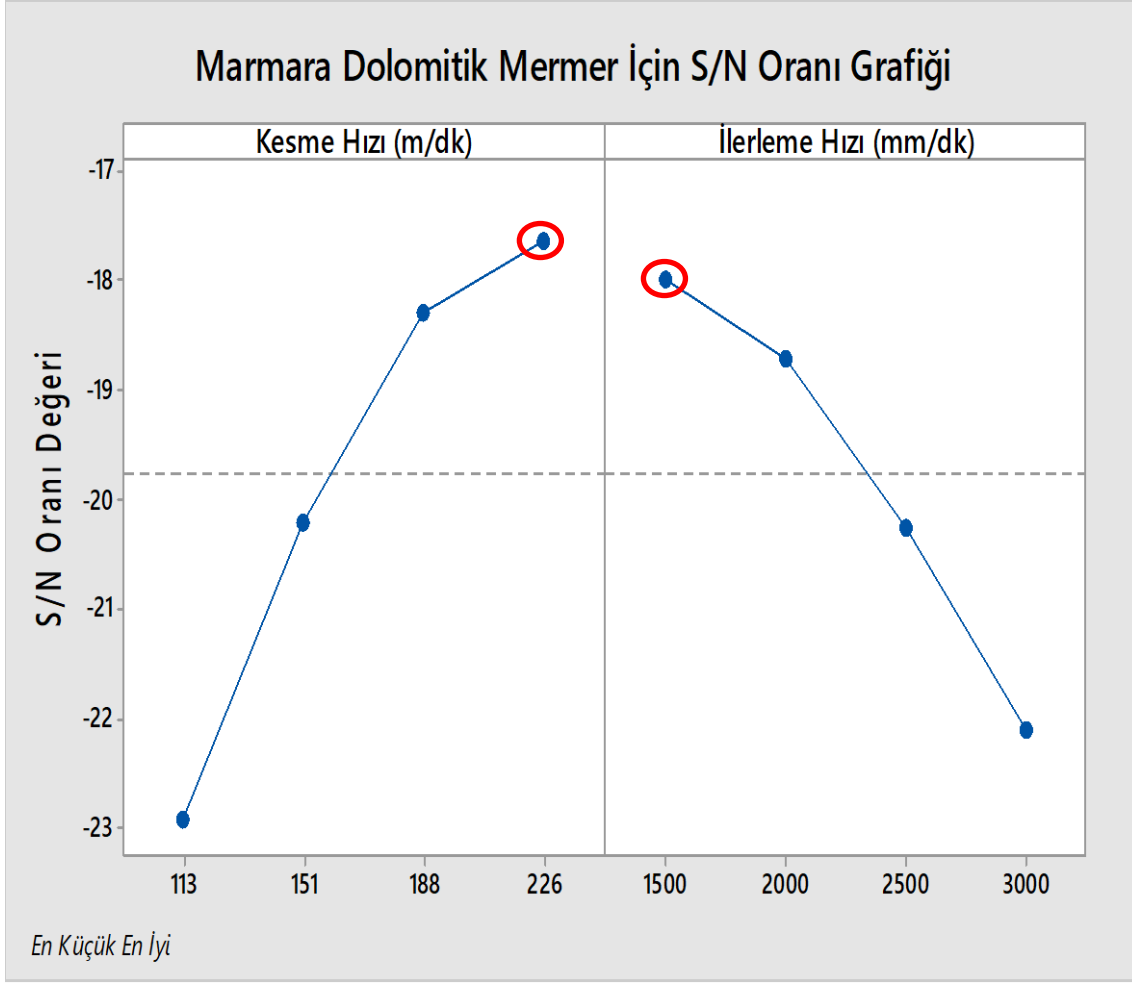
Çizelge 4.4 (Devam) Analiz sonuçları (Marmara Dolomitik mermer).

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Z Eksen Kuvvet Değeri (N)	X Eksen Kuvvet Değeri (N)	Y Eksen Kuvvet Değeri (N)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Özgül Enerji (J/mm ³)	S/N Oranı
3	113	2500	25.22	12.07	18.84	7.69	4.65	-23.8646
4	113	3000	29.76	20.50	28.05	8.71	4.09	-26.4064
5	151	1500	9.46	5.50	8.78	6.37	7.80	-17.7537
6	151	2000	12.23	5.87	8.86	7.37	6.04	-18.4901
7	151	2500	17.17	8.60	14.77	6.74	5.33	-21.2110
8	151	3000	23.22	12.06	18.56	6.96	4.60	-23.4183
9	188	1500	8.14	6.27	3.40	7.48	9.27	-17.1456
10	188	2000	10.59	6.65	7.32	7.69	7.18	-18.0707
11	188	2500	12.73	6.66	6.06	7.48	6.18	-18.2922
12	188	3000	15.16	6.57	10.19	7.20	5.32	-19.6078
13	226	1500	8.31	4.95	3.47	6.31	10.62	-17.1294
14	226	2000	6.86	6.57	4.64	6.92	8.59	-16.6903
15	226	2500	10.25	5.80	7.10	7.01	7.33	-17.6636
16	226	3000	14.21	6.65	8.61	6.32	6.29	-19.0281

Çıktı faktörleri değerleri için S/N oranına bağlı olarak oluşturulan rank ve delta değerleri Çizelge 4.5’ de verilmiştir. S/N oranı grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Rank ve delta değerleri (Marmara Dolomitik mermer).

Level	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	-22.94	-17.98
2	-20.22	-18.7
3	-18.28	-20.26
4	-17.63	-22.12
Delta	5.31	4.13
Rank	1	2



Şekil 4.2 S/N Oranı Grafiği (Marmara Dolomitik mermer).

En uygun işleme parametre kombinasyonu kesme hızı 226 m/dk ile ilerleme hızı 1500 mm/dk olarak bulunmuştur. Kesme hızı birincil etkin parametre ilerleme hızı ise ikincil etkin parametre olmuştur. Çıktı faktörlerinin belirlenmesinde işleme parametrelerinin varyans analizi Çizelge 4.6’te verilmiştir.

Çizelge 4.6 Varyans analizi (Marmara Dolomitik mermer).

Çıktı Faktörleri	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hata	% Etkinlik	F
Kesme Hızı	3	816,20	272,07	38,23	48,52	38,23
İlerleme Hızı	3	801,93	267,31	37,56	47,67	37,56
Hata	9	64,05	7,12		3,81	
Toplam	15	1682,18			100,00	

Marmara Dolomitik mermer için Çizelge 4.6'te incelendiğinde, F hipotezine göre yapılan varyans analizinde $F_{\text{kesme hızı}} = 38,23 > F_{0,05;1;15} = 4,54$ olup kesme hızı parametresi %48,52 oranında frezelemede etkin olmaktadır. $F_{\text{ilerleme hızı}} = 37,56 > F_{0,05;1;15} = 4,54$ olduğundan ilerleme hızı parametresi de % 47,67 etki oranı ile frezeleme işleminde etkin parametre olmaktadır.

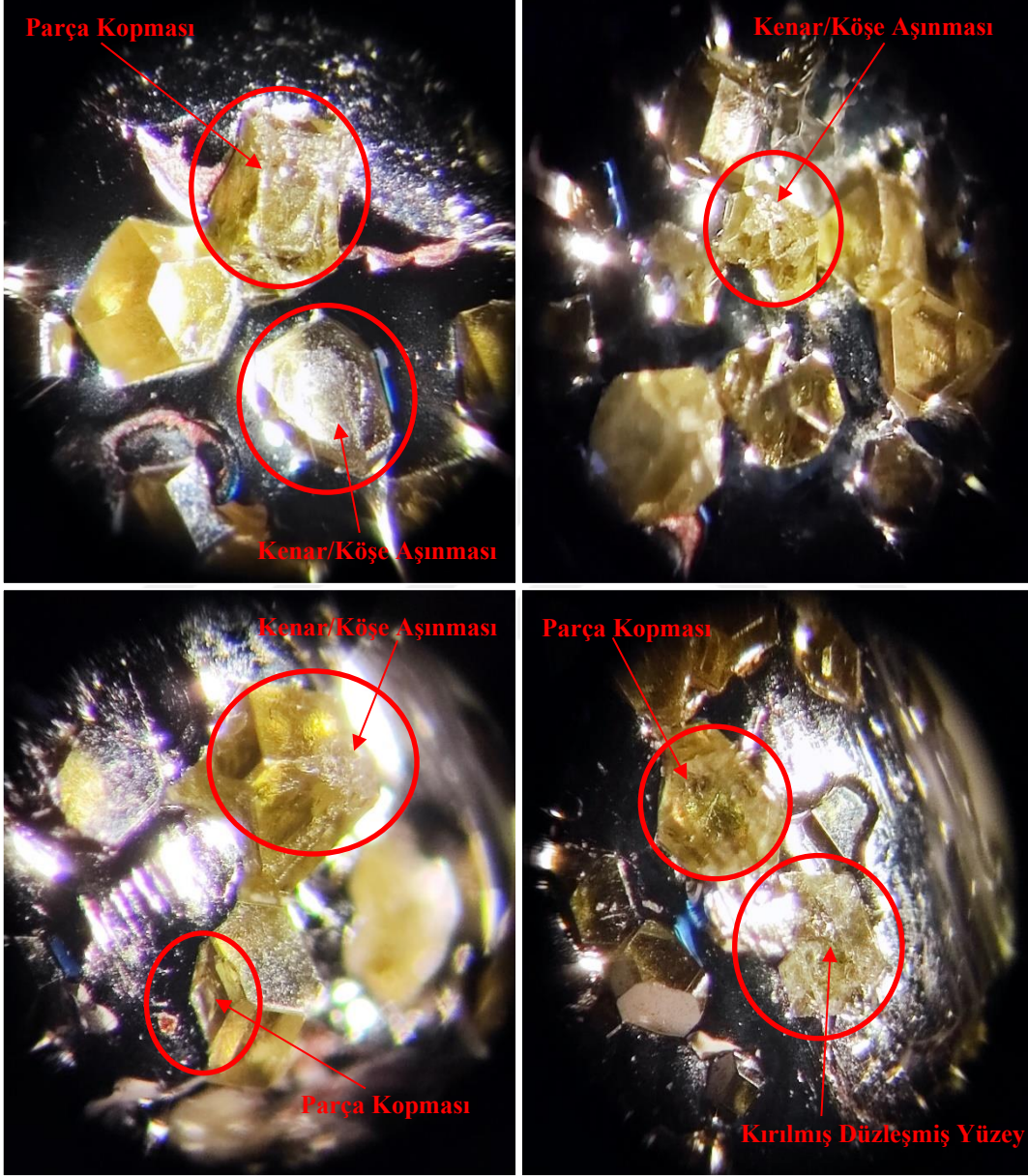
4.3 Aşınma Mekanizmasının Araştırılması

Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin aşınma mekanizmalarını incelemek ayrı ayrı elektrolize kaplamalı elmas freze kesici takım kullanılmıştır. 1 m²'lik yüzey alanı kesme derinliği 1 mm olacak şekilde adım adım frezeleme işlemi yapılmıştır. İşlem sonucunda takımların kesme işlemini yapan 1 mm'lik alanı Maden Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Nikon C-PS model mikroskop kamera ile incelendi (Resim 3.18).

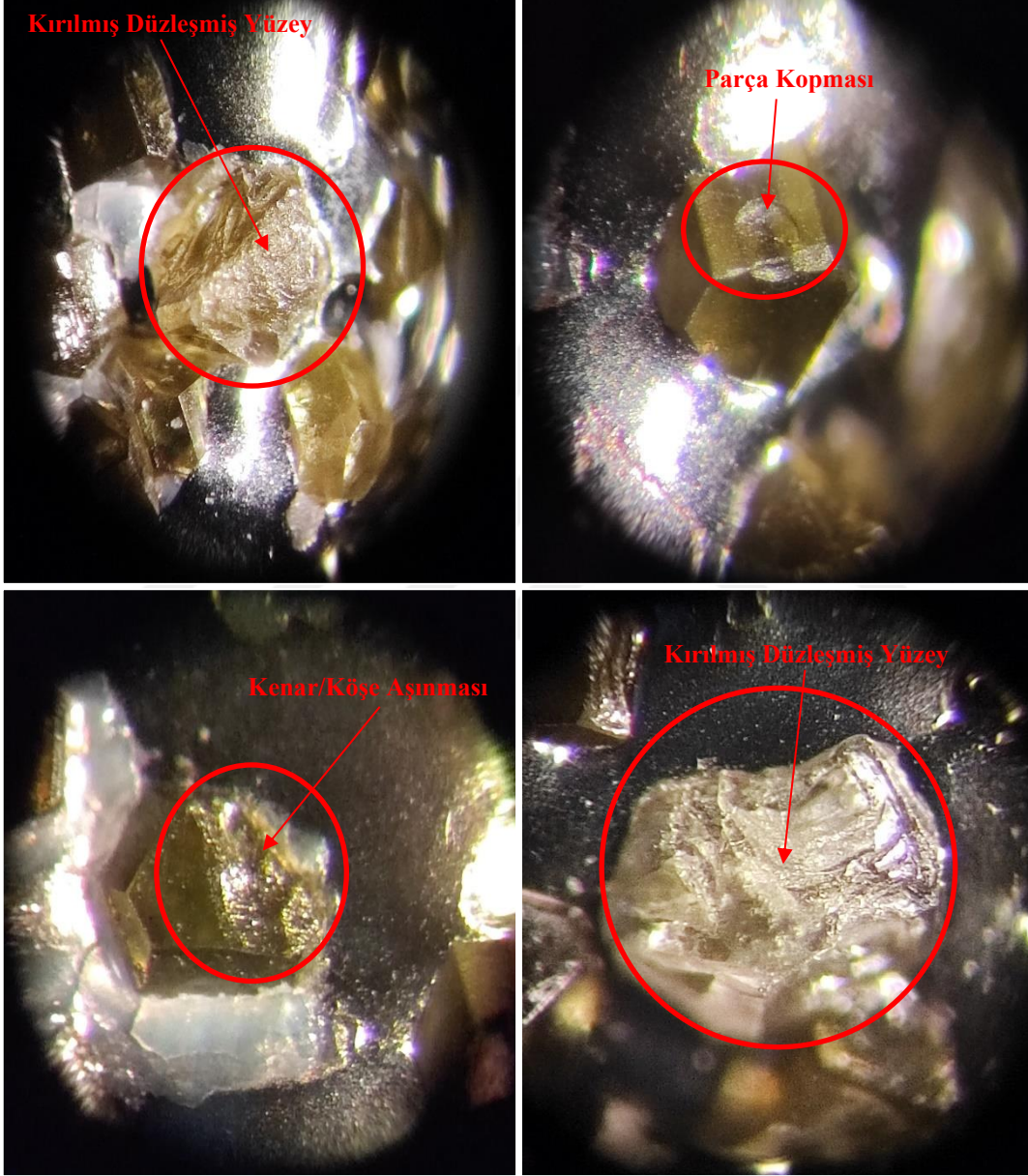


Resim 3.18 Nikon C-PS model mikroskop kamera.

Görüntü incelemeleri sonucunda hem Bursa Beyaz mermer hem de Marmara Dolomitik mermerin kesici takımları üzerindeki elmaslarda parça kopması, kenar/köşe aşınması ve kırılmış düzleşmiş yüzeyler gözlemlenmiştir. Bursa Beyaz mermer için elde edilen görüntüler Resim 3.19'da, Marmara Dolomitik mermer için Resim 3.20'de gösterilmiştir. Elmaslarda meydana gelen aşınma tipleri görsel üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir.



Resim 3.19 Bursa Beyaz mermer aşınma tipleri.



Resim 3.20 Marmara Dolomit mermer aşınma tipleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Taguchi deney tasarım yönteminin ve istatistiksel analizinin başarı ile uygulandığı bu çalışmada; Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin elektroliz kaplamalı elmas freze takımlar ile kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin uygun işleme seviyeleri ile çıktı parametrelerine olan etkileri incelenerek elmasların aşınma durumları ortaya konulmuştur. Kesme hızı ve ilerleme hızı parametrenin çıktı faktörlerine olan etkileri minimize edilerek elektrolize kaplamalı elmas takımların performans iyileştirmesi sağlanmıştır.

Örneklenen Bursa Beyaz mermer ve Marmara Dolomitik mermer numunelerinin, uygulanan deneysel çalışma koşullarında geçerli olmak üzere aşağıda verilen bazı sonuçlar elde edilmiştir.

- Bursa Beyaz mermer numunesi için kesme hızı 188 m/dk ile ilerleme hızı 1500 mm/dk olarak,
- Marmara Dolomitik mermer numunesi için kesme hızı 226 m/dk ve ilerleme hızı 1500 mm/dk olarak en uygun işleme parametresi tespit edilmiştir.

Kesme hızı her iki numune türünde birincil etkin parametre, ilerleme hızı da ikincil etkin parametre olup frezeleme işleminde etki oranlarının yüksek olduğu görülmüştür.

Örneklenen numuneler yapılan F testi analizinden düşük hata oranlarında geçmiş olup, istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Frezeleme işlemlerinde deney numunelerinin mineral tane boyutlarının, dokularının ve mineral tanelerin az veya çok girift bir şekilde birbirleriyle kenetlenmeleri sonucu kesme hızları farklılık göstermektedir. İlerleme hızı her iki numune türünde de aynı (1500 mm/dk) olmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre kesme hızının yüksek olması işleme performansını lineer olarak arttırırken, ilerleme hızının yüksek olması ise işleme performansının lineer olarak

düşmesine neden olmaktadır. Yüksek kesme hızlarında elmas freze takımların mineral tanelerinin kopartma işlemi kolaylaşmakla beraber ilerleme hızında artış ile kopartma işlemi ve talaş atımını zorlaştırmaktadır.

Talaş sıkışması ile uygulanan kesme kuvvetleri, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğünde artış olmaktadır. Kesme esnasında takım ve malzeme arasında gerçekleşen baskıda kesici takım üzerinde olumsuz etkiler oluşturur. Bu etkiler takım üzerindeki elmaslarda farklı tiplerde aşınma meydana getirir.

Elde edilen optimum işleme parametrelerine göre yapılan 1 m²'lik frezeleme işlemi sonucunda elmaslarda parça kopması, kenar/köşe aşınması ve kırılmış düzleşmiş yüzeyler şeklinde üç farklı aşınma mekanizması gözlemlenmiştir. Bu tür aşınmalar takımın kesme performansını düşürerek, devam eden frezeleme sürecinde bu aşınmalar artarak takım ömrünü oldukça kısaltacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Bozdoğan M, 2012, CNC Freze Tezgâhında Havuz İşlemede Takım Yolu ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cserta E, Gyurika I G, 2021, Effects of The Granite-Forming Minerals On The Surface Roughness İn The Milling Processes, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Cilt 112, 3041–3052.
- Gyurika I G, 2018, Researching The Effects of Feedrate And Diamond Grain Size On Edge Chipping of Milled Granites, Tehnicki Vjesnik- Technical Gazette., 25(1), 49–55.
- 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, Adv Mech Eng., 11(7), 1–12.
- Hamzaçebi C, 2020, Taguchi Method As A Robust Design Tool, Quality Control İn Intelligent Manufacturing.
- Kara V, 2012, Taguchi Metodu Yardımıyla, GS 24MN5 N Malzemenin Frezeleme Operasyonunda, İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Liu J, Cheng K, Ding H, Chen S, 2020, An İntestigation of İntluence of Cutting Parameters On Three-Dimensional Surface Topography İn Micromilling Sicp/Al Composites, Proc Imeche Part B: J Engineering Manufacture.
- Memiş F, 2015, AISI 2205 (EN 1.4462) Paslanmaz Çeliğin CNC Torna Tezgâhında İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Meydaneri F, 2014, Torna Tezgâhında Kanal Açma Operasyonları İçin Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti, Takım Aşınması ve Kanal Profili Üzerindeki

- Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Mitra A, 2008, Fundamentals of Quality Control And Improvement, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Moayyedean M, Mohajer A, Kazemian M G, Mamedov A, Derakhshandeh J F, 2020, Surface Roughness Analysis İn Milling Machining Using Design of Experiment, SN Applied Sciences, 2, 1698.
- Othman K, Ghani J A, Juri A, Mohd M S R, Kassim S, Haron C H C, 2020, Optimization of Tool Life And Surface Roughness For Hypereutectic Al – Si Alloys İn Face Milling.
- 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, Afyonkarahisar.
- Özkan E, Öz O, 2020, Determination of Appropriate Cutting Parameters Depending On Surface Roughness By Taguchi Method İn Milling of Marbles. Arabian Journal of Geosciences, 13, 532.
- Özkan E, Öz O, 2021, The Effect of Characterization of Carbide End Milled Limestones On Optimal Parameters. Arabian Journal of Geosciences, 14, 1181,
- Özkan E, Öz O, 2023, Limra Kireçtaşının CNC Doğal Taş İşleme Makinesinde İşleme Parametrelerinin ve Yüzey Kalitesinin Araştırılması. Yer Altı Kaynakları Dergisi, 24, 13-27,
- Özkan E, Öz O, Tuğral, N, 2023, Investigation of The Effect of Radial Width And Axial Depth Parameters On Surface Quality İn Milling of White Marbles. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1267-1280,
- Roy R K, 2010, A Primer On The Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, United States of America.
- Sarışık 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.

- Sarışık 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: 178-193.
- Sarışık 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).
- Şenoğlu B, Acıtaş Ş, 2014, İstatistiksel Deney Tasarımı: Sabit Etkili Modeller, 3. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y, 2005, Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Taguchi G, Phadke MS, 1984, Quality engineering through design optimization. IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '84, November 26-29, Atlanta, GA
- Tien D H, Nguyen N T, Do D T, Nguyen V C, Nguyen V Q, Nguyen V L, Nguyen H P, 2020, Optimization of Cutting Parameters And Cutter Helix Angle For Minimum Surface Roughness İn Flat –End Milling of Al6061, TRKU (Technology Reports of Kansai University), 62(4), 2647–2656.
- Tuğral N, 2019, Cnc Makinesinde Gerçek Mermerlerin Kesme Genişliğinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Yuvaraj T, Suresh P, 2019, Analysis of EDM Process Parameters On Inconel 718 Using The Grey-Taguchi And Topsis Methods, Strojniški Vestnik- Journal of Mechanical Engineering, 65(10), 557-564.
- Zhu Z, Buck D, Guo X, Cao P, Wang J, 2020, Cutting Performance İn The Helical Milling of Stone-Plastic Composite With Diamond Tools, CIRP Journal of Manufacturing Science And Technology, 31, 119–129.
- Wang F, Liu S, Guo Z, Cao L, 2020, Analysis of Cutting Forces And Chip Formation İn Milling of Marble, Int J Adv Manuf Technol., 108, 2907– 2916.