KUVARS CAMIN ULTRASONİK TİTREŞİM DESTEKLİ İMALAT YÖNTEMİ İLE BEŞ EKSENLİ İŞLEME MERKEZİNDE İŞLENMESİ VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Özlem ERDOĞAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KUVARS CAMIN ULTRASONİK TİTREŞİM DESTEKLİ İMALAT YÖNTEMİ İLE BEŞ EKSENLİ İŞLEME MERKEZİNDE İŞLENMESİ VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Özlem ERDOĞAN
0000-0002-2129-9414

Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

KUVARS CAMIN ULTRASONİK TİTREŞİM DESTEKLİ İMALAT YÖNTEMİ İLE BEŞ EKSENLİ İŞLEME MERKEZİNDE İŞLENMESİ VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Özlem ERDOĞAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Sert ve kırılgan kuvars camın geleneksel imalat ile işlenmesi zordur. Bu nedenle, bu tür malzemeler için ultrasonik işleme tercih edilmektedir. Bu çalışmada, döner ultrasonik destekli delme işlemi (RUD) ile kuvars malzeme, boru tipi takım kullanılarak delinmiş ve ultrasonik güç, takım dönme hızı (devir sayısı), ilerleme hızı ve gagalama delme derinliği parametrelerinin çapak alanı (CA), kaldırılan malzeme hacmi (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneylerin tasarımı için yanıt yüzey metodolojisi (RSM)'ndeki Box-Behnken tasarımı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemi kullanılarak, ultrasonik gücün %90, devir sayısının 1300 rpm, ilerleme hızının 30 mm/dak ve gagalama delme derinliğinin 0,75 mm olduğu deney şartı, ideal proses parametreleri olarak bulunmuştur. İdeal şartlara göre, minimum çapak alanı, minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum malzeme kaldırma hacmi, sırasıyla, 56,962 mm^2, 1,222 μm ve 162,68 mm^3/s'dir. Ayrıca, parametrelerin her bir seviyesi için ortalama Gri İlişki Derecesi (GRG) hesaplanmıştır. Maksimum GRG değerlerine karşılık gelen seviyelerdeki yeni parametrelerle (P= %60; n=1600 rpm; V_f=30 mm/dak; dp=0.40 mm) ve RSM analizindeki çoklu yanıt optimizasyonu ile bulunan diğer parametrelerle (P= %61,52; n=1478,79 rpm; V_f=28,18 mm/dak; dp=0,69 mm) ultrasonik destekli ve ultrasonik destek olmadan işlemler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre, GRA çoklu optimizasyonunda, minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü, minimum çapak alanı ve maksimum kaldırılan malzeme hacmi üzerindeki en önemli etkinin devir sayısı parametresi olduğu tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre ise en etkili parametrelerin, SR üzerinde ultrasonik güç (P), CA üzerinde devir sayısı (n) ve MRR üzerinde ilerleme hızı (V_f) olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çapak alanı, çoklu yanıt optimizasyonu, döner ultrasonik delme, gagalama delme, gri ilişki analizi, kesme parametreleri, kuvars, malzeme kaldırma hacmi, ultrasonik güç, yüzey pürüzlülüğü.
2024, xv + 86 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

PROCESSING OF QUARTZ GLASS IN FIVE-AXES ULTRASONIC VIBRATION-ASSISTED MACHINING AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS

Özlem ERDOĞAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Hard and brittle quartz glass is difficult to process by traditional manufacturing. Therefore, ultrasonic processing is preferred for such materials. Therefore, ultrasonic processing is preferred for such materials. In this study, quartz material was drilled using a trepanning tool by rotary ultrasonic drilling (RUD) process, and the effect of ultrasonic power, spindle speed, feed rate and pecking drilling depth parameters on chipping area (CA), material removal rate (MRR) and surface roughness (SR) has been researched. Box-Behnken design in response surface methodology (RSM) was used to design the experiments. According to the experimental results, ideal process parameters were found to be the ultrasonic power of 90 %, spindle speed of 1300 rpm, feed rate of 30 mm/min, pecking drilling depth of 0.75 mm by using the Gray Relational Analysis (GRA) method. At the ideal process parameter conditions, the minimum chipping area, minimum surface roughness and maximum material removal rate were 56,962 mm^2, 1,222 μm and 162,68 mm^3/s, respectively. Then, the average GRG was calculated for each level of the parameters. Ultrasonic assisted and non-ultrasonic assisted processes carried out with new parameters (P=60 %; n=1600 rpm; V_f=30 mm/min; dp=0.40 mm) at the levels corresponding to their maximum GRG and the other parameters (P=61,52 %; n=1478,79 rpm; V_f=28,18 mm/min; dp=0,69 mm) found by RSM Analysis, and the results were compared. According to the results of the experiments, in GRA multiple optimization, it was determined that the spindle speed parameter had the most important effect on the minimum average SR, minimum CA and maximum MRR. According to ANOVA, the most effective parameters were found to be ultrasonic power (P) on SR, spindle speed (n) on CA, and feed rate (V_f) on MRR.

Key words: Chipping area, cutting parameters, grey relational analysis, material removal rate, multiresponse optimization, pecking drilling, quartz, rotary ultrasonic drilling, surface roughness, ultrasonic power.
2024, xv + 86 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim süresince değerli görüş ve önerileriyle bana yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne, Makine Mühendisliği Bölümü'ne, Endüstri Mühendisliği Bölümü'ne ve doktora tez izleme kurulundaki değerli öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

YÖK 100/2000 programına teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmalarım sırasında bursiyeri olduğum, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na, 1004 – Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı dahilinde, Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN yürütücülüğündeki 22AG001 numaralı BATEG (Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu) kapsamında sağlanan finansal destek için teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmalarımda gerekli olan deneysel araştırmalarda verdikleri üretim desteği için Öğüt Kalıp Otomotiv Şirketi'ne, ölçüm destekleri için Metal Fabrika Kalıp San. ve Tic. Ltd. Şirketi'ne ve Smartist Şirketi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi, doktora programı sürecinde de bana destek olan, maddi ve manevi güç veren annem Fatma ERDOĞAN, kardeşim S. Eren ERDOĞAN ve sonsuzluğa göç etmiş babam H. Hüseyin ERDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Özlem ERDOĞAN
24/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....vi
ABSTRACT....ix
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
ŞEKİLLER DİZİNİ....xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ....xv
1. GİRİŞ…..……..1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....5
3. MATERYAL ve YÖNTEM....12
3.1. İş Parçası ve Kuvars....12
3.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Cihazlar....12
3.3. Takım ve Takım Tutucu....16
3.4. Deneylerin Tasarımı....17
3.5. Ölçüm Metodu....20
3.5.1. Çapak alanı ölçümü ve hesaplama metodu....20
3.5.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü....22
3.5.3. Gagalama delme için kaldırılan malzeme hacmi ölçümü ve hesaplama metodu..23
3.6. Varyans Analizi (ANOVA)……..25
3.7. Parametrelerin Optimizasyonu için Kullanılan Yöntemler…….27
3.7.1. Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM)…….……...27
3.7.2. Gri İlişki Analizi Yöntemi (GRA)…….……29
4. BULGULAR ve TARTIŞMA…….34
4.1. Deney Sonuçları……...34
4.1.1. Çapak alanı (CA) ölçüm sonucu……...35
4.1.2. Yüzey pürüzlülüğü (SR) ölçüm sonucu……38
4.1.3. Kaldırılan malzeme hacmi (MRR) ölçüm sonucu…….……...39
4.2. ANOVA Sonuçları……...40
4.2.1. MRR üzerinde proses değişkenlerinin etkisi…….40
4.2.2. SR üzerinde proses değişkenlerinin etkisi…….48
4.2.3. CA üzerinde proses değişkenlerinin etkisi ……...…55
4.3. Optimizasyon Sonuçları……...63
4.3.1. Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) ile çok yanıtlı optimizasyon……..63
4.3.2. Gri İlişki Analizi Yöntemi (GRA) ile çok yanıtlı optimizasyon……...66
4.4. Optimum Şartlarda Ultrasonik Destekli ve Ultrasonik Destek Olmadan İmalat…..77
Yapılıp Sonuçların Değerlendirilmesi……..…….....
5. SONUÇ……80
KAYNAKLAR....83
EKLER....
ÖZGEÇMİŞ....86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
D	Optimal arzu edilebilirlik değeri (optimal desirability)
Dd	Dış çap (takım dış çapı ya da delik çapı (mm))
Di	İç çap (takım iç çapı ya da parça dış çapı (mm))
di	Her bir yanıt için arzu edilebilirlik değeri (desirability)
dp	Gagalama delme derinliği (pecking drilling depth (mm))
fe	Hata için serbestlik derecesi
n	Devir sayısı (spindle speed (rpm))
N	Toplam yapılan deney sayısı
ηeff	Etkin testlerin sayısı
P	Ultrasonik güç (ultrasonic power (%))
R	Doğrulama deneylerinin sayısı
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
Ve	Hata varyansı veya hata için ortalama kareler değeri
V_f	İlerleme hızı (feed rate (mm/dak))
w	Yanıtların ağırlık değerlerinin toplamı
w_i	Her bir yanıtın ağırlık değeri

Kısaltmalar	**Açıklama**
BBD	Box-Behnken Tasarımı (Box-Behnken Design)
CA	Çapak alanı (chipping area)
CI	Güven aralığı (confidence interval)
DoE	Deney tasarımı (Design of Experiment)
DoF	Toplam serbestlik derecesi (Degree of Freedom)
GRA	Gri ilişki analizi (Grey Relational Analiysis)
GRC	Gri ilişki katsayısı (Grey Relational Co-efficient)
GRG	Gri ilişki derecesi (Grey Relational Grade)
GRG exp	Gerçek (deneysel) gri ilişki derecesi
GRG m	Deney setindeki gerçek gri ilişki derecelerinin ortalaması
GRG iL	Parametre i'nin, L seviyesindeki ortalama gri ilişki derecesi
GRG p	Tahmin edilen (teorik) gri ilişki derecesi
Maks.	Maksimum
Min.	Minimum
MRR	Kaldırılan malzeme hacmi (Material Removal Rate)
RSM	Yanıt yüzey metodu (Response Surface Methodology)
RUD	Döner ultrasonik destekli delme (Rotary Ultrasonic Drilling)
RUSM	Döner ultrasonik frezeleme (Rotary Ultrasonic Side Milling)
SR	Yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness)
USM	Ultrasonik imalat (Ultrasonic Machining)
UVAM	Ultrasonik titreşim destekli imalat (Ultrasonic Vibration Assisted Machining)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Takım üzerindeki elmas taneciklerinin yörüngeleri a) Geleneksel işleme CM, b) RUSM	7
Şekil 3.1.	Deney düzeneği	14
Şekil 3.2.	RUD (Döner ultrasonik delme) prosesinde malzeme kaldırma işlemi	14
Şekil 3.3	Kuvars camın işlem sırasını gösteren takım yolu	15
Şekil 3.4.	Deney fikstürü ve işlem adımları A) Fikstürün ilk hali B) Kanal açılmış fikstür C) Tam çap delinmiş fikstür	15
Şekil 3.5.	Kesici takım (elmas tanecikli boru tipi takım). A) Takım üzerindeki elmas kısmın mikroskop görüntüsü B) Boru tipi elmas takım (NØ28 641048, Tegfari)	16
Şekil 3.6.	Takım tutucu (BBT40)	16
Şekil 3.7.	Takım tutucu dış ölçüleri	16
Şekil 3.8.	Bitmiş parçadaki çapak görüntüsü	20
Şekil 3.9.	Dijital kumpas ile çap ölçümü	20
Şekil 3.10.	RUD ile açılan deliğin ve çıkartılan parçanın geometrisi (parçanın geometrisi (Singh, Kataria, Singhal, Garg ve Tyagi, 2020)	21
Şekil 3.11.	Kuvars parçanın Profil Projeksiyon (CPJ-3025AZ) üzerindeki görüntüsü	21
Şekil 3.12.	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Mahr MarSurf PS 10)	22
Şekil 3.13.	Yüzey pürüzlülük ölçümü için aynı parça üzerindeki ölçüm noktaları	23
Şekil 3.14.	MRR hesabı için gagalama delme çevrimi (Jain ve Pandey, 2016)	25
Şekil 3.15.	GRA Metodolojisi	30
Şekil 4.1.	RUD prosesi ile üretilen 14 nolu deney parçasının GIMP'deki görüntüsü	35
Şekil 4.2.	Çapak alanı maksimum ve minimum olan parçaların GIMP görüntüleri. A) Deney no. 2 (Maks. CA=221,711 mm^2), B) Deney no. 20 (Min. CA= 47,421 mm^2)	36
Şekil 4.3.	MRR üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı	42
Şekil 4.4.	Parametrelerin MRR üzerindeki etkileri	42
Şekil 4.5.	P faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği	43
Şekil 4.6.	n faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği	43
Şekil 4.7.	Vf faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği	44
Şekil 4.8.	dp faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği	44
Şekil 4.9.	İki parametrenin (Vf ve dp) etkileşiminin MRR üzerindeki etkileri	45
Şekil 4.10.	MRR için etkileşim grafiği	45
Şekil 4.11.	MRR'deki farkların normal dağılıma uyum grafiği	46
Şekil 4.12.	MRR'deki farklara karşı uygun değer grafiği	46
Şekil 4.13.	MRR'deki farklara karşı deney sırası grafiği	47
Şekil 4.14.	MRR'nin modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri	47
Şekil 4.15.	SR üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı	49

Şekil 4.16.	Parametrelerin SR üzerindeki etkileri	50
Şekil 4.17.	P faktörüne göre SR'nin aralık grafiği	51
Şekil 4.18.	n faktörüne göre SR'nin aralık grafiği	51
Şekil 4.19.	V_f faktörüne göre SR'nin aralık grafiği	52
Şekil 4.20.	dp faktörüne göre SR'nin aralık grafiği	52
Şekil 4.21.	SR için etkileşim grafiği	53
Şekil 4.22.	SR'deki farkların normal dağılıma uyum grafiği	53
Şekil 4.23.	SR'deki farklara karşı uygun değer grafiği	54
Şekil 4.24.	SR'deki farklara karşı deney sırası grafiği	54
Şekil 4.25.	SR'nin modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri	55
Şekil 4.26.	CA üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı	57
Şekil 4.27.	Parametrelerin CA üzerindeki etkileri	57
Şekil 4.28.	P faktörüne göre CA'nın aralık grafiği	58
Şekil 4.29.	n faktörüne göre CA'nın aralık grafiği	59
Şekil 4.30.	V_f faktörüne göre CA'nın aralık grafiği	59
Şekil 4.31.	dp faktörüne göre CA'nın aralık grafiği	60
Şekil 4.32.	İki parametre (n ve dp) etkileşiminin CA üzerindeki etkisi	60
Şekil 4.33.	CA için etkileşim grafiği	61
Şekil 4.34.	CA'daki farkların normal dağılıma uyum grafiği	61
Şekil 4.35.	CA'daki farklara karşı uygun değer grafiği	62
Şekil 4.36.	CA'daki farklara karşı deney sırası grafiği	62
Şekil 4.37.	CA'nın modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri	63
Şekil 4.38.	MRR, SR ve CA'nın çoklu optimizasyonu için arzu edilebilir (D: 0,8035) yaklaşımlı grafik	64
Şekil 4.39.	Proses parametrelerinin GRG üzerindeki etkileri	72
Şekil 4.40.	Deney şartlarına göre gerçek ve tahmini GRG	75
Şekil 4.41.	26. deney ile optimum deney arasında GRG karşılaştırması	76
Şekil 4.42.	MRR'nin delme yöntemleri (RUD ve CD) arasında karşılaştırılması	78
Şekil 4.43.	SR'nin delme yöntemleri (RUD ve CD) arasında karşılaştırılması	78
Şekil 4.44.	CA'nın delme yöntemleri (RUD ve CD) arasında karşılaştırılması	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	3.1.	Kuvars camın fiziksel özellikleri	12
Çizelge	3.2.	Kuvars camın kimyasal bileşenleri	12
Çizelge	3.3.	YCM_UV 650 CNC beş eksen işleme merkezinin özellikleri	13
Çizelge	3.4.	UD2H Ultrasonik jeneratör (güç sağlayıcı) setin özellikleri	13
Çizelge	3.5.	Takım tutucu (BBT40) özellikleri	17
Çizelge	3.6.	RUD proses girdi faktörleri (parametreleri) ve seviyeleri	18
Çizelge	3.7.	Deney tasarımı (DoE)	19
Çizelge	3.8.	Kuvarsın RUD ile işlenmesinde yüzey yanıt yöntemi (RSM)'nin kullanıldığı optimizasyon çalışmaları	27
Çizelge	4.1.	Deney sonuçları	34
Çizelge	4.2.	Çapak alanı (CA) hesap tablosu	37
Çizelge	4.3.	Yüzey pürüzlülüğü (SR) sonuçları	38
Çizelge	4.4.	MRR hesap tablosu	39
Çizelge	4.5.	MRR için ANOVA sonuçları	41
Çizelge	4.6.	SR için ANOVA sonuçları	48
Çizelge	4.7.	CA için ANOVA sonuçları	56
Çizelge	4.8.	Parametrelerin bulunan optimum değerleri	64
Çizelge	4.9.	Çoklu optimizasyon çözümü	65
Çizelge	4.10.	Yanıtların tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri	65
Çizelge	4.11.	Çoklu optimizasyonda güven aralığı	65
Çizelge	4.12.	Normalizasyon verileri	67
Çizelge	4.13.	Hesaplanmış gri ilişki katsayısı (GRC) verileri	68
Çizelge	4.14.	Gri ilişki dereceleri ve sıralaması	69
Çizelge	4.15.	Parametrelerin seviyeleri için ortalama GRG	71
Çizelge	4.16.	GRG için ANOVA	73
Çizelge	4.17.	Gerçek ve tahmini GRG değerleri	74
Çizelge	4.18.	GRA yöntemi ile bulunmuş en iyi ve optimum şartların GRG değerleri	76
Çizelge	4.19.	Optimum şartlarda ultrasonik destekli ve ultrasonik desteksiz deney sonuçları	77

1. GİRİŞ

Geleneksel imalat yöntemlerinde genellikle iş parçası kesici takım çifti kullanılmaktadır. Bu yöntemler, kesici takım ile iş parçasını plastik deformasyona uğratarak şekillendirme esasına dayanmaktadır. Bu sebep ile iş parçası kesici takım çifti arasında talaşlı üretim mekaniği önem kazanmaktadır.

Alışılmamış özel imalat yöntemleri, geleneksel yöntemlerden farklı olarak mekanik kuvvet uygulamadan, çeşitli enerji türlerini (kimyasal, elektro – kimyasal, ısı enerjisi vb.) kullanarak malzeme işleyen, aşındıran veya şekillendiren yöntemlerdir (Çaydaş ve Hasçelik, 2004).

Alışılmamış imalat yöntemlerinin sınırlı kullanımından dolayı yeni işleme metodları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler arasında ön plana çıkan ultrasonik işleme yöntemi; hem geleneksel yöntemlerin bilgi ve deneyimini kullanmaya olanak sağlarken, hem de yeni bir alışılmamış imalat yöntemi olarak düşünülebilir. Bir ultrasonik sistemi takım tezgahına uyarlamak oldukça kolaydır. Uyarlanan sistem ile talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Özellikle işlenebilirliği düşük iş parçalarının işlenmesinde ve mikro işlemede görülen üstün özellikleri sayesinde ultrasonik işleme üzerine çalışmalar sürmektedir (Pazarkaya, 2013).

Ultrasonik titreşimlerin işleme performansı üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Ultrasonik destekli imalat proseslerinin bir çok avantajı vardır. Ultrason uygulaması kesme kuvvetlerini ve proses ısı oluşumunu azaltırken takım ömrünü uzatır. Ayrıca cam ve seramik gibi sert ve kırılgan malzemelerin de işlenmesine olanak sağlar (Marcel, Marek ve Jozef, 2014).

Ultrasonik işleme (USM) genellikle amorf, sert ve kırılgan malzemeler için tercih edilir Cam, seramik, titanyum, titanyum alaşımları ve daha birçok malzeme USM ile kolaylıkla işlenir (Kumar, Subbu, Krishna, ve Venugopal 2014). Eğer malzemenin sertliği 40 HRC' den fazla ise USM yöntemi etkin bir şekilde kullanılabilir. 76 mm çapa kadar küçük mikro delikler USM tarafından kolayca delinebilir. USM sırasında, işleme

bölgesinde ne kimyasal ne de termal değişiklikler meydana gelir (Kumar ve diğerleri, 2014). Üstelik, çalışma yüzeyinde herhangi bir metalurjik değişiklik oluşmaz (Azarhoushang ve Akbari, 2007). Ultrasonik titreşim destekli imalat (UVAM), aynı zamanda sertleştirilmiş çelik kalıpların hassas işlenmesinde uygulanarak, sanayide popüler bir metod haline gelmiştir (Gao ve Altıntaş, 2019).

Ultrasonik titreşimle kesme (UVC) yöntemi, işlenmesi zor malzemeler için verimli bir kesme tekniğidir. UVC mekanizmasının üç önemli parametreden etkilendiği bulunmuştur. Bunlar, takım titreşim frekansı, takım titreşim genliği ve kesme kuvvetini belirleyen iş parçası kesme hızıdır.

Ultrasonik destekli işlemenin yararları; kesme kuvvetlerinin ve gerilmelerin düşmesi (bir ve iki boyutlu titreşimli kesme talaş geometrisini değiştirir, daha ince ve küçük talaşlar oluşur ve talaşı kaldırmak için gerekli kuvvet düşer), kesme sıcaklıklarının düşmesi (takım-iş parçasının periyodik hareketi sayesinde boşluk oluşması ısının takım ve iş parçası arasında dağılmasını sağlar), takım ömrünün artması (kesme kuvvetlerinin, gerilmelerin azalması ve periyodik aralıklar takım ömrünü iyileştirir, kesikli temas takımı soğutur ve aşınmayı azaltır), yüzey kalitesinin ve hassasiyetinin artması (düşük kesme kuvvetleri iş parçasına bağlı titreşimin genliğini azaltır ve düşük sürtünme düşük sıcaklıkları tetikler, yüzey altındaki çatlamalar azalır, sürekli olmayan talaş oluşumu yüzey pürüzlülüğünü azaltır), kırılgan malzemelerin sünek rejimde kesilmesi (düşük kesme kuvvetleri kesme derinliğini azaltır ve mikro çatlakların ilerlemesini önler), talaş yığıntı oluşumunun önlenmesi (anlık basınç ve eğme gerilmelerinin azalması ve kesme kuvvetinin düşmesi kesintili talaş oluşumunu sağlar) gibidir (Sofuoğlu, 2016).

Geng ve diğerleri (2017), döner ultrasonik işlem (RUM) sırasında işleme sıcaklığının geleneksel taşlamaya kıyasla %18,8 oranında azaldığını tespit etmiştir. Bu durum aynı zamanda sıcaklık düşüşünün talaş miktarında azalmaya yol açtığı anlamına gelmektedir.

Döner ultrasonik işleme (RUM), çevreye duyarlı, geleneksel olmayan hibrit bir üretim yöntemidir. Kompozitler de dahil olmak üzere çok çeşitli sert ve kırılgan malzemeler ve Zerodur, Macor, Zirkonya gibi gelişmiş seramiklerin işlenmesi amacıyla etkin bir

şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca bu işlem aynı zamanda titanyum ve alaşımları, paslanmaz çelik vb. gibi sert ve sünek malzemeleri işlemek için de kullanılmıştır. RUM işlemi, statik tip USM ve geleneksel taşlama işlemleri ile edilen MRR (malzeme kaldırma hacmi), SR (yüzey pürüzlülüğü) ve işlenmiş deliğin doğruluğu açısından, daha iyi performans sunar. Ancak işlenmiş silindirik parçanın delikten çıkış tarafında oluşmuş kenar çapağı, daha fazla araştırma için hala önemli bir endişe kaynağıdır. RUM sürecinde, takım aşınması, delme kuvveti ve üretilen tork, aynı zamanda kullanılan soğutucu türlerinden de etkilenir (Singh, ve Singhal, 2016).

Döner ultrasonik işleme, gelişmiş seramik ve camlarda delik delmek için mevcut uygun maliyetli işleme süreçlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Hu, Wang, Ning, Cong, ve Li, 2017; Anwar, Nasr, Pervaiz, Al-Ahmari, Alkahtani, ve El-Tamimi, 2018).

Döner ultrasonik işleme (RUM), belirsiz bir geometriye sahip bir takım kullanarak, sert ve kırılgan malzemelerin işlenmesi için tasarlanmış bir işleme sürecidir. RUM, Ra 0,3 μm aritmetik pürüzlülük değerine ulaşabilir ve elmas aşındırıcı parçacıkları olan bir takım kullanır. Bu takımlar da Al alaşımları gibi yumuşak ve tok malzemeler için uygun değildir (Marcel, Marek ve Jozef 2014).

Kuvars malzeme, yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik, yüksek basınç dayanımı, iyi termal şok direnci, elektriksel olarak iletken olmayan yapısı, yakın ultraviyole ile yakın kızılötesi spektrum bölgeleri arasındaki spektral geçirgenlik, yüksek kimyasal saflık ve radyoaktif radyasyona karşı yüksek direnç gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde çok sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Bazı üstün özellikleri nedeniyle, geleneksel işleme yöntemleri ile işlenmesi çok zordur. Elektrokimyasal işleme (ECM) ve erezyon (EDM) gibi gelişmiş işleme yöntemleri bile kuvarsın elektriksel olarak iletken olmayan doğası nedeniyle uygun değildir. Bununla birlikte, kuvarsın, lazer ışını (LBM), ultrasonik işleme (USM), elektrokimyasal kıvılcım işleme (ECSM) ve tel elektrokimyasal işleme (WECDM) gibi diğer geleneksel olmayan yöntemlerle işlendiği bildirilmiştir. Ancak, bu gelişmiş işleme yöntemlerinin düşük işleme derinliği, düşük malzeme kaldırma oranı, zayıf yüzey bütünlüğü, ısıdan etkilenen bölge ve geometrik yanlışlıklar gibi bazı dezavantajları vardır (Sindhu, Thakur ve Chandna, 2020).

Yüksek sertliğe ve iyi termal stabiliteye sahip kuvars cam malzemeler, kalıp, otomobil üretimi, havacılık, ulusal savunma ve teknoloji gibi önemli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Xiao, Yan, Jin, Liu, Sun, ve Tan, 2021).

Döner ultrasonik işleme (RUM), geliştirilmiş delik kalitesi, yüksek işleme hızı, düşük kesme basıncı, yüksek yüzey kalitesi, düşük yüzey hasarı ve ekonomi ile sert ve kırılgan (cam ve ileri seramik gibi) malzemelerin işlenmesinde kullanılan en iyi işleme yöntemlerinden biridir (Wang, Feng, Zheng ve Zhang, 2016).

Ultrasonik işlem (USM) ve geleneksel delme (CD) mekanizmalarını birleştiren döner ultrasonik işleme (RUM) yöntemi, tek başına USM veya CD işlemleri ile kıyaslandığında daha yüksek malzeme kaldırma hacmi (MRR) sağlar (Sindhu, Thakur ve Chandna, 2020).

Çalışmada kullanılacak parametrelerden biri olan gagalama delme ile ilgili olarak kuvars malzemenin ultrasonik işlenmesinde gagalama delme ile ilgili kaynak fazla olmadığı için farklı malzemeler için olan çalışmalar da incelenmiştir.

Bu çalışma, kuvars malzemenin, döner tip ultrasonik destekli delme işleminde (RUD), ultrasonik güç (P), devir sayısı (n), ilerleme hızı (Vf) ve gagalama delme derinliği (dp) faktörlerinin delik kalitesini belirleyen çapak alanı (CA), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve kaldırılan malzeme hacmi (MRR) üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

Deneylerin planlanması için RSM metodunda BBD (Box-Behnken Design) deney tasarımı kullanılmıştır. İşlenmiş numuneler, çoklu optimizasyon yöntemleri olan gri ilişki analizi (GRA) ve yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak analiz edilmiş ve bulunan optimum değerler ile ultrasonik destekli ve ultrasonik destek olmadan deneyler yapılıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ultrasonik destekli işleme, belirli frekans ve genlikte kesici takıma veya iş parçasına titreşim uygulanarak iş parçasının işlenmesi sürecidir. Ultrasonik titreşim desteği ile işleme operasyonları iyileştirilmektedir. Geleneksel işleme göre kesimi zor olan malzemelerin (sert metal alaşımları, kırılgan plastikler, yüksek sıcaklık malzemeleri, kompozitler, seramikler, kuvars vb.) işlenmesinde avantaj sağlar. Bu yöntem ile gürültü ve takım aşınması azalır, yüzey pürüzlülüğü iyileşir. Kesici takım ve iş parçası için elastik şekil değiştirme miktarı, kesme sıcaklığı ve iş parçasının kesici ucun kenarına yapışması azalır (Sofuoğlu, 2016).

Sert alaşımlar, kompozitler ve kırılgan malzemeler gibi işlenmesi zor malzemelere derin delikler açmak için ultrasonik destekli delik delme yöntemi kullanılır. Yöntem, kesme kuvvetini ve takım aşınmasını azaltır. Düşük itme kuvveti sayesinde tabakalı kompozitlerin delaminasyonu önlenir. Talaş (çapak) boyutu düşer ve talaş yığıntısı azalır. Bu işlem sırasında kesikli talaş oluşur (Kumar, Subbu, Krishna, ve Venugopal 2014).

Delik delmede benzer bir çalışmayı da, Neugebauer ve Stoll yapmıştır. Yapılan çalışmada matkabın delik çıkışında oluşturduğu çapak ve kesme kuvvetleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Elde edilen deney sonuçlarına göre kesme kuvvetlerinde ve deliğin bittiği yerde çapak oluşumunda azalma olduğunu gözlemişlerdir (Neugebauer ve Stoll 2004).

Kırılgan malzemelerdeki deliklerin mekanik olarak işlenmesinden kaynaklanan kenar kırılması, kırılgan malzemelerin uygulamalarını kısıtlar. Döner ultrasonik delme (RUD), daha küçük boyutlu kenar talaşına sahip kırılgan malzemelerdeki deliklerin işlenmesi için uygun bir yaklaşımdır. Döner ultrasonik delme kullanıldığında talaş oluşumunun azaltılması, delme tekniğinin uygulanmasına ve optimizasyonuna yardımcı olur. Wang, Zha, Feng ve Zhang (2016), çalışmalarında kuvars cam üzerindeki döner ultrasonik delme işleminde kenar çapak azaltım mekanizmasını araştırmışlar, işleme kaynaklı çatlağın boyutunu deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, kenar

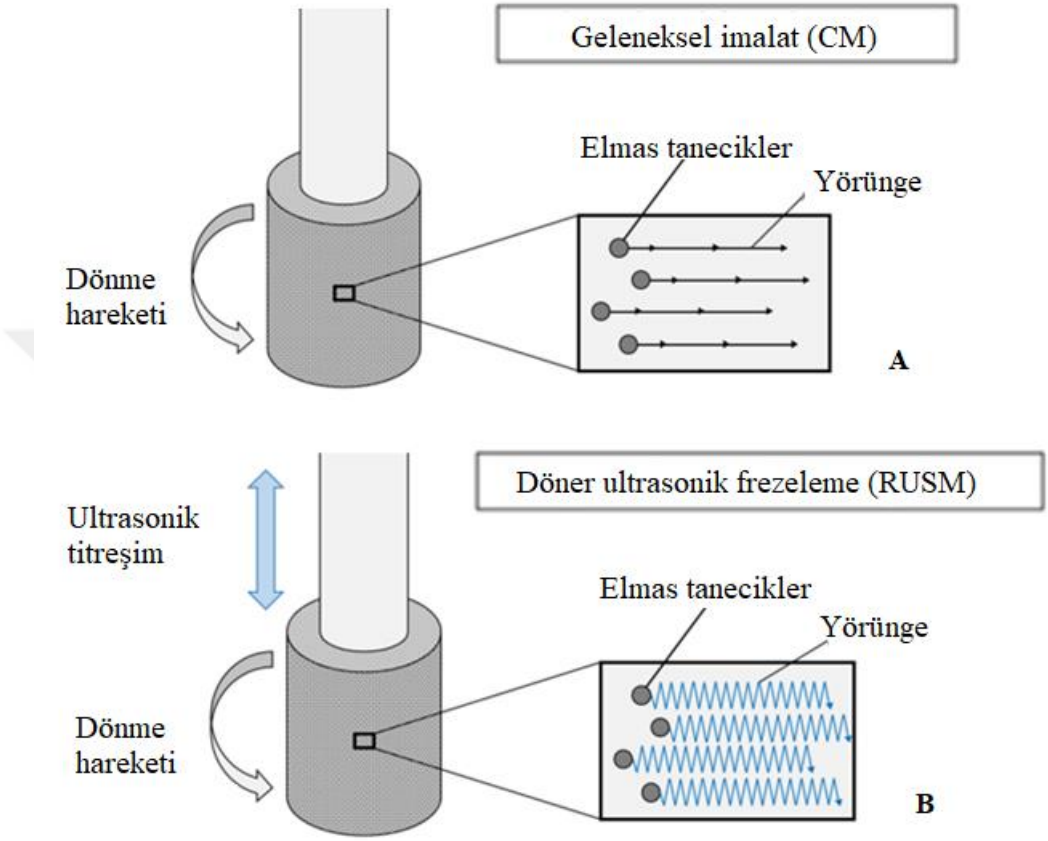
kırılmasının başlangıcının, hem itici kuvvetin büyüklüğüne hem de işleme kaynaklı çatlağın boyutuna göre belirlendiğini ancak kenar kırılmasının boyutunun büyük ölçüde delinmemiş malzemeye bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Döner ultrasonik delmenin (RUD) neden olduğu kenar ufalanması, kırılgan malzemelerin uygulamalarını kısıtlamaktadır. Kenar talaşının boyutunun etkili teorik modellemesine dayalı olarak işlem parametrelerini optimize ederek kenar talaşını azaltmak veya ortadan kaldırmak mümkün olmalıdır. Ancak, kırılgan malzemelerin RUD işlemi sırasında kenar talaşının tahmini modellemesi hakkında fazla yayın mevcut değildir. Wang, Feng, Zhang, Zhang, ve Pei (2016) çalışmalarında kırılgan malzemelerin RUD işlemi sırasında kenar talaşının boyutunu tahmin etmek için hem kesme kuvvetinin hem de işlemenin neden olduğu yüzey altı çatlaklarının kenar talaşının oluşumu üzerindeki etkileri dikkate alınarak analitik bir model sunmuşlardır. Kenar talaş boyutu, işleme değişkenleri (malzeme özellikleri ve ultrasonik genlik) ve kesme kuvveti arasındaki ilişkiler teorik olarak kurulmuştur. Modeldeki katsayılar, K9 optik cam numuneleri üzerinde RUD testleri yapılarak elde edilmiştir. Daha sonra, model safir numuneler üzerinde RUD testleri yapılarak doğrulanmıştır. Bu model kullanılarak, kırılgan malzemelerin RUD işlemi sırasında kenar ufalanma boyutu tahmin edilebilir. Deneysel ve tahmini sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kuvars, elektronik, optik, mikro elektro mekanik sistem (MEMS) ve biyomedikal vb. endüstrilerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Sert ve kırılgan yapısı nedeniyle kuvarsın işlenmesi zordur. Bu malzeme geleneksel olmayan işleme tekniklerinden biri olan ultrasonik titreşim destekli imalat ile işlenir (Kumar, Doloi ve Bhattacharyya, 2019).

Döner ultrasonik frezeleme (RUSM, Rotary ultrasonic side milling), takımın yörüngesindeki farklılık nedeniyle geleneksel işlemeye kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. Geleneksel imalat (CD) için bir elmas takım kullanıldığında, takıma bağlı elmas taneciklerin yörüngesi Şekil 2.1 A'da gösterildiği gibi düz bir doğru şeklindedir. RUSM prosesinde ise, bir desteğe bağlı ultrasonik güç transmisyon modülü, takım tutucuyu yukarı ve aşağı titreştirir. Ana milin dönmesinin neden olduğu doğrusal

yörünge ve ultrasonik titreşimin yörüngesi Şekil 2.1 B'deki gibi üst üste biner. RUSM' deki zigzag yörünge, kesme kuvvetini ve takım aşınmasını azaltır çünkü aynı mesafe için kesme boyu artar (Choi, Lee, ve Kim, 2022).



Şekil 2.1. Takım üzerindeki elmas taneciklerin yörüngeleri:
A) Geleneksel işleme CM, **B)** RUSM (Choi, Lee ve Kim, 2022)

Choi, Lee, ve Kim (2022) çalışmalarında, kuvars üzerinde RUSM' nin etkilerini analiz etmişlerdir. RSM (yüzey yanıt metodolojisi) kullanılarak, kuvars için işleme parametrelerinin optimum ayarı, minimum kesme kuvveti, min. yüzey pürüzlülüğü ve maksimum MRR için, ilerleme hızı 50 mm/dak., iş mili hızı 4000 rpm, kesme derinliği değeri 0,309 mm ve ultrasonik güç %75,45 olarak belirlenmiştir. Takım yüzeyi ve kuvars yüzey yapıları mikroskop ile değerlendirilmiştir. Analizler, ultrasonik olarak işlenmiş kuvars ve takımların yüzey kalitesinin iyileştiğini doğrulamıştır. Minimum yüzey pürüzlülüğü (SR) 0,968 μm, maksimum MRR 2,32 mm^3/s, minimum kesme kuvveti 3,608 N. bulunmuştur. Ultrasonik gücün %10 uygulandığı deneyde ağır takım

aşınması ve tane kırığı görülmüştür. %90 ultrasonik güç ile yapılan deneyde ise takım aşınması ya çok az görülmüş ya da hiç görülmemiştir.

Silisyum dioksit (yani kuvars), üstün ve mükemmel özellikleri sayesinde geniş mühendislik uygulamaları ile giderek daha fazla öne çıkan modern seramiklerden biri olarak görülmektedir. Bununla birlikte, etkili ve verimli işlenmesi hala araştırma konusudur. SiO_2 'in döner ultrasonik delmesinde delik kalitesinin ölçümleri üzerinde ilerleme hızı, devir, ultrasonik güç ve soğutucu basıncı gibi çeşitli giriş faktörlerinin önemi araştırılmıştır. Deneyler RSM metodu kullanılarak planlanmıştır. Ölçülen çoklu yanıtların optimizasyonu, arzu edilir temelli yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiş ve optimize edilmiş değişken değerlerde, talaş kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gözlemlenmiştir (Singh, Kataria, Singhal, Garg, ve Tyagi 2020).

Sindhu, Thakur ve Chandna (2020), çalışmalarında, kuvars malzemede delik açmak için döner ultrasonik işlemeyi (RUM) kullanmışlardır. Takım ilerleme hızı, takım dönüş hızı ve ultrasonik güç gibi farklı işlem parametrelerinin, kaldırılan malzeme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Merkezi kompozit tasarımlı, yanıt yüzeyi metodolojisini (RSM), deneylerinin tasarımı için kullanmışlardır. Maksimum malzeme kaldırma hızına (MRR) ve minimum yüzey pürüzlülüğüne (SR) ulaşmak için istenilirlik yaklaşımından, döner ultrasonik işlem parametreleri olan takım dönüş hızı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç optimum değerleri sırasıyla, 4968 rpm, 0,55 mm/dak ve %80 olarak bulunmuş, 0,2135 mm^3/s ile maksimum MRR'ye ve 0,3685 μm. ile minimum SR'ye ulaşılmıştır.

Jiao, Lui, Pei, Xin ve Treadwell (2005) çalışmalarında seramik malzemenin döner ultrasonik işlemli delme deneyleri için sabit ilerleme hızı kullanmışlardır. 4 faktörlü, 2 seviyeli deney tasarımı kullanarak, kesme kuvveti üzerinde proses faktörlerinden devir sayısı, ilerleme hızı, ultrasonik güç ve tanecik yapısı gibi başlıca ve ikili etkileri ve çapak kalınlığını araştırmışlardır. Çapak kalınlığını etkileyen en önemli proses faktörlerinin devir sayısı ve ilerleme hızı olduğunu görmüşlerdir. Daha yüksek devir sayısı ve daha düşük ilerleme hızının daha küçük çapak kalınlığı ile sonuçlandığını

belirtmişlerdir. Daha düşük kesme kuvvetinin neredeyse her zaman daha düşük kenar çapağına eşlik ettiği görülmüştür.

Xiao, Yan, Jin, Liu, Sun, ve Tan (2021), ultrasonik ve ultrasonik olmayan taşlama şartları altında, kuvars camın taşlama mekanizmasını çalışmak için, kuvars camın yüzey pürüzlülüğü üzerinde devir, ilerleme ve kesme derinliğinin etkilerini araştırmışlardır. Kuvars camın ultrasonik taşlanmasında, yüzey pürüzlülüğü, devir artışı ile azalmış, ilerleme ve kesme derinliğinin artması ile artmıştır. Kuvars camın ultrasonik olmayan taşlanmasında ise, yüzey pürüzlülüğü, devir artışı ile yine azalmış, ilerlemenin artışı ile artmış, ancak kesme derinliğinin artması ile azalmıştır (Xiao ve diğerleri, 2021).

Cam malzeme, otomotivde, havacılıkta ve ahşap işleme endüstrisinde daha iyi aşınma ve korozyon dayanımı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Kumar (2013) çalışmasında, istatistiksel analiz, deney tasarımı ve regresyon yaklaşımı kullanarak camın ultrasonik işlenmesinin istatiksel analizini yapmıştır. Ultrasonik işleme prosesi kullanılarak işlenmiş numunelerin MRR gibi performans karakteristiği tanıtılmıştır. MRR üzerindeki en önemli parametrenin tane boyutu olduğu görülmüştür.

Döner ultrasonik işleme, çok sert, kırılgan ve elektriksel olarak iletken olmayan malzemeleri verimlilik ve maliyet etkinliğiyle işleme kapasitesine sahiptir. Sindhu ve diğ. (2019), araştırma çalışmalarında, RUM işlem parametrelerini optimize etmek için çok amaçlı Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yapmışlardır. Kuvars malzemenin RUM (döner ultrasonik işleme) sırasında, yüksek MRR (malzeme kaldırma hızı) ve düşük SR (yüzey pürüzlülüğü) elde etmek amacıyla proses parametreleri optimize edilmiştir. Takım ilerleme hızının, MRR ve SR yi en çok etkileyen parametre olduğu bulunmuştur.

Kumar ve Singh (2020) çalışmalarında, BK-7 camının döner ultrasonik işleme performansı üzerinde işleme değişkenlerinin etkilerini ve gri ilişkisel analizi yoluyla çıktı ölçümlerinin eş zamanlı optimizasyonunu araştırmışlardır. Ultrasonik delme işleminde MRR yi ve SR yi en çok arttıran faktörün ilerleme hızı olduğu görülmüştür.

Anwar, Pervaiz, Al-Ahmari, Alkahtani, ve El-Tamimi (2018) çalışmalarında, BK7 cam delme işleminde iş mili hızı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç dahil olmak üzere döner ultrasonik delmenin ana işlem parametrelerinin eksenel kesme kuvveti, çıkış talaş boyutu, yüzey pürüzlülüğü ve silindiriklik ve aşırı kesme hataları açısından delik doğruluğu gibi temel çıktı yanıtları üzerindeki etkilerini sistematik olarak sunmuştur. BK7 cam malzemede delik delmeye özgü döner ultrasonik delme (RUM) sürecinin anlaşılmasını geliştirmişir.

Gagalama delme, talaş tahliyesinin neden olduğu delme torkunu periyodik olarak hafifletmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir; Her adımdaki delme derinliği hem matkap ömrünü hem de işleme verimliliğini doğrudan belirler. Han, Luo, Zhang ve Wu (2018), çalışmalarında gagalama delik delmede talaş kaldırma işleminin delik derinliğine etkisini analiz etmişlerdir. Her delme adımındaki genişletilmiş derinlik ile delme derinliği arasındaki ilişkiyi geliştirmek için talaş kaldırma yoluyla genişletilmiş derinlik katsayısı (EDCbCR) tanıtılmıştır. Modellemenin temelinde, kademeli delmede delme derinliği optimizasyonu için yinelemeli bir öğrenme yöntemi geliştirilmiştir. İşleme verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve matkap kırılmasını önlemek için değiştirilmiş bir Newton yöntemi önerilmiştir.

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP)/titanyum alaşımı (Ti) lamine malzemeler, mükemmel fiziksel ve elektrokimyasal özelliklerinden dolayı havacılık ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Delik açmanın neden olduğu maddi hasarı azaltmak için daha yüksek düzeyde delik açma teknolojisi gerektirir. Liu, Chen, Duan, Suo ve Zuhang (2023) çalışmalarında, yeni bir işleme yöntemi olan Ultrasonik Gagalamalı Delme (UPD) oluşturmak için Ultrasonik Destekli Delme (UAD) ile gagalamalı delmeyi birleştiren yeni bir işleme yöntemi benimsenmiştir. Titanyum alaşımının takım aşınması ve çıkış çapakları farklı parametreler altında üç proses için analiz edilir. Test sonuçları, UPD'nin itme açısından daha iyi performans gösterdiğini, en düşük itme kuvvetinin düşük ilerlemelerde sırasıyla %35,1 ve %14,8 oranında azaldığını göstermektedir. CFRP çıkış delaminasyonu ve takım aşınması da hem CD (geleneksel delme) hem de UAD ile karşılaştırıldığında iyidir. CD ile karşılaştırıldığında maksimum katmanlara ayrılma hasarı %6,37 azaldı. Ayrıca UPD,

pürüzlülüğün yaklaşık %40'a kadar azaltılabileceği daha iyi delik yüzeyi kalitesi sağlar. Elde edilen sonuçlar, UPD'nin CFRP/Ti lamine malzemelerin delinmesi için değerli bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Pervaiz, Deiab ve Kishawy, (2012) çalışmalarında, Al6061 malzemenin kuru koşullar altında geleneksel ve gagalama delme işlemlerinin karşılaştırmalı bir işlenebilirlik çalışmasını sunmuşlardır. Geleneksel delme testleri 10 mm çaplı HSS matkaplar kullanılarak, kademeli delme testleri ise her biri 10 mm'lik adımlar olan 3 adımda gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan yüzeylerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Geleneksel ve kademeli delmenin her ikisinde de benzer matkaplar ve benzer kesme şartları kullanılmıştır. İşlenmiş yüzey kalitesi, takım aşınması, kesme kuvvetleri ve güç tüketimi açısından, geleneksel ve kademeli delme arasında karşılaştırmalı bir deneysel çalışma sunulmuştur. Gagalama delmedeki yüzey kalitesinin daha iyi, takım aşınmasının daha az olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, döner ultrasonik destekli delme işlemi (RUD) ile kuvars malzeme, boru tipi takım kullanılarak delinmiş ve ultrasonik güç, takım dönme hızı (devir sayısı), ilerleme hızı ve gagalama delme derinliği parametrelerinin, çapak alanı (CA), kaldırılan malzeme hacmi (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deformasyon alanı olarak belirlenen çapak alanının kullanılması, literatürde yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile gri ilişki analizi (GRA) yönteminin birlikte çok az kullanılmış olması ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan girdi parametrelerinin seviyelerinden farklı seviyelerde deney şartlarının belirlenmesi çalışmanın özgünlüğünü belirtmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. İş Parçası ve Kuvars Malzemesi

Bu çalışmada döner ultrasonik delme (RUD) prosesini değerlendirmek için iş parçası malzemesi olarak 230 x 420 x 7 mm boyutlarında kuvars cam plaka kullanılmıştır. Kuvars camı, Öğüt Makine tarafından tedarik edilmiştir.

Kuvars'ın formülü SiO2 olup, fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de, kimyasal bileşenleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kuvars camın fiziksel özellikleri

Parametreler	**Değerler**
Yoğunluk	2,21 g/cm^3
Sertlik	5,5-6,5 Mohrs' Scale
Çekme mukavemeti	48 MPa (N/m^2)
Basma mukavemeti	1,1 Gpa (160,000 psi)
Termal genleşme katsayısı	5,8 x 10^{-7} cm/cm°C
Termal iletkenlik	0,00323 Cal/cm °C

Çizelge 3.2. Kuvars camın kimyasal bileşenleri

Chemical element composition (ppm)								
Si	Ca	Mg	Mn	Li	B	K	Na	OH
5,8	1,5	0,5	0,15	1,5	0,07	0,4	1,2	50,0

3.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Cihazlar

Döner ultrasonik destekli imalat (RUD), ultrasonik destek olmadan (geleneksel) yapılan imalat (CM) ile karşılaştırıldığında avantajları vardır (bkz. Şekil 2.1). Kuvars camın döner ultrasonik destekli imalat ile işlenmesi için beş eksen CNC işleme merkezi olan YCM_UV 650 tezgahı kullanılmıştır. CNC tezgahının özellikleri Çizelge 3.3'de, verilmiştir. Ultrasonik işlem girdi değişkenlerini düzenlemek için, ultrasonik güç ünitesi, ultrasonik güç dönüştürücü iletim modülü, takım tutucu ve kontrol paneli gibi parçalar RUD deney düzeneğinin başlıca parçalarıdır. Takım ve takım tutucu arasında rezonans frekansına ulaşmak, kaldırılan malzemenin maksimum olması için önemlidir. Takım ve takım tutucu rezonansta değilse makine aşırı yüklenir. Ultrasonik güç,

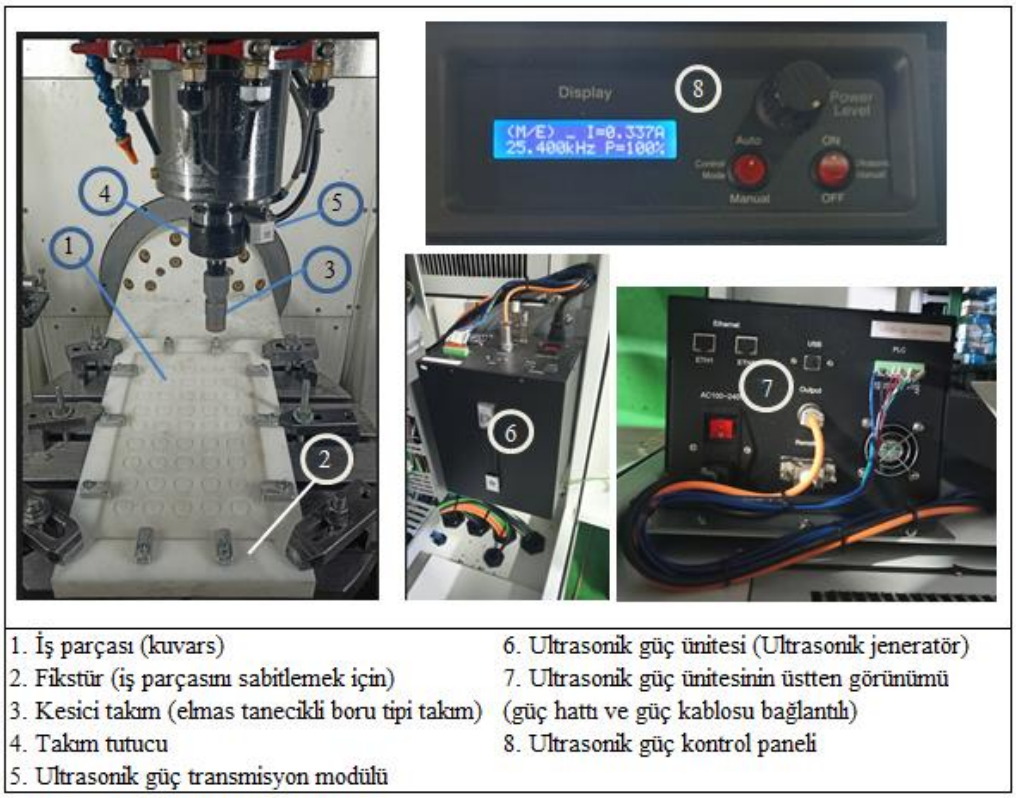
ultrasonik jeneratör tarafından üretilir ve bu güç etkili bir şekilde transmisyon modülünden takım tutucuya iletilir. Kuvars cam levha üzerinde ultrasonik titreşim desteği ile delik delmek için oluşturulan RUD deney düzeneği Şekil 3.1'de, ultrasonik jeneratörün özellikleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. YCM_UV 650 CNC beş eksen işleme merkezinin özellikleri

İş Mili	
İş Mili Hızı (ops.) rpm	12,000 (15,000)
Maksimum İş Mili Motor Gücü (ops.) kW	17 (HEIDENHAIN)
İş Mili Tipi	BBT40
Hareket	
X-Eksen Hareketi mm	620
Y-Eksen Hareketi mm	520
Z-Eksen Hareketi mm	460
B/C-Eksenler	
B-Eksen Rotasyon Aralığı	+50° -110°
C-Eksen Rotasyon Aralığı	+/- 360 °
Tabla	
Tabla Boyutu	Ø650
Maksimum Tabla Üzerindeki Yük kg	Yük-Yatay (0-45°):300 Yük-Tilting (45-90°):200
İlerlemeler	
Hızlı İlerleme (X/Y/Z) m/dak.	36/36/36
Kesme Hızı İlerleme mm/dak	1 - 20,000
B/C Eksen Rotasyon Hızı rpm	25
ATC	
Takım Magazini Kapasitesi (opt.) T	32 (40/48/60)
Maksimum Takım Ağırlığı kg/adet	6
Maksimum Takım Boyutları mm	Ø76 x 250

Çizelge 3.4. UD2H Ultrasonik jeneratör (güç sağlayıcı) setin özellikleri

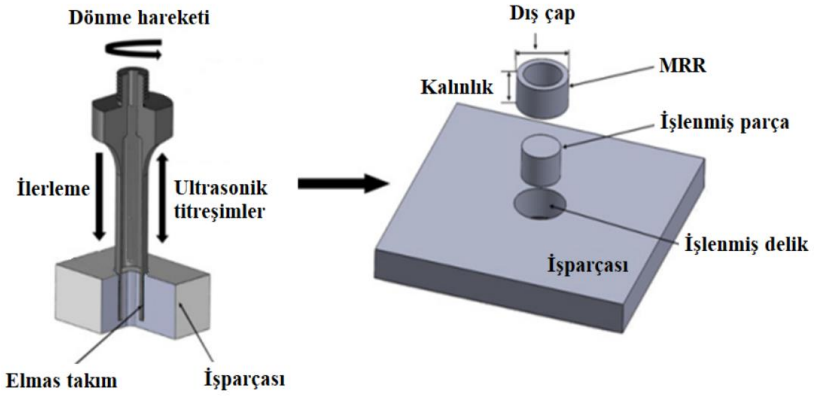
Parametreler	Değerler
Max güç	60 W
Güç ayarı	1 ~ 100 %
Frekans	20 ~ 32 kHz
Giriş voltajı	100 ~ 240 V
Akım	0 ~ 20 A
Genlik	≥ 5 µm



1. İş parçası (kuvars)
2. Fikstür (iş parçasını sabitlemek için)
3. Kesici takım (elmas tanecikli boru tipi takım)
4. Takım tutucu
5. Ultrasonik güç transmisyon modülü
6. Ultrasonik güç ünitesi (Ultrasonik jeneratör)
7. Ultrasonik güç ünitesinin üstten görünümü (güç hattı ve güç kablosu bağlantılı)
8. Ultrasonik güç kontrol paneli

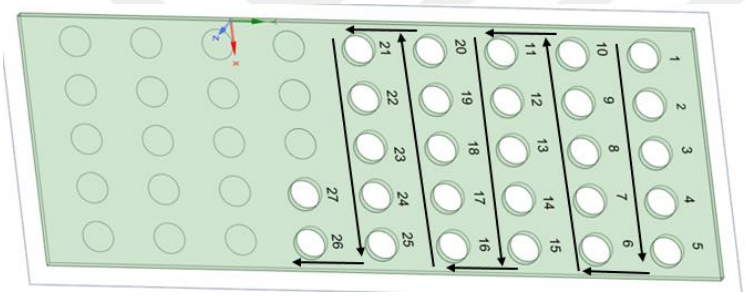
Şekil 3.1. Deney düzeneği

Ultrasonik güç ünitesi, düşük frekanslı elektrik gücünü (60 Hz), yüksek frekanslı elektrik gücüne (yaklaşık 20 kHz) çevirir. Dönüştürücü (trasnducer) ile bu elektrik sinyali mekanik harekete çevrilir. Kaldırılan malzeme hacmi (MRR), ultrasonik makinanın gücü ile de ilgilidir. Ultrasonik güç tedariği, dönüştürücünün boyutuna ve tipine bağlıdır. Şekil 3.2'de RUD prosesindeki malzeme kaldırma işlemi tarif edilmiştir.

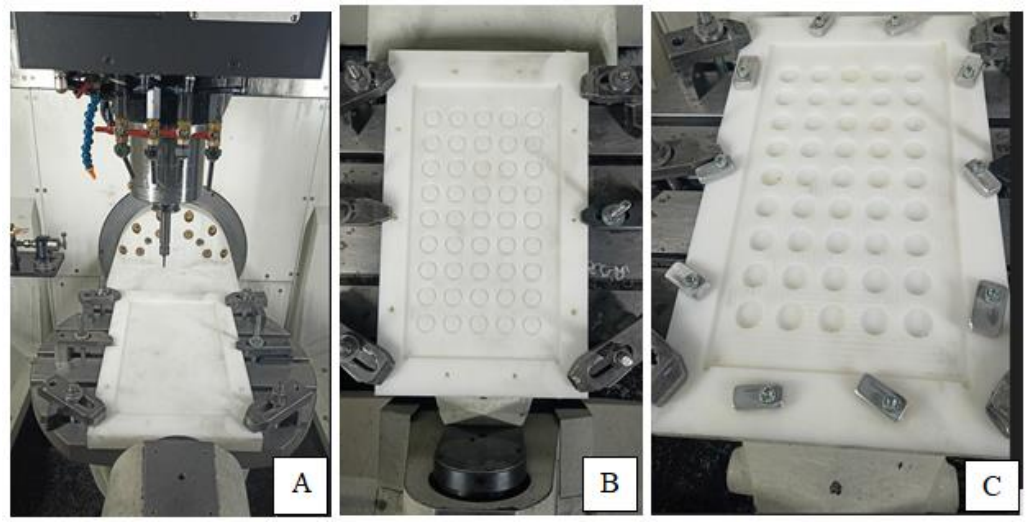


Şekil 3.2. RUD (Döner ultrasonik delme) prosesinde malzeme kaldırma işlemi (Kumar ve Singh, 2020)

Bu çalışmada, alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan döner ultrasonik titreşim destekli delme işlemi ile işlenmesi zor ve kırılgan kuvars cam parçalar üzerinde yapılacak deneylerde kuvars camı doğru sabitlemek ve camın kırılma olasılığını dikkate almak için takım yolunun belirlenmesi ve uygun fikstür seçimi önemlidir. Şekil 3.3'de kuvars camın işlem sırasını gösteren takım yolu gösterilmiştir. Üretimde beş eksen işleme merkezinde kullanılan fikstür Şekil 3.4'deki gibidir. Takım plastiğe değmemesi ve malzemeyi havada tutabilmesi için takımın delme işleminden sonra delikten bir miktar çıkması gerekmektedir. Bu nedenle plastik (kestamit) fikstüre, çap 4 mm'lik parmak freze ile 4 mm derinliğinde kanal açılmıştır (Şekil 3.4.B). YCM UV 650 CNC'de 4RV0 takım kullanılarak fikstür işlenmiştir. Kanal açılmış fikstürde ilk deneme parça işlenirken kesilmiş çap kuvars cam, takım içinde kaldığı için önlem olarak çap 12 mm'lik parmak freze ile düşme yuvası boşaltılmıştır (Şekil 3.4.C).



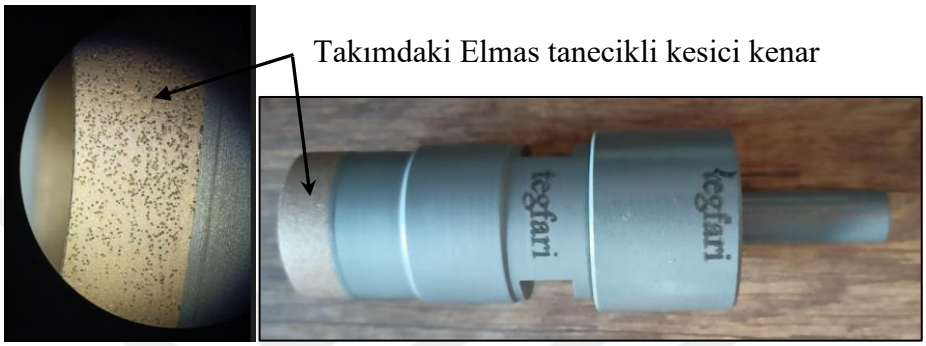
Şekil 3.3. Kuvars camın işlem sırasını gösteren takım yolu



Şekil 3.4. Deney fikstürü ve işlem adımları A) Fikstürün ilk hali B) Kanal açılmış fikstür C) Tam çap delinmiş fikstür

3.3. Takım ve Takım Tutucu

Kuvars cam üzerinde 28 mm çapında delikler delmek için elmas ağızlı cam delme matkap uçlu boru tipi takım kullanılmıştır. Ultrasonik gücün etkin bir şekilde uygulanması için kesici kenarında elmas tanecikleri olan bir takım kullanılmıştır. İç çapı 26 mm, dış çapı 28 mm olan takımın fotoğrafı Şekil 3.5'de verilmiştir.

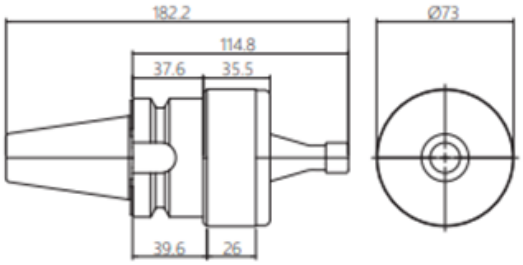


Şekil 3.5. Kesici takım (elmas tanecikli boru tipi takım). **A)** Takım üzerindeki elmas kısmın mikroskop görüntüsü **B)** Boru tipi elmas takım (NØ28 641048, Tegfari)

Takım üzerinde kesici kısımdaki elmas tanecikleri deneyler başlamadan önce Optik Mikroskop (Vision engineering, SX45) kullanılarak Şekil.3.5.A'da görüntülenmiştir.



Şekil 3.6. Takım tutucu (BBT40)



Şekil 3.7. Takım tutucu dış ölçüleri

Takımı tutan takım tutucu, RUD işlemi için ultrasonik dönüştürücüye (transducer) takılır. Deneylerde kullanılan takım tutucu (BBT40, Hit Hantop Intelligence Tech.) fotoğrafı, dış ölçüleri ve özellikleri sırasıyla, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Takım tutucu (BBT40) özellikleri

Model	**BT40**
Balanced quality grade	G2.5
High precision runot	<5µm
Operating frequency	20 kHZ - 32 kHz
Max spindle speed	24000 rpm
Collet types	SK 6 / 10 H6
Weight	2,0 kg
Taper	BT40 / BBT40
ATC	Yes
CTS	Optional (≤ 70 bar)

3.4. Deneylerin Tasarımı

Bu çalışmada yüzey yanıt metodolojisi olan RSM (Response Surface Methodology) metodu kullanılmıştır. Deneylerin tasarımı (DoE), RSM tasarımlarından biri olan Box Bhenken (BBD) tasarımına göre ve istatistiksel yazılım uygulaması olan MINITAB-17 kullanılarak yapılmıştır.

BBD, gömülü faktöriyel ve kesirli faktöriyel tasarımı kapsamayan bağımsız bir ikinci dereceden tasarımdır (Kim ve Lee, 2014). Bu tasarımda işlem birleşimleri, süreç boşluğunun (uzayının) kenarlarının orta noktaları ve merkezinde yer alır. Bu tasarımlar döndürülebilir ve her bir parametrenin en az üç seviyesine ihtiyaç duyar. BBD tasarımları, merkezi kompozit tasarıma (CCD) kıyasla ortogonal engelleme için sınırlı bir uygunluğa sahiptir. BBD tasarımları, normal faktöriyel yönteme göre daha az gerekli deney kullanan daha yüksek dereceli yanıt yüzeyleri oluşturmak için benimsenmiştir. Optimize edilecek birçok parametre olduğunda yapılacak deneylerin sayısı azaltılmış olur ve böylece zamandan ve maliyetten kazanılır.

Bu deneyde kullanılan dört parametre, ultrasonik güç (P), devir sayısı (n), ilerleme hızı (V_f) ve gagalama delme derinliği (dp)'dir. Deney sonuçları yani yanıtlar ise, performans karakteristikleri olarak seçilen çapak alanı (CA), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve kaldırılan

malzeme hacmi (MRR)' dir. Bu sonuçlar ölçülür ve hesaplanır. Minimum çapak alanı, minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum kaldırılan malzeme hacmi hedeflenen sonuçlar olup, bu sonuçlara aynı anda ulaşacak parametreleri optimize etmek için çoklu yanıt optimizasyonu kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmasını az sayıda deneyle yapabilmek için BBD tasarımına göre oluşturulan deney planında kullanılan parametreler ve seviyeleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. RUD Proses girdi faktörleri (parametreleri) ve seviyeleri

Semboller	**Parametreler**	**Seviye 1 (-1)**	**Seviye 2 (0)**	**Seviye 3 (+1)**
P	Ultrasonik güç (%) (Ultrasonic power	30	60	90
n	Devir sayısı (rpm) (Spindle speed)	1000	1300	1600
V_f	İlerleme hızı (mm/dak) (Feed rate)	10	20	30
dp	Gagalama delme derinliği (mm) (Pecking drilling depth)	0,40	0,75	1,10

RSM metodundaki BBD tasarımına göre hazırlanan 27 deneyin deneysel tasarım planı Çizelge 3.7'de verilmiştir.

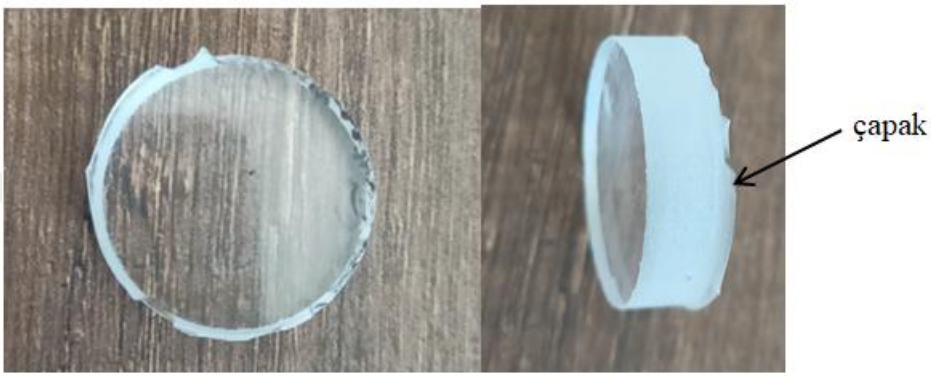
Çizelge 3.7. Deney tasarımı (DoE)

Deney No	Parametreler (Faktörler)			
	P	**n**	**V_f**	**dp**
	Ultrasonik güç (%)	**Devir sayısı (rpm)**	**İlerleme hızı (mm/dak)**	**Gagalama delme derinliği (mm)**
1	30	1000	20	0,75
2	30	1300	10	0,75
3	30	1300	20	0,40
4	30	1300	20	1,10
5	30	1300	30	0,75
6	30	1600	20	0,75
7	60	1000	10	0,75
8	60	1000	20	0,40
9	60	1000	20	1,10
10	60	1000	30	0,75
11	60	1300	10	0,40
12	60	1300	10	1,10
13	60	1300	20	0,75
14	60	1300	20	0,75
15	60	1300	20	0,75
16	60	1300	30	0,40
17	60	1300	30	1,10
18	60	1600	10	0,75
19	60	1600	20	0,40
20	60	1600	20	1,10
21	60	1600	30	0,75
22	90	1000	20	0,75
23	90	1300	10	0,75
24	90	1300	20	0,40
25	90	1300	20	1,10
26	90	1300	30	0,75
27	90	1600	20	0,75

3.5. Ölçüm Metodu

3.5.1. Çapak alanı ölçümü ve hesaplama metodu

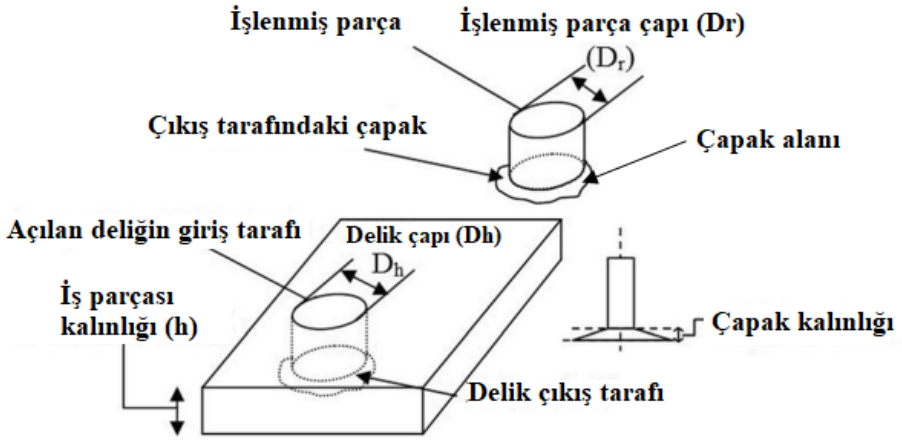
Çapak alanı hesabı için önce RUD prosesi ile işlenmiş parçaların (Şekil 3.8) çapı dijital kumpas ile ölçülür (Şekil 3.9). Çapaklı yüzey, parçanın takımdan çıktığı alt yüzeyde oluşmaktadır.



Şekil 3.8. Bitmiş parçadaki çapak görüntüsü



Şekil 3.9. Dijital kumpas ile çap ölçümü



Şekil 3.10. RUD ile açılan deliğin ve çıkartılan parçanın geometrisi (Singh, Kataria, Singhal, Garg ve Tyagi, 2020)

Çapak alanını hesaplamak için bitmiş parçaların, Şekil 3.11'de görülen 0,0005 mm çözünürlüklü Profil Projeksiyon (CPJ-3025AZ, Digital Measuring Projector, Rational Precision Instruments Co. Ltd., 100601_01) üzerinden fotoğrafları alınıp, GIMP 2.10 programına yüklenerek, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi parçanın alt yüzeyinde oluşan çapaklı (çıkıntılı) ve deformasyonlu (girintili) kısımda kalan alandaki piksel sayıları bulunur. (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) nolu eşitlikler kullanılarak çapak alanı hesaplanır.



Şekil 3.11. Kuvars parçanın Profil Projeksiyon (CPJ-3025AZ) üzerindeki görüntüsü

GIMP'deki parça görüntüsünde çapak alanına karşılık gelen piksel sayısı CAp'dir. X1p, GIMP de görünen parça fotoğrafında çapın x eksenindeki ilk koordinatı, X2p ise aynı eksen üzerindeki ikinci koordinatıdır. Δ xp (piksel), x2p (piksel) ile x1p (piksel)'nin farkı olup, piksel cinsinden çaptır ve eşitlik (3.1) ile tanımlanır.

$$\Delta xp = x2p - x1p \tag{3.1}$$

Diç (mm), kuvars parça çapıdır. Lp, 1 pikselin mm olarak uzunluğudur ve (3.2) eşitliği ile hesaplanır.

$$Lp = Diç / \Delta xp \tag{3.2}$$

Ap (mm^2/piksel), 1 piksel'in mm^2 cinsinden alanı olup, (3.3) eşitliği ile hesaplanır.

$$Ap = Lp \times Lp \tag{3.3}$$

Ap ile çapaklı alandaki piksel sayısı olan CAp'nin çarpımı, eşitlik (3.4) ile gösterilen çapak alanı CA'yı verir.

$$CA = Ap \times CAp \tag{3.4}$$

Çapak alanının ne şekilde hesaplandığı 'Bulgular ve Tartışma' bölümünde verilmiştir.

3.5.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

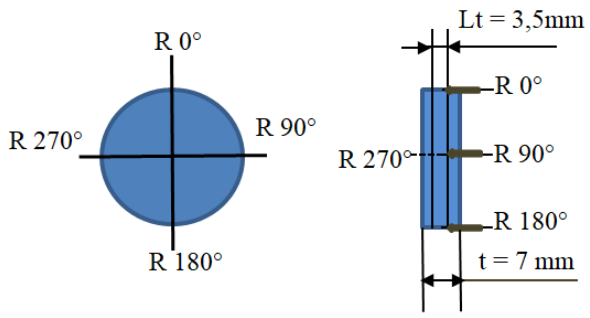
Yüzey pürüzlülüğü, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Mahr Marsurf PS10) ile ölçülmüştür (Şekil 3.12). Aynı parçanın kesme yüzeyi üzerinde farklı 4 noktadan (Şekil 3.13), ölçüm yapılıp, bu ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak ölçüm sonuçlarına kaydedilir. Ölçümlerin ortalaması için eşitlik (3.5) kullanılmıştır.

$$Ra \text{ ortalama} = (Ra\ 0° + Ra\ 90° + Ra\ 180° + \text{Ra } 270°) / 4 \tag{3.5}$$



Şekil 3.12. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Mahr MarSurf PS 10)

Parça kalınlığı (t) 7 mm, tarama uzunluğu (Lt) 3,5 mm'dir.



Şekil 3.13. Yüzey pürüzlülük ölçümü için aynı parça üzerindeki ölçüm noktaları

3.5.3. Gagalama delme için kaldırılan malzeme hacmi ölçümü ve hesaplama metodu

MRR ile gösterilen kaldırılan malzeme hacmi, birim zamanda işleme derecesini gösterir. Bu nedenle birim zamanda kaldırılan malzeme hacmini hesaplamak için gereklidir.

Standart delme operasyonu için kaldırılan malzeme hacmi (MRR), kesme alanı ile ilerleme hızının çarpımına eşit olup aşağıdaki (3.6) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$MRR_n = \pi\left(\frac{D_d^2 - D_i^2}{4}\right) \times Vf_n \qquad (3.6)$$

Dd'nin takım dış çapı (delik çapı) olduğu yerde, Di takım iç çapı (parça dış çapı) dır. $V_{f\,n}$, doğrusal ilerleme hızıdır.

Standart delmeden farklı olan gagalama delme (bkz. Şekil 3.14) operasyonundaki MRR hesabı için, matematiksel formülasyon (3.7) eşitliğinde verilmiştir (Jain ve Pandey, 2016).

$$MRR_n = \pi\left(\frac{D_d^2 - D_i^2}{((t + NS)/Vf_n) + ((2RN - NS + N^2 d_p)/Vf_0)}\right)[t] \qquad (3.7)$$

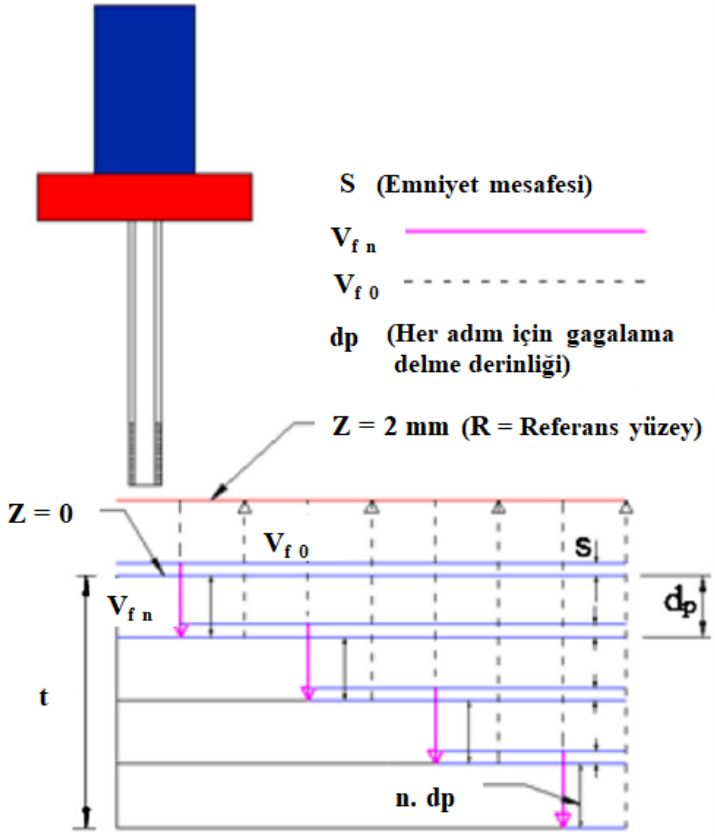
$$N = t / dp \tag{3.8}$$

$V_{f\,0}$, hızlı ilerleme hızıdır. S, emniyet mesafesidir. R, referans yüzeydir. N, gagalama delme işlemindeki adım sayısıdır ve eşitlik (3.8)'deki gibi kalınlığın, gagalama delme derinliğine bölümü ile hesaplanır. Eşitlik (3.7) ile bulunan MRR sonucunun birimi mm^3/dak olduğu için 60 saniyeye bölünüp, mm^3/s birimi cinsinden MRR hesap tablosuna eklenir (bkz. Çizelge 4.4).

MRR'nin teorikte ilerleme hızı ile doğrudan orantılı olduğu varsayılabilir. Ancak pratikte ultrasonik enerji de dahil olduğu için teorik değerlerden farklıdır. Malzeme özellikleri ve takımın yanal titreşimleri, MRR üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Gagalama delme işlemi Şekil 3.14'de görüldüğü gibi, bir delme metodudur. Gagalama delme çevrimi, doğrusal ilerleme hızı ($V_{f\,n}$) ile iş parçasına gagalama başına delme derinliği (dp) ya da her adımdaki mesafe hareketi adı verilen küçük kesimler alan, talaşları kırmak ve ısıyı dağıtmak için referans düzlemine (R) hızlı bir şekilde geri çekilen ($V_{f\,0}$), ve son delinmiş derinliğe hızlı bir şekilde geri dönüp ($V_{f\,0}$), başka bir küçük kesim yapan ($V_{f\,n}$) ve tekrar geri dönen ($V_{f\,0}$), tam delinmiş derinliğe (t) ulaşana kadar bu şekilde devam eden bir delme yöntemidir.

R 2 mm, S 0,1 mm, ve $V_{f\,0}$ 6000 mm/dak olarak alınmıştır. $V_{f\,n}$ için deney tasarımında 27 kuvars parça için ayrı ayrı belirtilen ilerleme hızları kullanılmıştır. t, toplam delinmiş derinliktir. N adım sayısı, yani toplam delinmiş derinlikteki gagalama delme sayısıdır ve N = t / dp ile hesaplanır.



Şekil 3.14. MRR hesabı için gagalama delme çevrimi (Jain ve Pandey, 2016)

3.6. Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA (varyans analizi), kontrol faktörlerinin (parametrelerin) deneysel sonuçların üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir metoddur. ANOVA ile parametrelerin sonuç değerlerini ne kadar etkilediği ve farklı seviyelerde hangi oranda etkilediği tespit edilmektedir. Model yeterliliği kontrolü, regresyon modeli testini, model katsayılarının anlamlılık testini ve uyum eksikliği testini içerir. Bu amaçla, geliştirilmiş modeldeki parametrelerin önemini ve katkılarını, sonuçlar üzerinde kontrol etmek için varyans analiz (ANOVA) testi uygulanmıştır.

ANOVA'da kontrol parametrelerinin (faktörlerinin) F değeri, kontrol faktörlerinin önemini belirtir. Parametrelerdeki değişikliğin, yanıtlar üzerindeki önemi F değeri ile tahmin edilir (Sindhu, Thakur ve Chandna, 2019). büyük bir F değerinin sonuç üzerinde önemli etkisi vardır.

ANOVA'da p değeri (< 0,05), %95 üzeri bir güvenlik seviyesine karşılık geldiğinde, modelin önemi istatistiksel olarak teyid edilebilir (Choi, Lee ve Kim, 2022). Tüm değişkenler için p değeri üzerinden istatistiksel olarak önemli faktörler belirlenir (Jiao, Lui, Pei, Xin ve Treadwell, 2005).

ANOVA'da p değeri küçüldükçe istatistiksel olarak anlamlı farklılığın kanıtı artar. İstatistiksel çalışma sonucunda bulunan p değerlerinin 0,05'den büyük olması durumunda ise, istatistiksel olarak önemli bir fark bulunmamıştır derken p değerinin ne olduğunu da belirtmek gerekir. 0,05'den büyük olan p değerleri raporlandığında, sonuç aynı yönde olsa da araştırmacı, çalışma sonuçlarının güvenilirlik dereceleri arasında büyük farklılıkların olduğunu anlayabilir. Bu nedenle p'nin gerçek değeri belirtilmelidir. Çalışmalardaki tekrar sayısı arttıkça, p değerinin düştüğü görülmüştür.Tekrar sayısının fazla olduğu çalışmalarda elde edilecek deneysel hata, tekrar sayısının düşük olduğu çalışmalara göre daha azdır. Aynı muameleye tabi tutulan deney ünitelerinin ölçüm değerleri arasındaki farklılıkların (varyasyonun) fazla olması, istatistik analizler sonucunda bulunan p değerinin 0,05'ten büyük olmasına yol açmaktadır (Mendeş, Subaşı, ve Başpınar, 2005).

ANOVA'daki p değerinin alfa değerinden (genellikle 0,05) büyük çıkması durumunda sonucun anlamlı olabileceği veya anlamsız çıkmasının örneklem büyüklüğünden kaynaklanıp kaynaklanmadığı irdelenmelidir (Akbulut, 2024).

Regresyon analizi ile %95 güven aralığında olan yanıtları tahmin etmek için deney sonuçlarının analizi sonrası elde edilen modellerde, R^2'nin yüksek olması regresyon model uyumunun iyi olduğunu gösterir. Model karmaşıklığını azaltmak ve anlaşılabilir, yorumlanabilir modeller oluşturmak için hedef değişkene etkisi olmayan, az olan, etkisi ihmal edilebilen değişkenler modele dahil edilmez. Bu sebeple iyilik uyum indeksi kullanırken R^2 geliştirilerek düzeltilmiş R^2 (adjusted) kullanılmaktadır.

Düzeltilmiş R^2 (adjusted), modeldeki terim sayısına göre ayarlanır. Değeri yalnızca yeni terim model uyumunu beklenenden daha fazla iyileştirdiğinde artar, terim model uyumunu yeterli miktarda iyileştirmediğinde azalır.

Bir regresyon modelinin, tahminleri ne kadar iyi yaptığını belirlemek için öngörülen (tahmin edilen) R^2 (predicted) kullanılır. Bu istatistik, modelin mevcut veriler için iyi bir uyum sağladığı ancak tahminlerde o kadar iyi olmadığı durumların belirlenmesine yardımcı olur.

3.7. Parametrelerin Optimizasyonu için Kullanılan Yöntemler

Varyans analizi (ANOVA) ile parametrelerin yanıtlar üzerindeki önem ve katkıları görülmüştür. Optimal çözümler için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan biri arzu edilebilir yaklaşımlı çoklu optimizasyon için Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) optimal çözümü, diğeri ise çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Gri İlişki Analizi (GRA)'dir.

3.7.1. Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM)

Yanıt yüzey yöntemi (RSM) sadece optimizasyon amaçlı değil, aynı zamanda işlem değişkenlerinin ayrı ayrı ve birbirleriyle etkileşimlerinin sonuçlar (yanıtlar) üzerine etkilerinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

Çizelge 3.8. Kuvarsın RUD ile işlenmesinde yanıt yüzey yöntemi (RSM)'nin kullanıldığı optimizasyon çalışmaları

İşlem	Tasarım yöntemi	Değişken sayısı	Yanıt sayısı	Model	Optimizasyon yaklaşımı
RUD işlemi	RSM_BBD	4	3	2.derece polinomiyal	Desirability (istenilen hedefe ulaşma/ arzu edilebilirlik) Fonksiyonu

Yanıt yüzey analizi ile deney tasarımında regresyon analizi ile elde edilen sonuçlar değerlendirilir. Optimum seviyeler, en düşük ve en yüksek seviyeli faktörler arasında herhangi bir noktada, minimum SR, minimum CA ve maksimum MRR'yi veren seviyeler olarak belirlenir.

Box Behnken deney tasarımında deney noktaları köşelerde değil, kübün üzerindedir. Çeşitli terimlerin eklenip çıkarılmasıyla, en yüksek düzeltilmiş regresyon katsayısı

($R^2_{düzeltilmiş}$) değerini veren model belirlenmiştir. Modeldeki terimler, deney sistemi üzerinde etkisi olan ana etkiler, ikinci dereceden etkiler ve faktörler arasındaki etkileşimlerdir (Savaşkan, 2003).

RUD prosesinde, iyileştirilmiş proses performansına ulaşmak için işlem parametrelerinin optimal kombinasyonunun seçimi önemlidir. Çok amaçlı optimizasyon metodlarından biri, arzu edilebilir yaklaşımdır. Arzu edilebilirlik (desirability) di değeri 0 ile 1 arasındadır. Kabul edilemeyen yanıtlar için di, 0 değerini alırken, ideal durumda 1 değerini alır. Maksimize, minimize edilecek ya da hedef değer alınması durumuna göre farklı arzu edilebilir fonksiyonlar kullanılabilir. Bireysel arzu edilebilirliğin ağırlıklı geometrik ortalaması, yanıtların kompozit arzu edilebilirliği (composite desirability) dir. Optimum şartlarda kompozit arzu edilebilirlik (D) maksimumdur ve aşağıdaki gibi eşitlik (3.9) ile hesaplanır (Sindhu, Thakur ve Chandna, 2020).

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \ldots\ldots \times d_i)^{1/i} \quad (3.9)$$

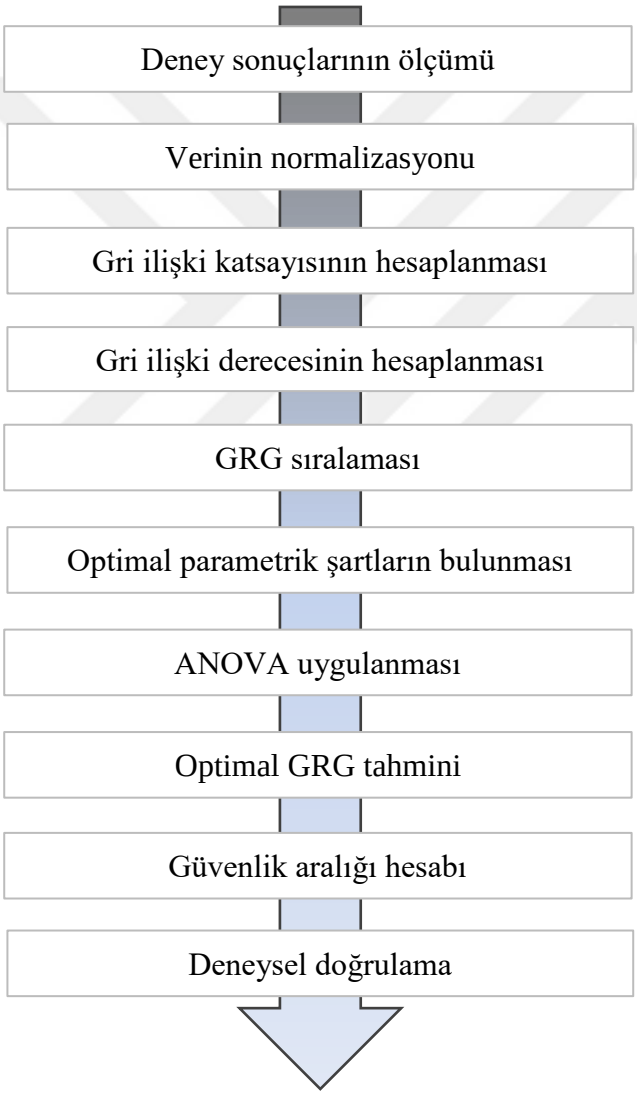
Kompozit arzu edilebilirlik ‘D’ ile, her bir yanıt için arzu edilebilirlik ‘d’ ile, optimize edilecek yanıtların sayısı ‘i’ ile gösterilmiştir.
Ağırlık dikkate alındığında D hesabı için (3.10) eşitliği kullanılır (Naveen Sait, Aravindan ve Haq, 2009).

$$D = (d_1^{w1} \times d_2^{w2} \times d_3^{w3} \times \ldots\ldots \times d_i^{wi})^{1/w} \quad (3.10)$$

wi, yanıtın ağırlığıdır, w ise yanıtların ağırlıklarının toplamıdır.

3.7.2. Gri İlişki Analizi Yöntemi (GRA)

Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemi, çok kriterli karar verme tekniklerinden biridir. GRA, çoklu yanıt optimizasyon problemlerini tek amaç fonksiyonuna dönüştürerek problemlerin çözülmesinde yardımcı olur. GRA, 1982'de Dr. Julong Deng tarafından geliştirilmiştir. Siyah renk bilginin olmayışını anlatır, beyaz renk ise tam bilgiyi belirtir. Gri, beyaz ve siyahın karışımı olup, beyaz ve siyah arasındaki bilgiyi gösterir. GRA metodolojisinin adımları Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. GRA Metodolojisi

GRA'yı temel alan modellerde, bir sistemdeki bileşenler arasındaki ilişkiler hesaplanmıştır ve daha sonra ayırt edici dağılım için ilişkisel tabanlı bir derece sistemi ile birlikte deneyin sonuçlarıyla ölçülür. Bir sistemin iki bileşeni arasındaki ilişki daha güçlüyse, o zaman GRG'nin daha büyük bir değerine katkıda bulunur. GRG'nin değerlendirme sürecinde, her bir çıkış ve giriş değişkeni ayırt edici aralığa ve karşılık gelen birimlere sahiptir. Kesin olmayan sonuçların üretilmemesi için, gerçek verilerin normalleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Srinivasan, Sevvel, Dhanesh Babu ve Roy, 2024).

Tek bir veri serisindeki birimlerin ve aralığın diğerlerinden farklılık gösterebileceği gerçeği göz önüne alındığında, verilerin normalleştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla verilerin doğrusal normalleştirilmesi, orijinal diziyi karşılaştırılabilir diziye dönüştürerek yapılır.

Deney sonuçları normalize edilirken, gri ilişki yönteminde ″daha yüksek daha iyi″ ye karşılık gelen aşıdaki eşitlik kullanılır (Marturi, Kolli, Kumar, Reddy ve Dasari, 2020). MRR için ″daha yüksek daha iyi″ olan (3.11) eşitliği kullanılır.

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - miny_i(k)}{maxy_i(k) - miny_i(k)} \tag{3.11}$$

″Daha düşük daha iyi″' durumunda orijinal dizin aşağıdaki gibi normalize edilir.
SR ve CA için ″daha düşük daha iyi″ olan (3.12) eşitliği kullanılır.

$$x_i\ (k) = \frac{maxy_i(k) - y_i(k)}{maxy_i(k) - miny_i(k)} \tag{3.12}$$

″Nominal daha iyi″ durumunda ise, kesin bir hedef değere ulaşılmışsa orijinal dizin aşağıda verilen (3.13) eşitliğindeki gibi normalize edilir.

$$x_i(k) = 1 - \frac{|y_i(k) - OB|}{max\{maxy_i(k) - OB, OB - miny_i(k)\}} \tag{3.13}$$

OB, hedef değerdir. Bunun yerine, orijinal diziyi dizinin ilk değerine bölerek yerel sıra *xi (k) = yi (k) / yi*(1) şeklinde normalleştirilebilir.
xi (k) değeri, gri ilişki oluşumundan sonraki değerdir, *yi (k)* orijinal dizindir, *max yi (k)* k. yanıt için, min *yi (k)*'nın en geniş değeridir. *Min yi(k), yi (k)*'nın en küçük değeri olup, istenilen değerdir.

Yanıtlar için *yi (k) (k*=1, 2, 3*....., m)* ideal dizidir. Gerçek ve ideal dizi arasındaki ilişkiyi kurmak amacıyla normalize edilmiş deneysel sonuçlar için, aşağıdaki eşitlik (3.14) ile gri ilişki katsayısı (GRC) hesaplanır.

$$GRC = \xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta\Delta_{max}} \tag{3.14}$$

ζ değeri, 0 ile 1 arasında olan tanımlama katsayısıdır. Bu değer genellikle 0,5 olarak kabul edilir.

$\Delta_{0i}(k)$, x0(k) ile xi(k) arasındaki farkın değeridir. Bu değer uzaklık matrisi olup, normalizasyondan sonra eşitlik (3.15) ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(k) = ||\mathrm{x}_0(k) - \mathrm{x}_i(k)|| \tag{3.15}$$

GRA'da, gri ilişki katsayısı (GRC) bulunup uzaklık matrisi hesaplandıktan sonraki adım gri ilişki derecesi (seviyesi) olan GRG'yi bulmaktır. GRG, gri ilişki katsayılarının ortalaması alınarak bulunur. Gri ilişki derecesi GRG (γ), (3.16) eşitliği ile hesaplanır.

$$\gamma_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \xi_i(k) \tag{3.16}$$

Gri ilişki derecesi (GRG), karşılaştırılabilir diziler ile referans diziler arasındaki bağlantıyı gösterir. Bu yüzden en yüksek GRG, en iyi performans şartlarını verir (Tosun ve Pihtili, 2010).

Önemli bir gerekçe olmadan, yanıtların ağırlıkları, önem artırmak veya azaltmak için seçilmemelidir. Çalışmaların çoğunda olduğu gibi bu çalışmada da yanıtların ağırlıkları eşit olarak belirlenmiştir. Ağırlıklı GRG, (3.17) eşitliği ile hesaplanır.

$$\gamma_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} w1\ (\xi_i(k)) + \cdots +\ wi\ (\ \xi_i(k)\ ) \tag{3.17}$$

wi yanıtların ağırlıklarıdır. Her bir yanıtın normalize edilmiş ağırlık faktörünü göstermektedir.

GRG değeri hesaplandıktan sonra, çoklu performans özelliklerinin problemi, GRG'nin tek başına optimizasyonuna dönüştürülür. Bu nedenle, girdi faktörlerinin her bir seviyesindeki GRG'lerin ortalaması kullanılarak, yeni ortalama GRG'ler hesaplanır (Sindhu, Thakur ve Chandna, 2019).

GRG'nin tahmin edilen değeri olan GRG p değeri, aşağıda verilen eşitlik (3.18) ile optimum şartlar için hesaplanır (Kumar ve Singh, 2020).

$$Rp = Rm + \sum_{i=1}^{q}(Ri - Rm) \tag{3.18}$$

Yukarıdaki eşitlikte, GRG'nin tahmin edilen (predicted) değeri, Rp'dir (Rp = GRG p). Ortalama GRG, Rm'dir (Rm = GRG m). Parametrenin seviyesine ait ortalama GRG, Ri'dir (Ri = GRG iL). i, parametredir. L, parametrenin seviyesidir.

Tahmin edilen (predicted) değerin güvenilirliğini kontrol etmek için, güven aralığı (C.I.) hesaplanır. Bunun için GRG nin güven aralığı hesabında aşağıdaki (3.19) ve (3.20) eşitlikleri kullanılır.

$$\text{C.}I. = \sqrt{F\alpha\ (n1, n2)\ x\ Ve\ x\ [\frac{1}{neff} + \frac{1}{R}\ ]} \tag{3.19}$$

$$\eta\text{eff} = \text{N} / (\ 1 + \text{DOF}_\text{F}\ ) \tag{3.20}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, α % önem seviyesindeki F oranıdır. $\eta 1$ her zaman 1'dir. $\eta 2$, fe değerine eşittir ve bu değer ANOVA tablosunda hata ile ilgili olan serbestlik derecesidir. $F\alpha(\eta 1,\eta 2)$, % 95 güvenilirlik seviyesi için F tablosundan okunur (Savaşkan, 2003). Ve, hata için ortalama kareler değeri ya da hata varyansıdır ve ANOVA tablosundan okunur. R, doğrulama deneylerinin sayısıdır. ηeff, etkin testlerin sayısıdır. N, toplam yapılan deney sayısıdır. DOF_F, önemli faktörlerle birleşmiş serbestlik derecelerinin toplamıdır.

GRA yöntemi ile bulunan optimum şartlar için, hesaplanan tahmin değeri olan GRG p değeri ve güven aralığı olan C.I. aşağıdaki eşitlikte yazılarak GRG exp için deney aralığı bulunur.

$$GRG\ p - C.I. \leq GRG\ exp \leq GRG\ p + C.I. \tag{3.21}$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Deney Sonuçları

Yanıt yüzey yöntemi RSM'nin tasarımlarından BBD deney tasarımına göre oluşturulan deney şartlarında, ultrasonik destekli olarak işlenen kuvars parçaların ölçüm sonuçları, seçilen yanıtları olan çapak alanı (CA), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve kaldırılan malzeme hacmi (MRR) hesaplanarak bulunmuş ve tüm sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçları

Deney No	Parametreler (Faktörler)				Sonuçlar		
	P	n	Vf	dp	CA	SR	MRR
	Ultrasonik güç (%)	Devir sayısı (rpm)	İlerleme hızı (mm/dak)	Gagalama delme derinliği (mm)	Çapak alanı (mm^2)	Yüzey pürüzlülüğü Ra ort. (µm)	Kaldırılan malzeme hacmi (mm^3/s)
1	30	1000	20	0,75	177,779	2,039	101,816
2	30	1300	10	0,75	221,711	1,943	51,265
3	30	1300	20	0,40	64,712	1,601	96,012
4	30	1300	20	1,10	64,813	1,607	105,783
5	30	1300	30	0,75	76,719	1,735	154,506
6	30	1600	20	0,75	62,433	1,370	101,816
7	60	1000	10	0,75	82,170	1,090	51,740
8	60	1000	20	0,40	72,289	1,626	94,288
9	60	1000	20	1,10	180,864	1,514	107,017
10	60	1000	30	0,75	142,343	1,861	154,862
11	60	1300	10	0,40	67,309	0,653	47,036
12	60	1300	10	1,10	71,241	0,741	53,755
13	60	1300	20	0,75	59,801	0,920	103,479
14	60	1300	20	0,75	59,527	0,845	103,716
15	60	1300	20	0,75	71,282	0,944	103,716
16	60	1300	30	0,40	69,724	1,139	141,431
17	60	1300	30	1,10	184,431	1,341	169,755
18	60	1600	10	0,75	66,088	0,672	56,233
19	60	1600	20	0,40	119,376	1,073	102,884
20	60	1600	20	1,10	47,421	1,236	112,679
21	60	1600	30	0,75	92,105	1,284	162,325
22	90	1000	20	0,75	77,223	1,291	107,507
23	90	1300	10	0,75	126,532	0,938	53,754
24	90	1300	20	0,40	90,468	1,046	98,594
25	90	1300	20	1,10	80,946	1,203	111,696
26	90	1300	30	0,75	56,962	1,222	162,680
27	90	1600	20	0,75	81,164	0,976	108,453

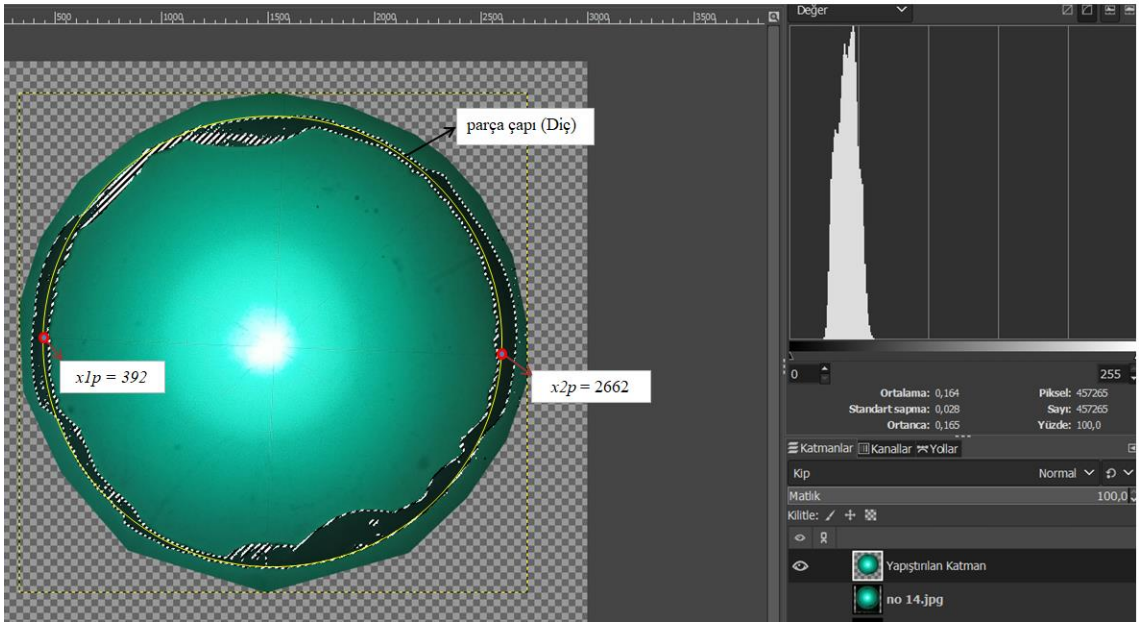
4.1.1. Çapak alanı ölçüm sonucu

Çapak alanı (CA) hesabı için ‘Materyal ve Yöntem’ bölümünün ‘Ölçüm Metodu’ kısmında verilen (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitlikleri kullanılarak çapak alanı hesaplanır.

Ultrasonik gücün %60, devir sayısının 1300 rpm, ilerleme hızının 20 mm/dak ve gagalama delme derinliğinin 0,75 mm olduğu RUD proses şartlarında üretilen 14 nolu parçanın Şekil 4.1’de görülen çapak alanının değeri 59,527 mm^2 olarak bulunmuştur.

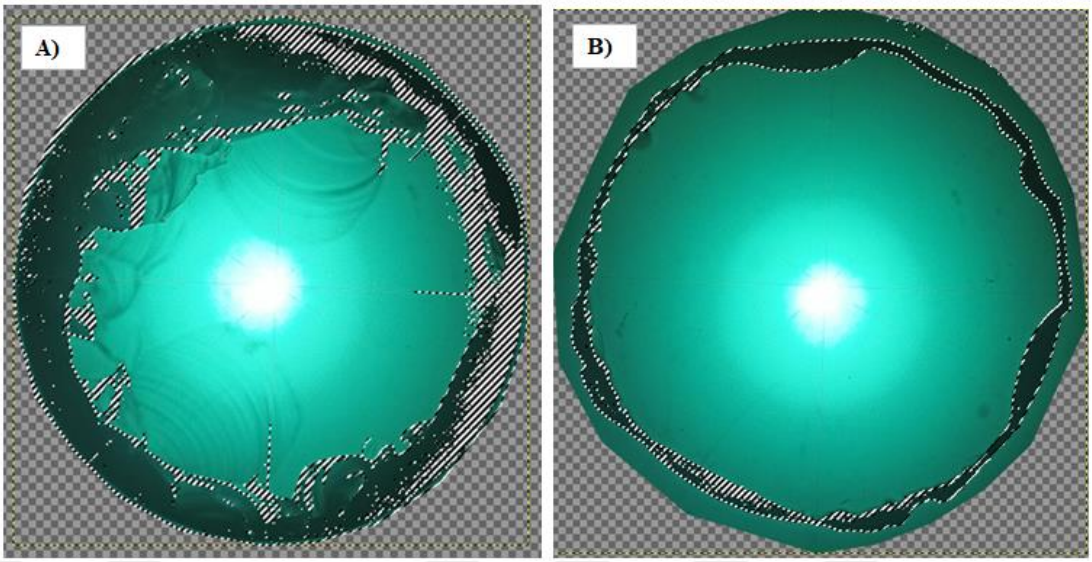
Deney No. 14 (P = % 60, n = 1300 rpm, Vf = 20 mm/dak, dp =0,75 mm)
GIMP de Çapak alanı
Pixel sayısı: 457265 CA (14) = 59,527 mm^2

x 1p	*x 2p*	*Δxp*	*CAp*	*Diç*	*Lp*	*Ap*	*CA*
392	2662	2270	457265	25,9	0,01141	0,00013	59,527
CA = CAp x Ap							



Şekil 4.1. RUD prosesi ile üretilen 14 nolu deney parçasının GIMP’deki görüntüsü

Çapak alanı maksimum ve minimum olan parçaların görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Çapak alanı maksimum bulunan 2 nolu deneyin proses şartları P = % 30, n = 1300 rpm, V_f = 10 mm/dak, dp = 0,75 mm’dir. Çapak alanı minimum bulunan 20 nolu deneyin proses şartları ise P = % 60, n = 1600 rpm, V_f = 20 mm/dak, dp = 1,10 mm’dir.



Şekil 4.2. Çapak alanı maksimum ve minimum olan parçaların GIMP görüntüleri. **A)** Deney no. 2 (Maks. CA = 221,711 mm^2), **B)** Deney no. 20 (Min. CA = 47,421 mm^2)

Ultrasonik destekli işlenen 27 deney numunesinin çapak alanı (CA) değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çapak alanı (CA) hesap tablosu

Deney No	x1 p (piksel)	x2 p (piksel)	Δ xp (piksel)	CAp (piksel)	Diç (mm)	Lp (mm/piksel)	Ap (mm^2/piksel)	CA (mm^2)
1	368	2660	2292	1387934	25,940	0,01132	0,00013	177,779
2	401	2595	2194	1587899	25,925	0,01182	0,00014	221,711
3	435	2615	2180	459873	25,860	0,01186	0,00014	64,712
4	428	2560	2132	437824	25,940	0,01217	0,00015	64,813
5	322	2588	2266	586571	25,915	0,01144	0,00013	76,719
6	369	2571	2202	449891	25,940	0,01178	0,00014	62,433
7	457	2563	2106	543082	25,905	0,01230	0,00015	82,170
8	338	2624	2286	563151	25,900	0,01133	0,00013	72,289
9	360	2631	2271	1388939	25,915	0,01141	0,00013	180,864
10	296	2519	2223	1047802	25,910	0,01166	0,00014	142,343
11	330	2709	2379	567665	25,905	0,01089	0,00012	67,309
12	318	2652	2334	578315	25,905	0,01110	0,00012	71,241
13	293	2644	2351	492549	25,905	0,01102	0,00012	59,801
14	392	2662	2270	457265	25,900	0,01141	0,00013	59,527
15	77	2499	2422	623346	25,900	0,01069	0,00011	71,282
16	292	2679	2387	592227	25,900	0,01085	0,00012	69,724
17	400	2658	2258	1413770	25,790	0,01142	0,00013	184,431
18	300	2726	2426	588205	25,715	0,01060	0,00011	66,088
19	388	2701	2313	966944	25,700	0,01111	0,00012	119,376
20	359	2756	2397	409324	25,800	0,01076	0,00012	47,421
21	321	2635	2314	740632	25,805	0,01115	0,00012	92,105
22	385	2615	2230	576028	25,820	0,01158	0,00013	77,223
23	288	2690	2402	1095047	25,820	0,01075	0,00012	126,532
24	350	2579	2229	675270	25,800	0,01157	0,00013	90,468
25	407	2661	2254	616866	25,820	0,01146	0,00013	80,946
26	369	2559	2190	410426	25,800	0,01178	0,00014	56,962
27	408	2560	2152	564687	25,800	0,01199	0,00014	81,164

Çapak alanı olarak, işlenmiş kuvars parçanın dış kısmında çıkıntı şeklinde kalan çapaklı alan ile iç kısmında girinti şeklinde olan deformasyonlu alanın toplamı çapak alanı olarak değerlendirilmiş ve analizlere katılmıştır. Bu şekildeki bir değerlendirmenin literatürde yapılan çapak alanı hesaplarından (Jain ve Pandey, 2016; Wang, Zha, Feng, ve Zhang, 2016; Singh, Kataria, Singhal, Garg, ve Tyagi, 2020) farklı olması, çalışmanın bir özgünlüğüdür.

4.1.2. Yüzey pürüzlülüğü (SR) ölçüm sonucu

Yüzey pürüzlülüğü (SR) hesabı için 'Materyal ve Yöntem' bölümünün 'Ölçüm Metodu' kısmında verilen (3.5) eşitliği kullanılarak yüzey pürüzlülüğü hesaplanır. Yüzey pürüzlülüğü yanıt (deney sonucu) değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Analizler için ortalama SR değeri alınmıştır.

Çizelge 4.3. Yüzey pürüzlülüğü (SR) sonuçları

Deney No	SR 0° Ra (µm)	SR 90° Ra (µm)	SR 180° Ra (µm)	SR 270° Ra (µm)	Ortalama SR Ra (µm)
1	2,319	1,812	1,819	2,207	2,039
2	1,925	2,025	2,028	1,795	1,943
3	1,748	1,658	1,466	1,531	1,601
4	1,569	1,795	1,466	1,597	1,607
5	1,792	1,697	1,865	1,587	1,735
6	1,573	1,357	1,302	1,247	1,370
7	1,115	1,086	1,06	1,097	1,090
8	1,531	1,872	1,603	1,496	1,626
9	1,414	1,589	1,629	1,423	1,514
10	2,174	1,737	1,673	1,861	1,861
11	0,65	0,686	0,654	0,621	0,653
12	0,704	0,828	0,724	0,706	0,741
13	0,939	1,047	0,76	0,934	0,920
14	0,751	0,785	0,866	0,977	0,845
15	0,995	0,805	0,924	1,05	0,944
16	1,134	1,263	0,966	1,192	1,139
17	1,363	0,839	1,473	1,69	1,341
18	0,657	0,746	0,617	0,667	0,672
19	1,185	1,209	0,661	1,237	1,073
20	1,284	1,259	1,302	1,099	1,236
21	1,173	1,641	1,129	1,193	1,284
22	1,401	1,076	1,342	1,345	1,291
23	0,84	0,83	1,137	0,944	0,938
24	1,364	0,94	0,891	0,99	1,046
25	1,33	1,112	1,056	1,313	1,203
26	1,317	1,258	1,107	1,205	1,222
27	1,047	0,936	0,933	0,986	0,976

4.1.3. Kaldırılan malzeme hacmi (MRR) ölçüm sonucu

Gagalama delme işlemine göre, deney setindeki her bir kuvars parça için bulunmuş MRR sonuç değerleri, Çizelge 4.4'te verilmiştir. MRR hesabı için 'Materyal ve Yöntem' bölümünün 'Ölçüm Metodu' kısmında verilen (3.7) ve (3.8) eşitlikleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. MRR hesap tablosu

Deney No	**dp (mm)**	**$V_{f\,n}$ (mm/dak)**	**$V_{f\,0}$ (mm/dak) 6000**	**S (mm) 0,1**	**R (mm) 2**	**t (mm) 7**	**N' = t/dp**	**N = t/dp** (tam sayı)	**N^2**	**D_d (mm) 28**	**π 3,14**	**D_i (mm)**	**MRR (mm^3/s)**
1	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,940	101,816
2	0,75	10	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,925	51,265
3	0,40	20	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,860	96,012
4	1,10	20	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,940	105,783
5	0,75	30	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,915	154,506
6	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,940	101,816
7	0,75	10	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,905	51,740
8	0,40	20	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,900	94,288
9	1,10	20	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,915	107,017
10	0,75	30	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,910	154,862
11	0,40	10	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,905	47,036
12	1,10	10	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,905	53,755
13	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,905	103,479
14	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,900	103,716
15	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,900	103,716
16	0,40	30	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,900	141,431
17	1,10	30	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,790	169,755
18	0,75	10	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,715	56,233
19	0,40	20	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,700	102,884
20	1,10	20	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,800	112,679
21	0,75	30	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,805	162,325
22	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,820	107,507
23	0,75	10	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,820	53,754
24	0,40	20	6000	0,1	2	7	17,50	18	324	28	3,14	25,800	98,594
25	1,10	20	6000	0,1	2	7	6,36	7	49	28	3,14	25,820	111,696
26	0,75	30	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,800	162,680
27	0,75	20	6000	0,1	2	7	9,33	10	100	28	3,14	25,800	108,453

4.2. Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Bu çalışmada, ANOVA, ultrasonik güç (P), devir sayısı (n), ilerleme hızı (V_f) ve gagalama delme derinliği (dp)'nin, kaldırılan malzeme hacmi (MRR), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve çapak alanı (CA) üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. Deney sonuçları (bkz. Çizelge 4.1), proses karakteristikleri için analiz edilmiştir.

ANOVA tablosunun son sütununda herbir parametrenin % katkı değeri belirtilmiştir. Bu sütun, kontrol faktörlerinin deney sonuçları üzerindeki etki oranını kanıtlar.

4.2.1. MRR üzerinde proses değişkenlerinin etkisi

Regresyon analizi ile %95 güven aralığında olan kaldırılan malzeme hacmi (MRR) yanıt değerini tahmin etmek için, deney sonuçlarının analizi sonrası bir model elde edilir. Çizelge 4.4'deki deney sonuçlarının analizi sonrası elde edilen model, aşağıdaki eşitlik (4.1)'de verilmiştir. MRR için ANOVA test sonuçları, Çizelge 4.5'de görülmektedir. p değeri 0,05'in altında olanlar önemlidir, (*) ile gösterilmiştir.

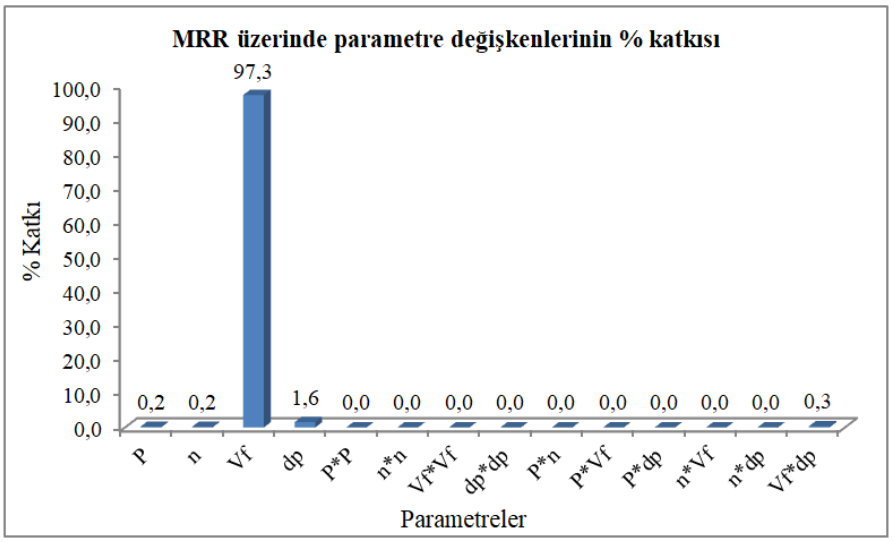
$$MRR = 29{,}7 - (0{,}157 \times P) - (0{,}0339 \times n) + (3{,}060 \times V_f) + (7{,}3 \times dp) + (0{,}00047 \times P \times P) + (0{,}000015 \times n \times n) + (0{,}01104 \times V_f \times V_f) - (9{,}78 \times dp \times dp) + (0{,}000026 \times P \times n) + (0{,}00474 \times P \times V_f) + (0{,}079 \times P \times dp) + (0{,}000247 \times n \times V_f) - (0{,}0070 \times n \times dp) + (1{,}543 \times V_f \times dp) \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5. MRR için ANOVA sonuçları

Kaynak (Source)	Kareler toplamı (Sum of squares)	Serbestlik derecesi (dof)	Ortalama kare (mean square)	F değeri (F-value)	p değeri (p value)	% Katkı (% Contribution)
Model	34 111,30	14	2 436,5	508,49	0,000 *	
P	82,60	1	82,6	17,24	0,001 *	0,242
n	61,50	1	61,5	12,83	0,004 *	0,180
V_f	33 261,70	1	33 261,7	6 941,57	0,000 *	**97,345**
dp	539,20	1	539,2	112,53	0,000 *	1,578
P*P	0,90	1	0,9	0,19	0,665	0,003
n*n	10,30	1	10,3	2,15	0,169	0,030
V_f*V_f	6,50	1	6,5	1,36	0,267	0,019
dp*dp	7,60	1	7,6	1,59	0,231	0,022
P*n	0,20	1	0,2	0,04	0,833	0,001
P*V_f	8,10	1	8,1	1,69	0,219	0,024
P*dp	2,80	1	2,8	0,58	0,462	0,008
n*V_f	2,20	1	2,2	0,46	0,511	0,006
n*dp	2,20	1	2,2	0,46	0,515	0,006
V_f*dp	116,70	1	116,7	24,35	0,000 *	0,342
Hata (Error)	57,50	12	4,8			0,168
Uyum eksikliği (Lack-of-Fit)	57,50	10	5,8	306,24	0,003	0,168
Saf hata (Pure Error)	0,00	2	0,0			0,000
Toplam (Total)	34 168,80	26				
R^2 99,83 %	Düzeltilmiş R^2 (adjusted) 99,64 %			Tahmin edilen R^2 (predicted) 99,03 %		

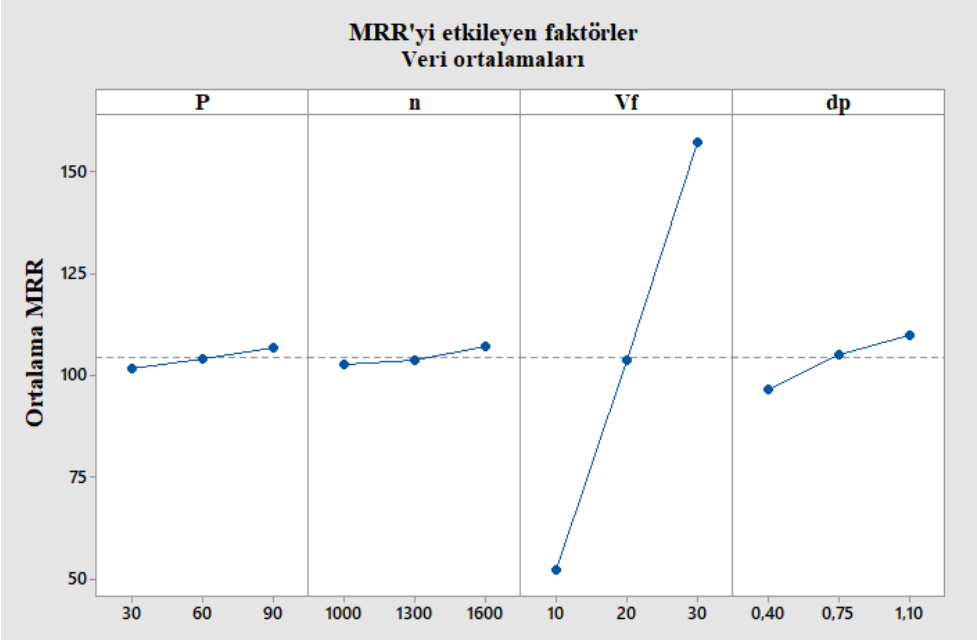
Modelde düzeltilmiş R^2 (adjusted) değeri, % 99,64 bulunur. Yani, MRR'deki değişimin % 99,64'ü modeldeki faktörler tarafından açıklanmaktadır. Modelde R^2 yüksek olduğu için regresyon model uyumu iyidir.

RUD proses değişkenlerinin MRR üzerinde % katkısı Şekil 4.3'de verilmiştir. MRR için ANOVA sonuç modelindeki parametrelerin başlıca etkileri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



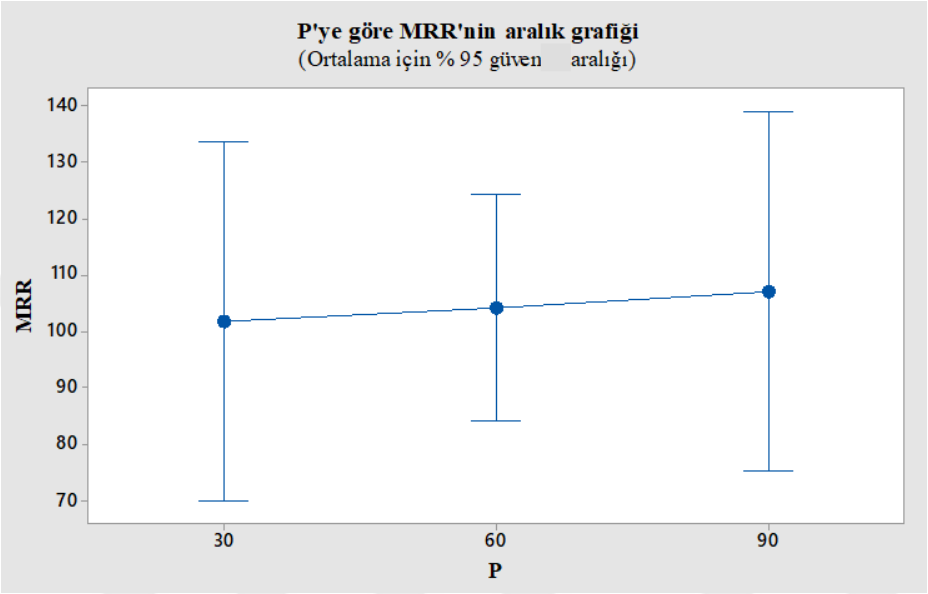
Şekil 4.3. MRR üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı

Kaldırılan malzeme hacmi (MRR), ultrasonik güç (P), devir sayısı (n), ilerleme hızı (V_f) ve gagalama delme derinliği (dp)'nin artmasıyla, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi artmıştır. MRR, en yüksek değerine ilerleme hızındaki artış ile ulaşmıştır. V_f'nin 10 mm/dak' dan 30 mm/dak'ya kadar artarken, MRR keskin bir şekilde artmıştır. MRR üzerinde en etkili süreç parametresi, % 97,345 katkı yüzdesi ile ilerleme hızı (V_f) olmuştur.

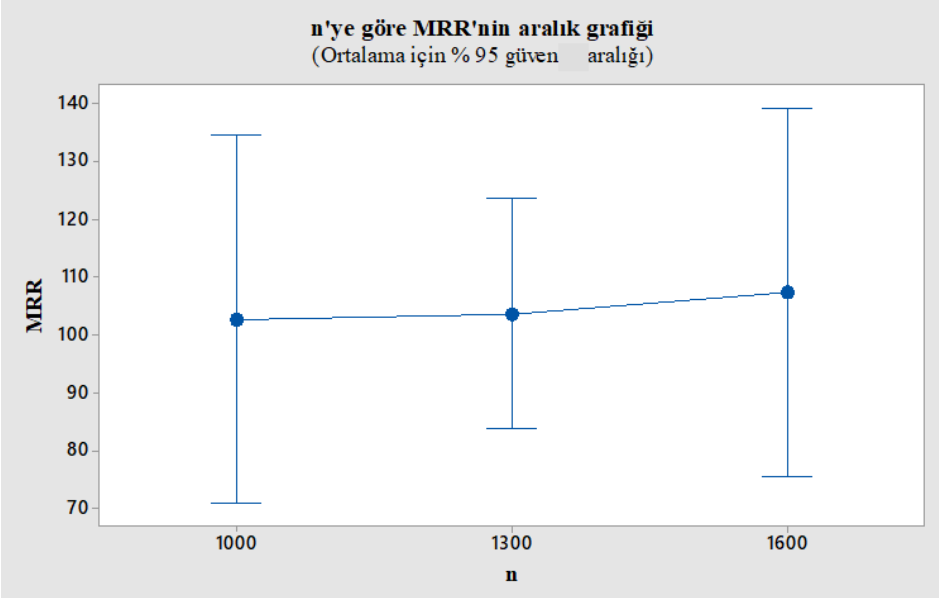


Şekil 4.4. Parametrelerin MRR üzerindeki etkileri

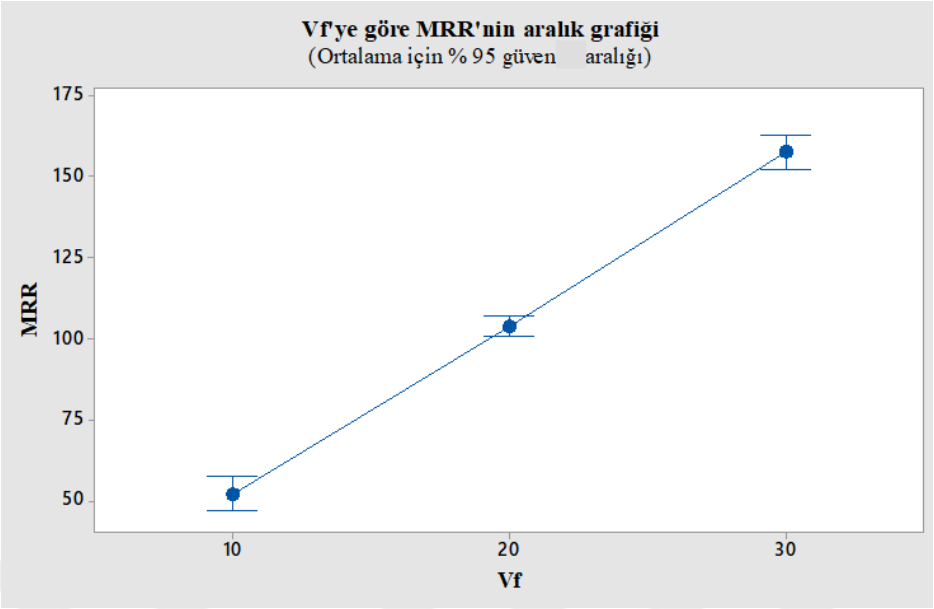
Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, sırasıyla P, n, Vf ve dp faktörlerinin her bir seviyesinin MRR yanıtı üzerindeki güven aralıklarını saptamak için birleştirilmiş standart sapma kullanılmıştır.



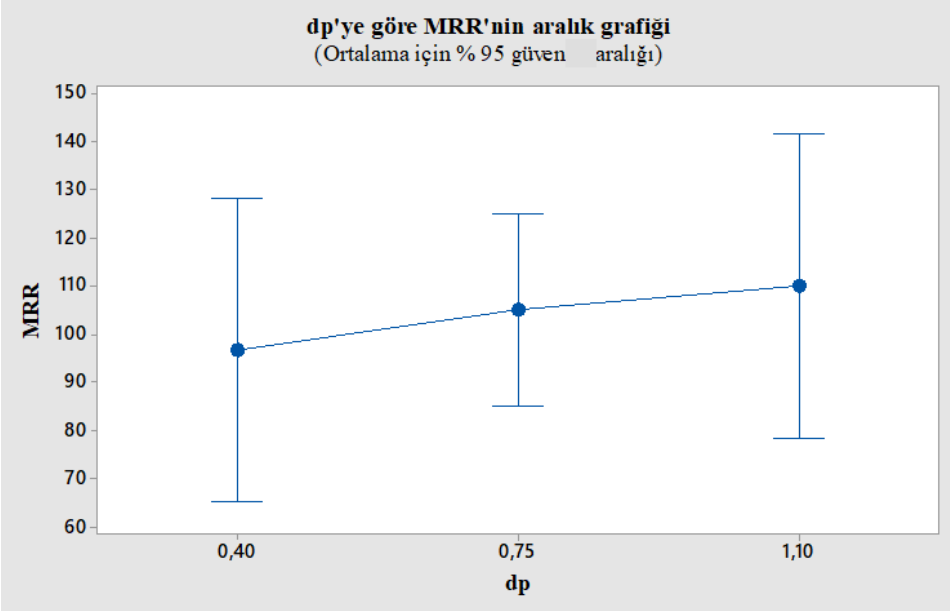
Şekil 4.5. P faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği



Şekil 4.6. n faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği



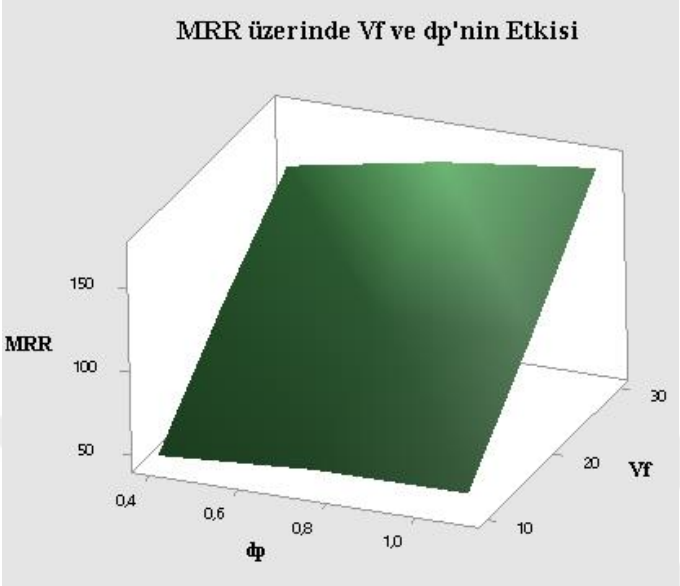
Şekil 4.7. V_f faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği



Şekil 4.8. dp faktörüne göre MRR'nin aralık grafiği

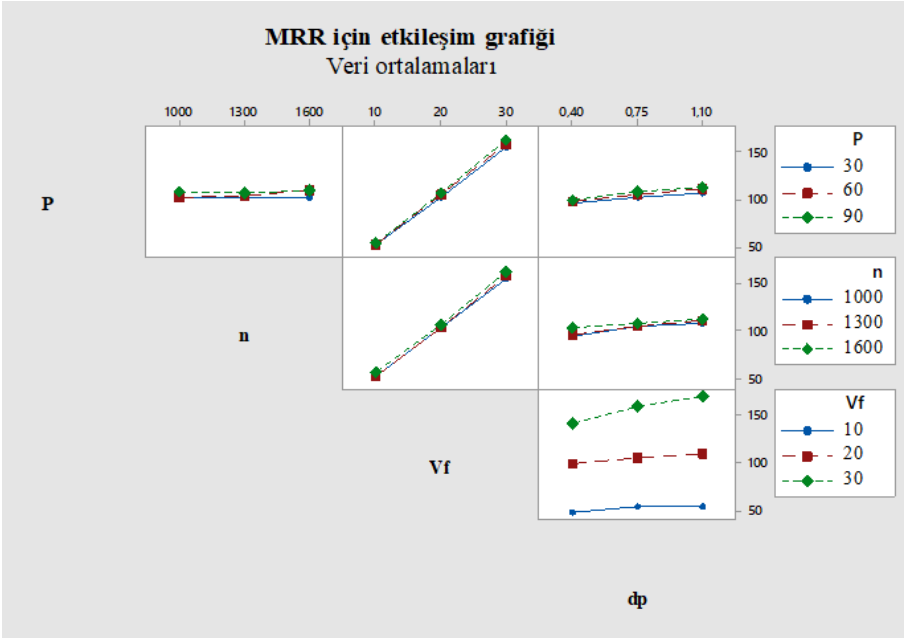
İki yönlü etkileşimlerden V_f x dp parametre ikilisinin, RUD prosesi ile delme işleminde MRR üzerindeki etkisi Şekil 4.9'da verilmiş ve MRR üzerinde, ilerleme hızı (V_f) ile gagalama delme derinliği (dp)'nin birleşik etkileri tarif edilmiştir. MRR, V_f ve dp'deki artış ile artmıştır.

Katkı payı en yüksek olan V_f faktöründen sonra, % 1,578 katkı ile dp, % 0,342 katkı ile V_f x dp parametre ikilisi gelmektedir.



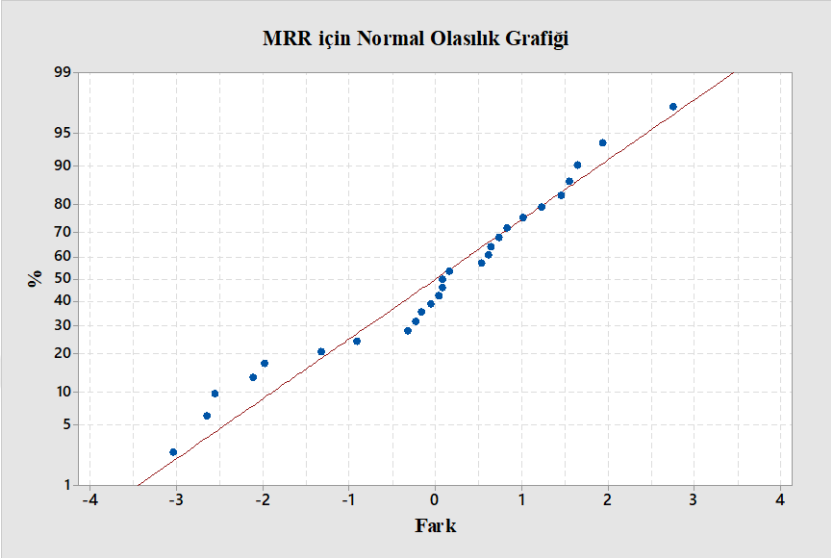
Şekil 4.9. İki parametrenin (V_f ve dp) etkileşiminin MRR üzerindeki etkileri

MRR için etkileşim grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu grafikte iki farklı parametrenin seviyeleri arasındaki ikili etkileşim görülmektedir.



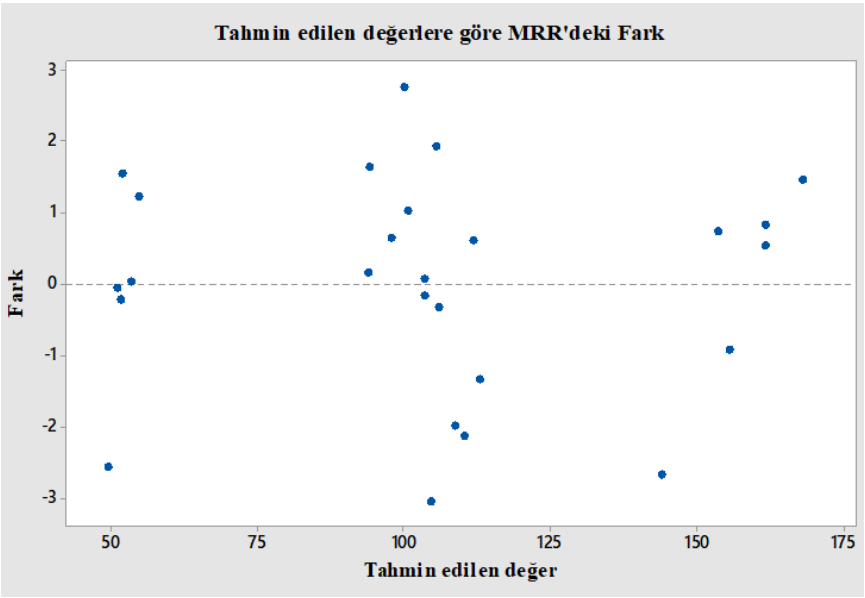
Şekil 4.10. MRR için etkileşim grafiği

Normal olasılık grafiği normallikten önemli sapmaları belirlemek için kullanılan bir grafik tekniğidir. En küçük kareler yöntemiyle elde edilen bir regresyon doğrusu Şekil 4.11'deki gibidir.

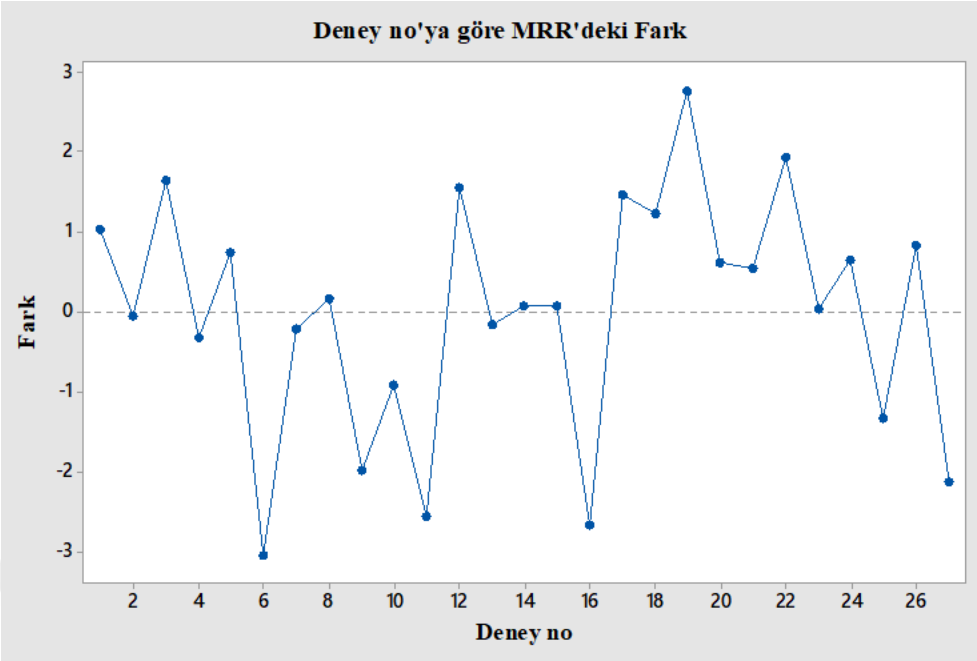


Şekil 4.11. MRR'deki farkların normal dağılıma uyum grafiği

Fark (kalıntı ya da hata)'a karşı tahmin edilen uygun değer grafiği Şekil 4.12'de, farka karşı gözlem (deney) sırası grafiği ise Şekil 4.13'de verilmiştir.

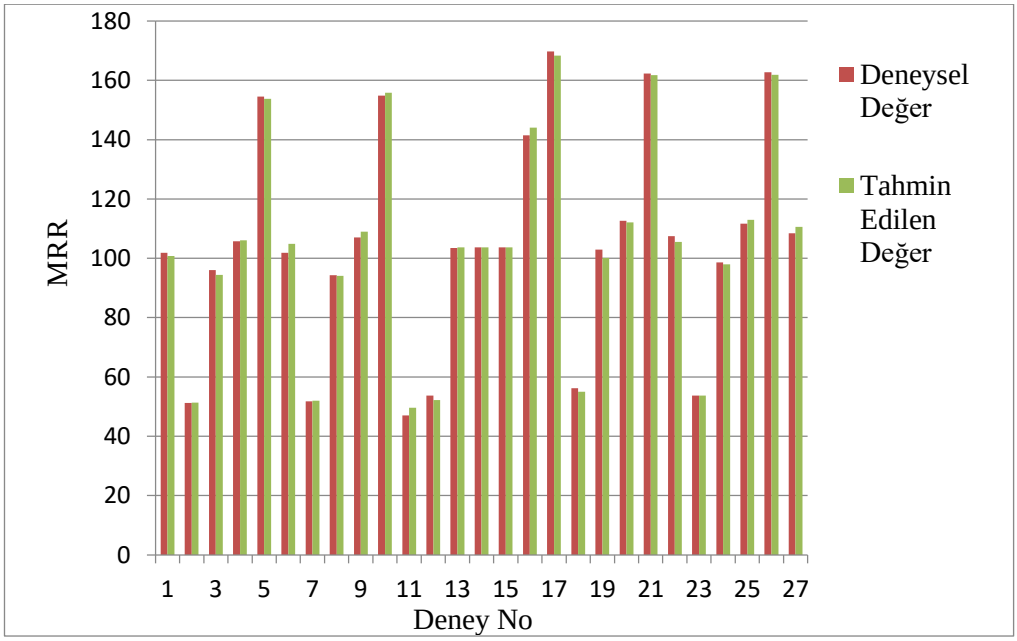


Şekil 4.12. MRR'deki farklara karşı uygun değer grafiği



Şekil 4.13. MRR'deki farklara karşı deney sırası grafiği

Her bir deney için yanıt değişkeni MRR nin, modelden tahmin edilen değeri ile deney sonucu arasındaki fark Şekil 4.14 görülmektedir. İki değer arası fark ortalama % 1,2'dir.



Şekil 4.14. MRR'nin modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri

4.2.2. SR üzerinde proses değişkenlerinin etkisi

Yüzey pürüzlülüğü (SR) için ANOVA test sonuçları, Çizelge 4.6'da görülmektedir. p değeri 0,05'in altında olanlar önemlidir, ve bunlar (*) ile gösterilmiştir. Analiz sonrası model, (4.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$SR = 10{,}81 - (0{,}0831 \times P) - (0{,}00889 \times n) - (0{,}0226 \times V_f) - (2{,}28 \times dp) + (0{,}000411 \times P \times P) + (0{,}000003 \times n \times n) + (0{,}000759 \times V_f \times V_f) + (0{,}783 \times dp \times dp) + (0{,}000010 \times P \times n) + (0{,}000410 \times P \times V_f) + (0{,}00358 \times P \times dp) - (0{,}000013 \times n \times V_f) + (0{,}000654 \times n \times dp) + (0{,}0082 \times V_f \times dp) \quad (4.2)$$

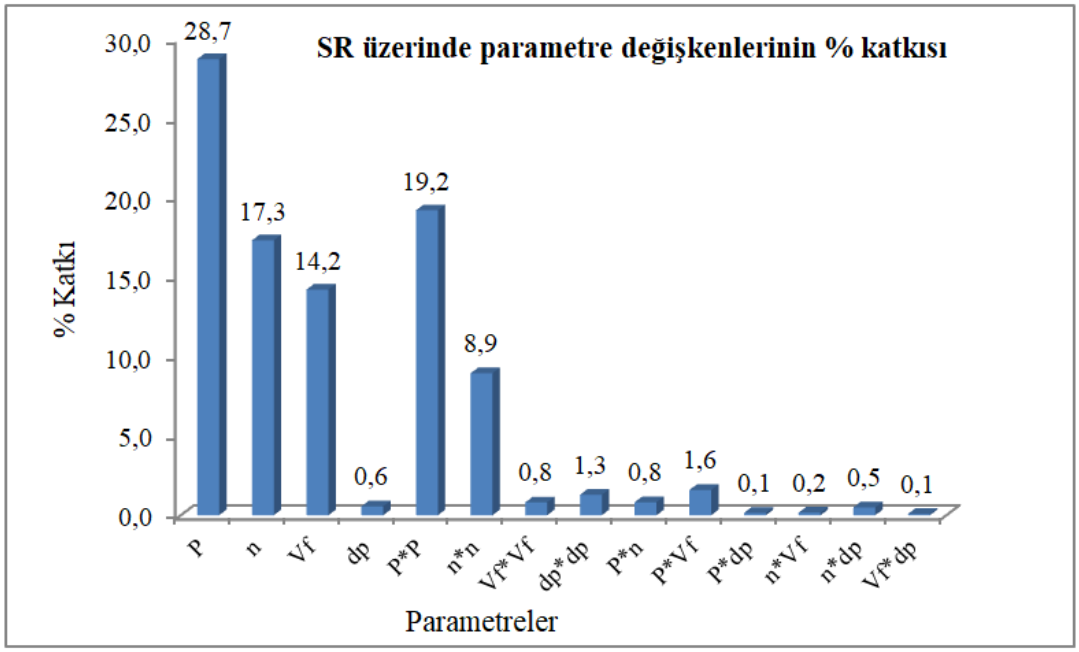
Çizelge 4.6. SR için ANOVA sonuçları

Kaynak (Source)	Kareler toplamı (Sum of squares)	Serbestlik derecesi (dof)	Ortalama kare (mean square)	F değeri (F-value)	p değeri (p value)	% Katkı (% Contribution)
Model	3,32131	14	0,23724	5,91	0,002 *	
P	1,09203	1	1,09203	27,21	0,000 *	**28,716**
n	0,65813	1	0,65813	16,40	0,002 *	17,306
V_f	0,54049	1	0,54049	13,47	0,003 *	14,213
dp	0,02117	1	0,02117	0,53	0,482	0,557
P*P	0,72997	1	0,72997	18,19	0,001 *	19,195
n*n	0,34001	1	0,34001	8,47	0,013 *	8,941
V_f*V_f	0,03075	1	0,03075	0,77	0,399	0,809
dp*dp	0,04911	1	0,04911	1,22	0,290	1,291
P*n	0,03133	1	0,03133	0,78	0,394	0,824
P*V_f	0,06052	1	0,06052	1,51	0,243	1,591
P*dp	0,00566	1	0,00566	0,14	0,714	0,149
n*V_f	0,00636	1	0,00636	0,16	0,698	0,167
n*dp	0,01887	1	0,01887	0,47	0,506	0,496
V_f*dp	0,00329	1	0,00329	0,08	0,779	0,087
Hata (Error)	0,48155	12	0,04013			12,663
Uyum eksikliği (Lack-of-Fit)	0,47623	10	0,04762	17,90	0,054	12,523
Saf hata (Pure Error)	0,00532	2	0,00266			0,140
Toplam (Total)	3,80286	26				
R^2 87,34 %	Düzeltilmiş R^2 (adjusted) 72,56 %			Tahmin edilen R^2 (predicted) 27,55 %		

R-kare (R^2), doğrusal regresyon modelleri için bir uyum iyiliği ölçüsüdür. Modelde düzeltilmiş R^2 (adjusted), % 72,56 olarak bulunur. Yani, SR'deki değişimin % 72,56'sı modeldeki faktörler tarafından açıklanmaktadır.

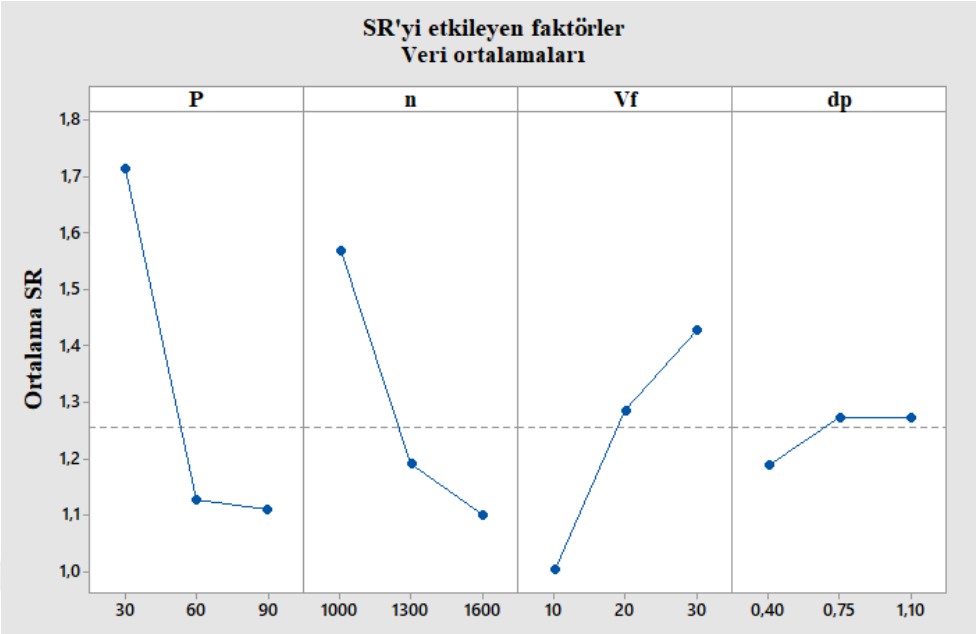
Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, p değeri 0,05'den küçük olan, ultrasonik güç (P), devir sayısı (n), ilerleme hızı (V_f) ve ikinci dereceden terimler olan ultrasonik gücün karesi (P^2) ve devir sayısının karesi (n^2) gibi başlıca girdi parametrelerinin işlenmiş parçaların kesme yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

SR üzerinde en etkili süreç parametresi, % 28,716 katkı yüzdesi ile ultrasonik güç (P) olmuştur. RUD proses değişkenlerinin SR üzerinde % katkısı Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. SR üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı

SR için ANOVA sonuç modelindeki parametrelerin başlıca etkileri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

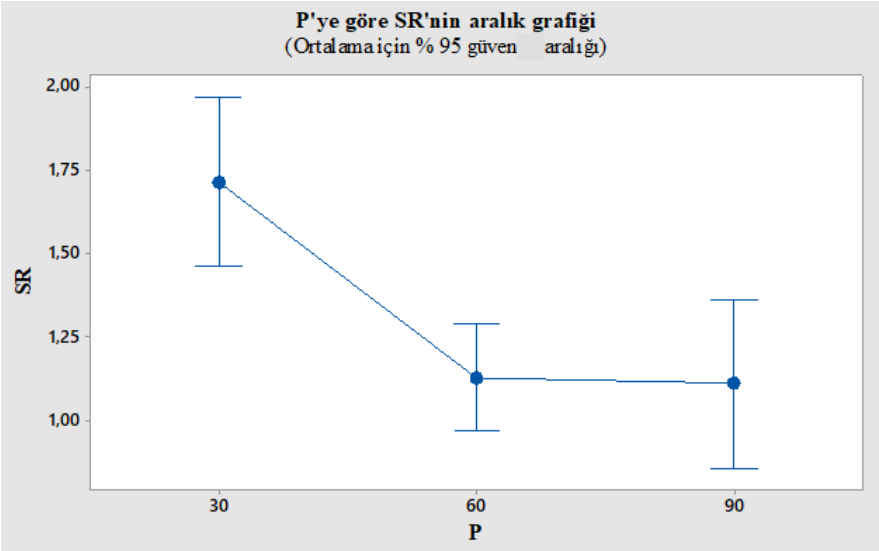


Şekil 4.16. Parametrelerin SR üzerindeki etkileri

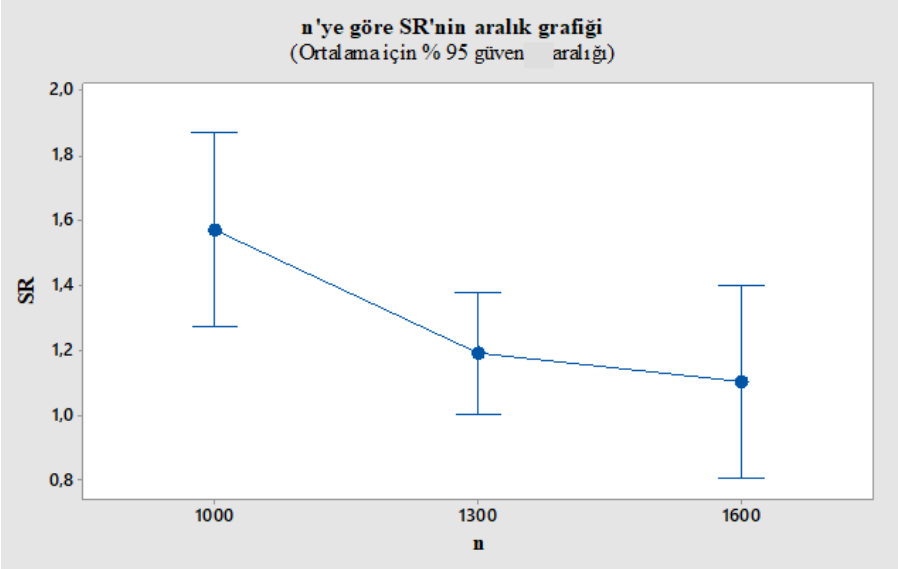
Yüzey pürüzlülüğü (SR), ultrasonik güç (P) ve devir sayısı (n)'nın artması ile azalmış, ilerleme hızı (V_f) ve gagalama delme derinliği (dp)'nin artmasıyla Şekil 4.16'da görüldüğü gibi artmıştır. SR, en yüksek değerine ultrasonik güçteki artış ile, en düşük değerine ise V_f'deki azalış ile ulaşmıştır.

Minimum olması istenen SR'deki keskin düşüş, ultrasonik gücün % 30'dan % 60'a artırılmasıyla görülmüştür. % 60'dan sonra SR deki düşüş daha azdır. SR'deki diğer keskin düşüş, devir sayısının 1000 rpm'den 1300 rpm'e çıkarılmasıyla gerçekleşmiştir.

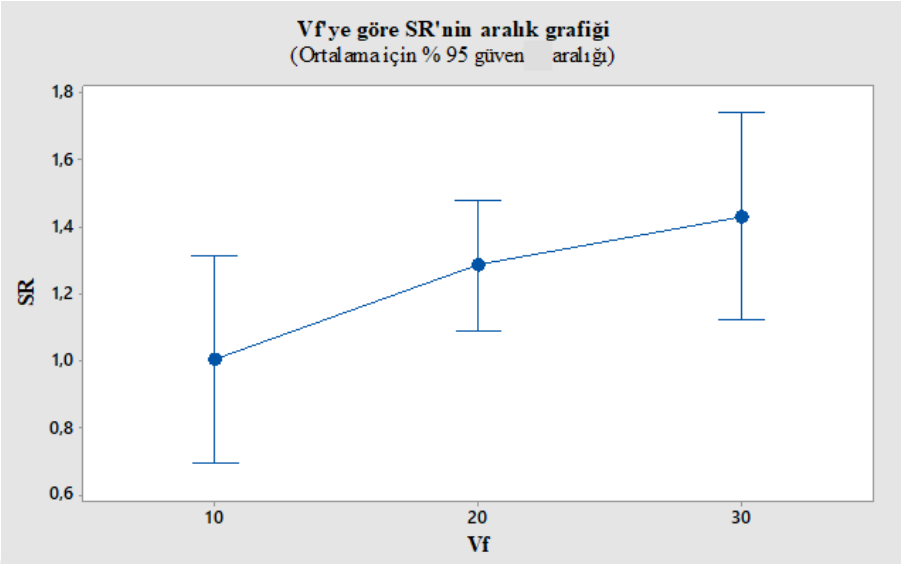
Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de, üç farklı seviyesi olan P, n, Vf ve dp faktörlerinin her bir seviyesinin SR yanıtı üzerindeki güven aralıklarını saptamak için birleştirilmiş standart sapma kullanılmıştır.



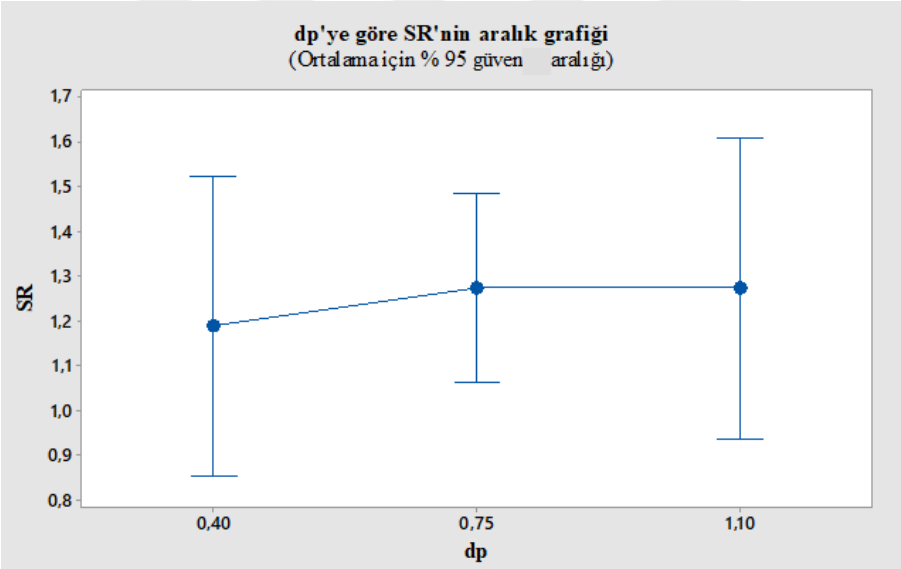
Şekil 4.17. P faktörüne göre SR'nin aralık grafiği



Şekil 4.18. n faktörüne göre SR'nin aralık grafiği

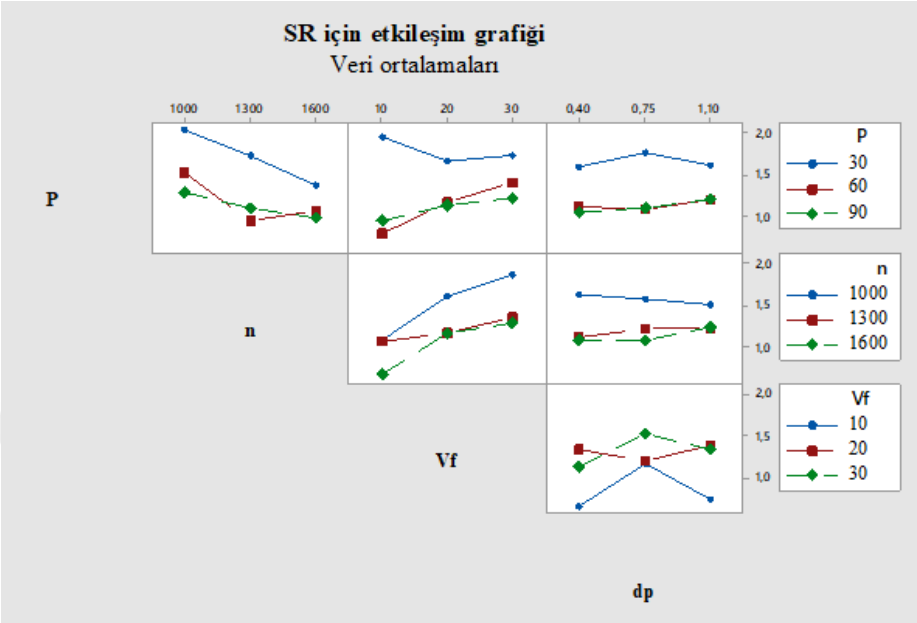


Şekil 4.19. Vf faktörüne göre SR'nin aralık grafiği



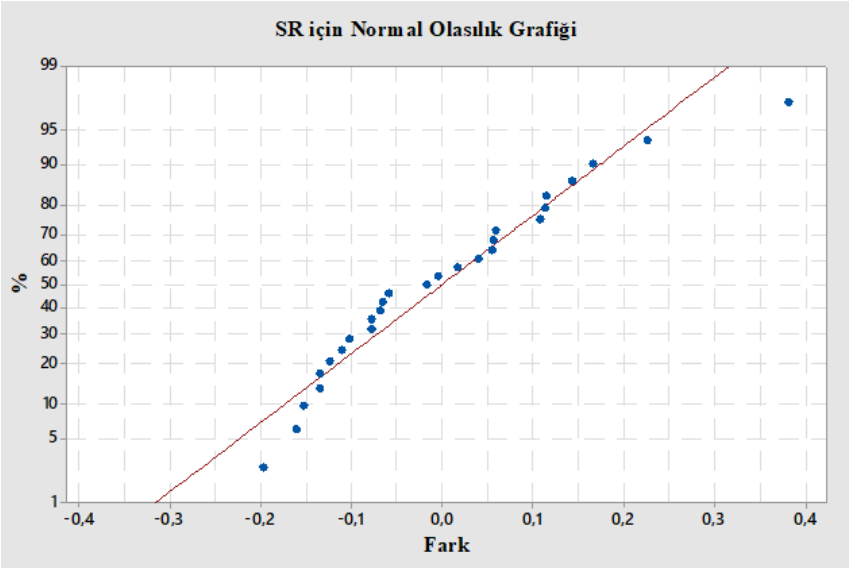
Şekil 4.20. dp faktörüne göre SR'nin aralık grafiği

İki farklı parametrenin seviyeleri arasındaki ikili etkileşimi anlatan SR yanıtı için etkileşim grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir.



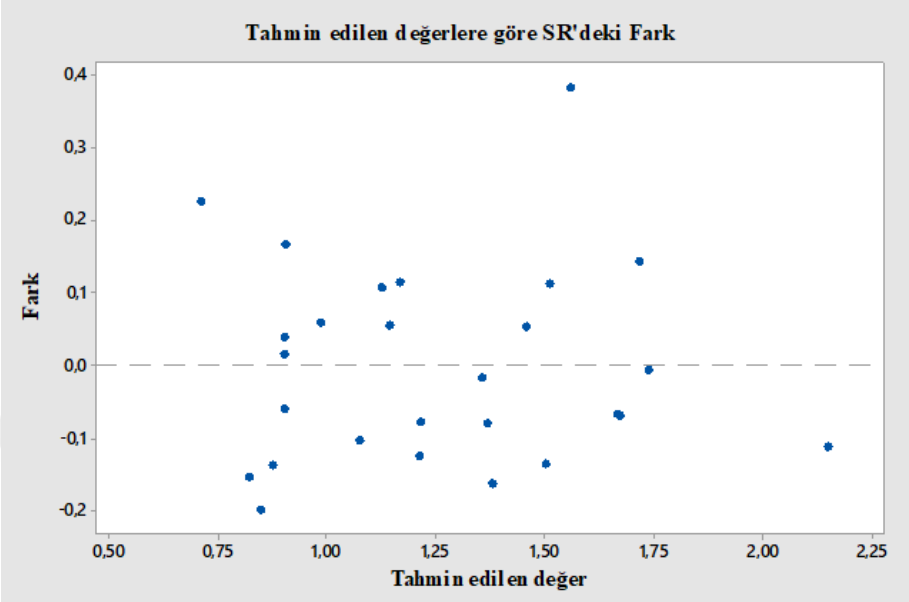
Şekil 4.21. SR için etkileşim grafiği

Veriler normal dağılımdan alınan bir örnekle tutarlıysa, noktalar düz bir çizgiye yakın olmalıdır. Noktalar bu çizgiden ne kadar uzaklaşırsa normallikten sapma o kadar büyük olur.



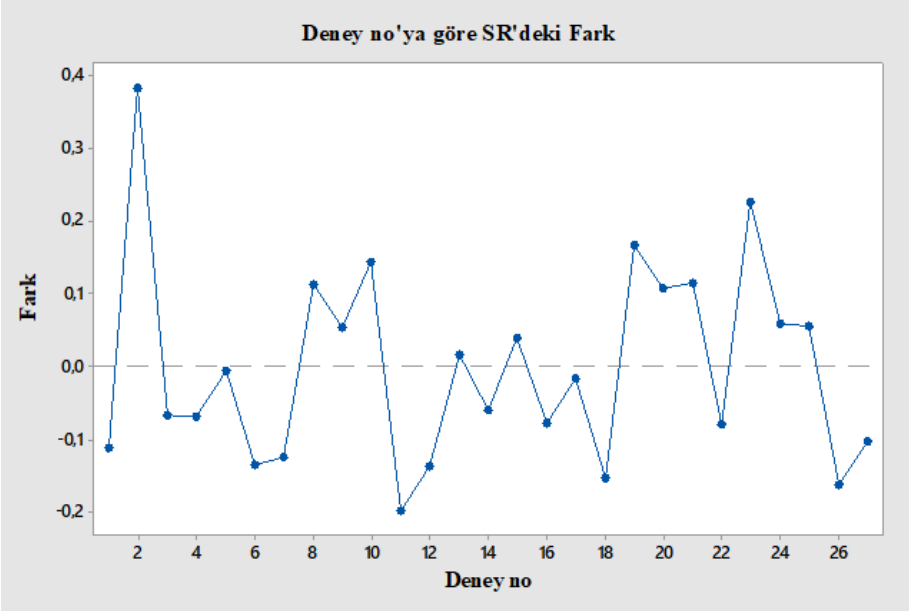
Şekil 4.22. SR'deki farkların normal dağılıma uyum grafiği

Fark değerlerine karşın SR değişkeninin tahmin değerlerinin grafiği Şekil 4.23'de verilmiştir.



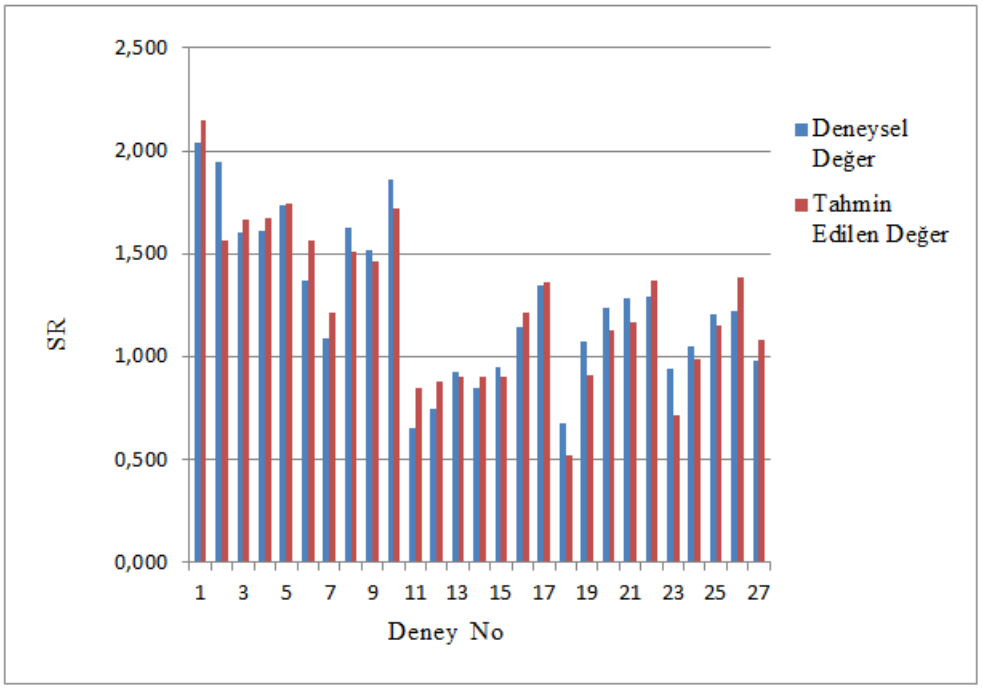
Şekil 4.23. SR'deki farklara karşı uygun değer grafiği

Kalıntıya (farka) karşı gözlem sırası grafiği Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.24. SR'deki farklara karşı deney sırası grafiği

SR yanıt değişkeninin, modelden tahmin edilen değeri ile deney sonucu arasındaki fark Şekil 4.25'de görülmektedir. Deneysel değer ile tahmin edilen değer arası fark ortalama % 10,2'dir.



Şekil 4.25. SR'nin modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri

4.2.3. CA üzerinde proses değişkenlerinin etkisi

Çapak alanı (CA) için ANOVA test sonuçları, Çizelge 4.7'de görülmektedir. Analiz sonrası model, (4.3) eşitliğinde verilmiştir.

$$CA = 685 - (8,07 \times P) - (0,452 \times n) - (16,7 \times V_f) + (346 \times dp) + (0,0188 \times P \times P) + (0,000215 \times n \times n) + (0,264 \times V_f \times V_f) + (69 \times dp \times dp) + (0,00331 \times P \times n) + (0,0629 \times P \times V_f) - (0,23 \times P \times dp) - (0,00285 \times n \times V_f) - (0,430 \times n \times dp) + (7,91 \times V_f \times dp) \quad (4.3)$$

Çizelge 4.7. CA için ANOVA sonuçları

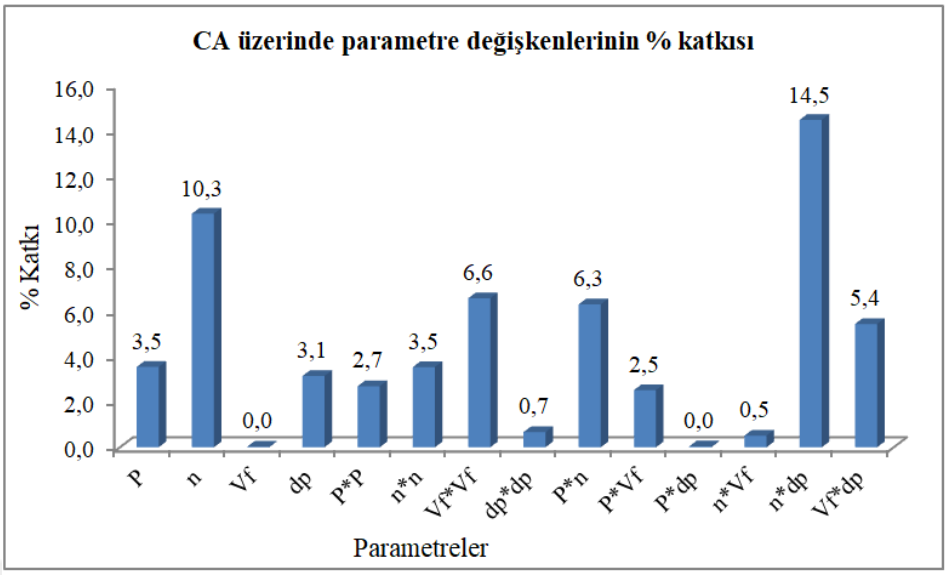
Kaynak (Source)	Kareler toplamı (Sum of squares)	Serbestlik derecesi (dof)	Ortalama kare (mean square)	F değeri (F-value)	p değeri (p value)	% Katkı (% Contribution)
Model	30 786,4	14	2 199,03	1,03	0,483	
P	1 998,8	1	1 998,76	0,94	0,352	3,549
n	5 811,6	1	5 811,58	2,73	0,124	10,318
V_f	13,6	1	13,58	0,01	0,938	0,024
dp	1 772,4	1	1 772,41	0,83	0,379	3,147
P*P	1 519,7	1	1 519,65	0,71	0,415	2,698
n*n	1 997,7	1	1 997,75	0,94	0,352	3,547
V_f*V_f	3 707,0	1	3 707,02	1,74	0,212	6,582
dp*dp	376,0	1	376,01	0,18	0,682	0,668
P*n	3 557,3	1	3 557,33	1,67	0,220	6,316
P*V_f	1 422,1	1	1 422,13	0,67	0,430	2,525
P*dp	23,2	1	23,16	0,01	0,919	0,041
n*V_f	291,6	1	291,64	0,14	0,718	0,518
n*dp	8 147,7	1	8 147,73	3,83	0,074	**14,466**
V_f*dp	3 067,7	1	3 067,74	1,44	0,253	5,447
Hata (Error)	25 535,8	12	2 127,99			45,339
Uyum eksikliği (Lack-of-Fit)	25 445,8	10	2 544,58	56,53	0,018	45,179
Saf hata (Pure Error)	90,0	2	45,01			0,160
Toplam (Total)	56 322,2	26				
R^2 54,66 %	Düzeltilmiş R^2 (adjusted) 1,77 %			Tahmin edilen R^2 (predicted) 0,00 %		

Modeldeki düzeltilmiş regresyon katsayısı, R^2 (adjusted), % 1,77 olarak bulunur. CA'daki değişimin % 1.77'si modeldeki faktörler tarafından açıklanmaktadır.

Tahmin edilen R^2 (predicted), $R^{2'}$ye göre küçükse, bağımsız değişkenler istatistiksel olarak anlamlı olsa bile model aşırı uyumlu (overfitted) hale gelebilir.

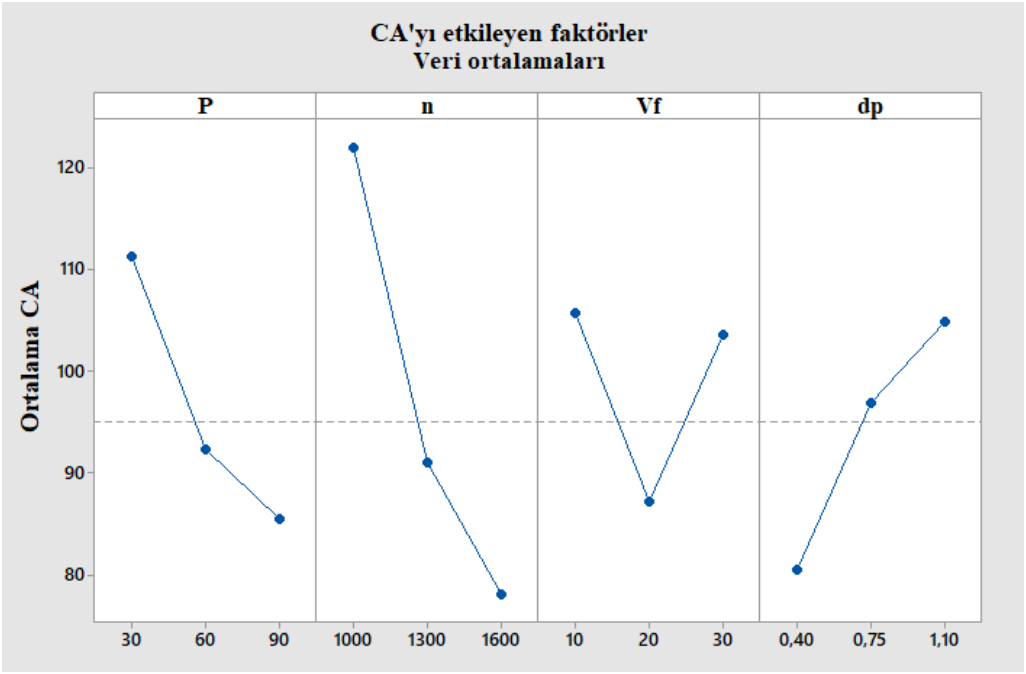
Şekil 4.26'da görüldüğü gibi, CA üzerinde en etkili süreç parametresi, % 14,466 katkı yüzdesi ile iki yönlü etkileşimlerden, devir sayısı x gagalama delme derinliği (n x dp) ikilisi olmuştur (bkz. Çizelge 4.7). Bu ikili parametrenin p değeri 0,074 bulunmuştur.

İstatistiksel açıdan, p değeri, 0,10 ile 0,05 arasında olduğu için sınırda bir anlamlılık olduğu manasına gelir (Yaka, 2019).



Şekil 4.26. CA üzerinde parametre değişkenlerinin % katkısı

n x dp ikilisinin en önemli katkısından sonraki diğer önemli katkısı olan parametre, % 10,318 ile devir sayısı (n) faktörüdür. Çapak alanı (CA) için ANOVA sonuç modelindeki parametrelerin başlıca etkileri Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

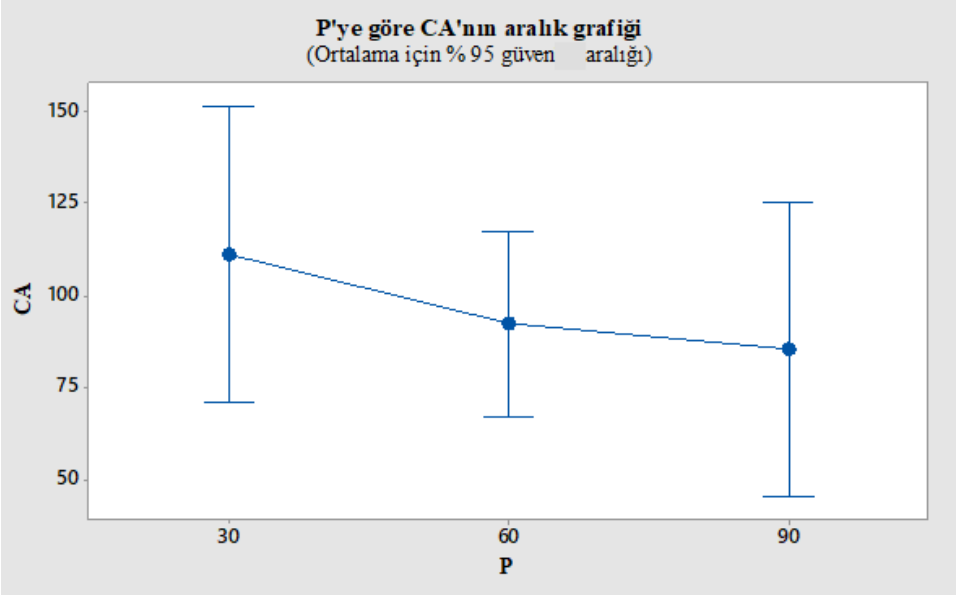


Şekil 4.27. Parametrelerin CA üzerindeki etkileri

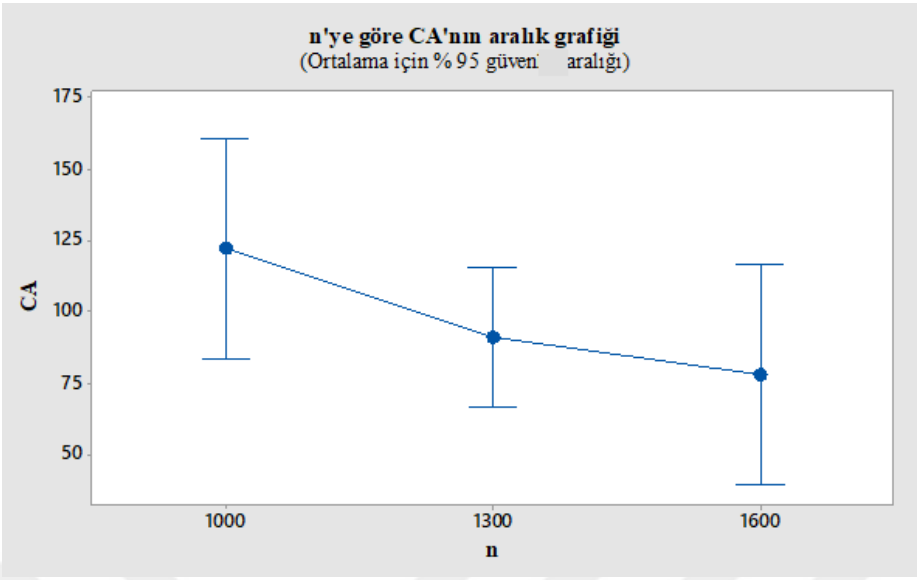
Aynı zamanda Şekil 4.27'de görüldüğü gibi, minimum olması istenen çapak alanını etkileyen en önemli faktörün devir sayısı (n) olduğu görülmüştür.

Çapak alanı (CA), Ultrasonik güç (P) ve devir sayısı (n)'deki artış ile azalmakta, gagalama delme derinliği (dp)'ndeki artışla artmaktadır. İlerleme hızında 10mm/dak'dan 20 mm/dak'ya artış olurken CA önce azalmış, 20 mm/dak'dan 30 mm/dak'ya doğru CA artmaya başlamıştır. MRR ve SR hariç tutulduğunda, sadece CA değerlendirildiğinde en küçük CA'yı bulmak için en uygun şartların (P3_n3_V_f2_dp1) P için % 90, n için 1600 rpm, V_f için 20 mm/dak ve dp için 0,40 mm olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 4.27).

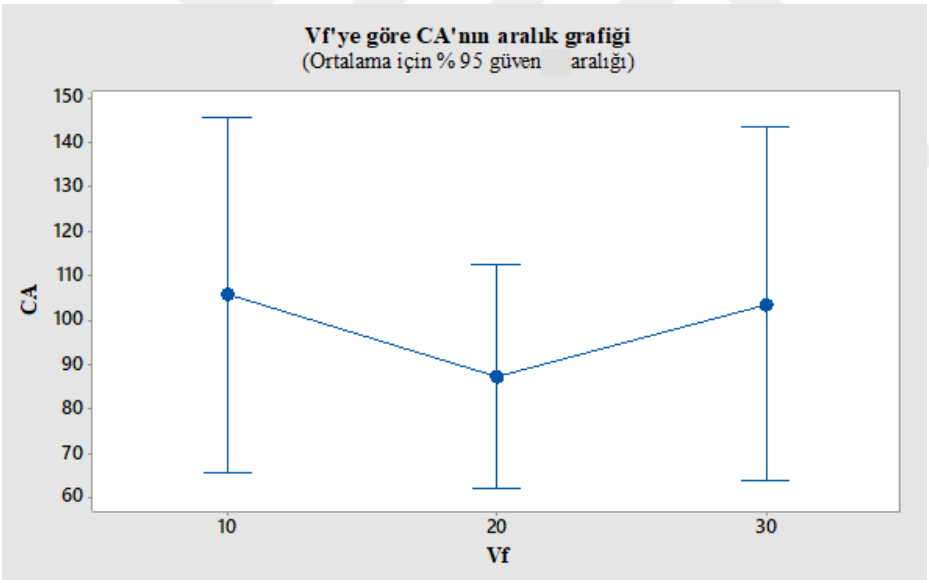
Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de, sırasıyla P, n, Vf ve dp faktörlerinin her bir seviyesinin CA yanıtı üzerindeki güven aralıklarını belirlemek için birleştirilmiş standart sapma kullanılmıştır.



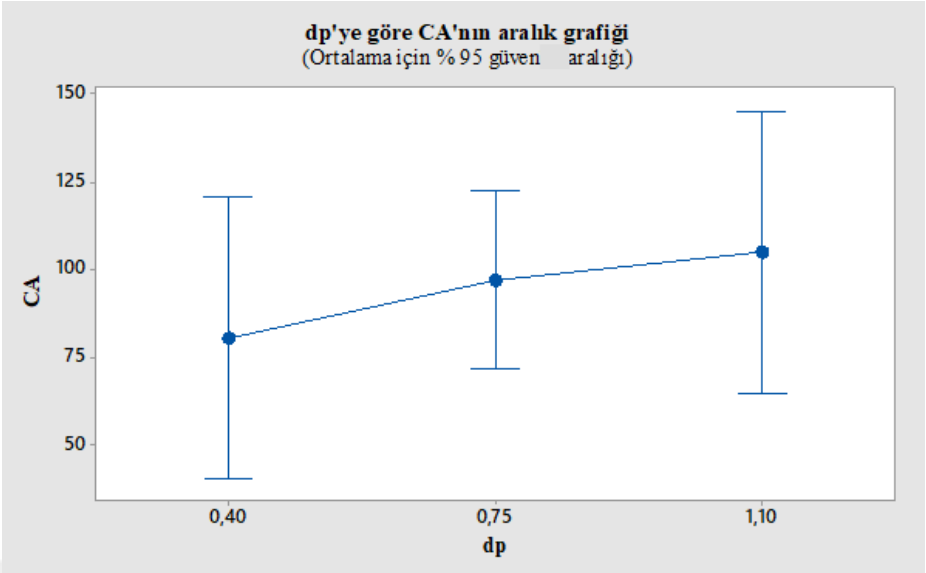
Şekil.4.28. P faktörüne göre CA'nın aralık grafiği



Şekil.4.29. n faktörüne göre CA'nın aralık grafiği

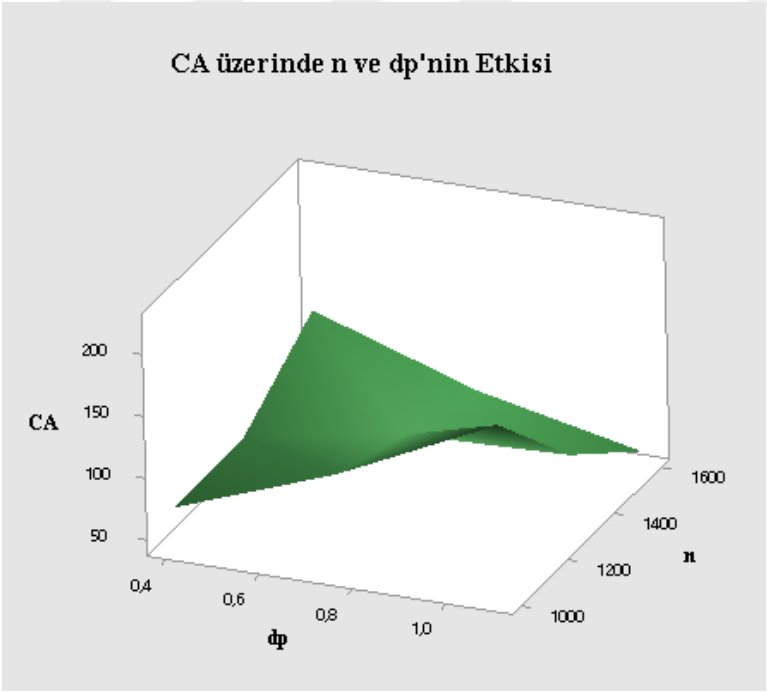


Şekil.4.30. V_f faktörüne göre CA'nın aralık grafiği



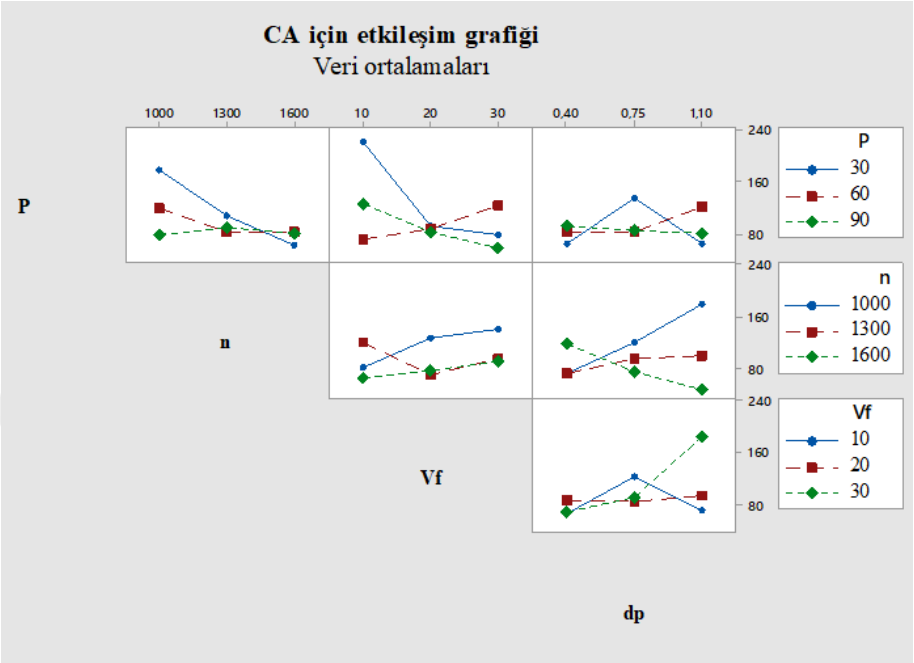
Şekil 4.31. dp faktörüne göre CA'nın aralık grafiği

Şekil 4.32'de görüldüğü gibi devir sayısı (n) artarken çapak alanı (CA) azalmakta, gagalama delme derinliği (dp) artarken çapak alanı (CA) da artmaktadır.



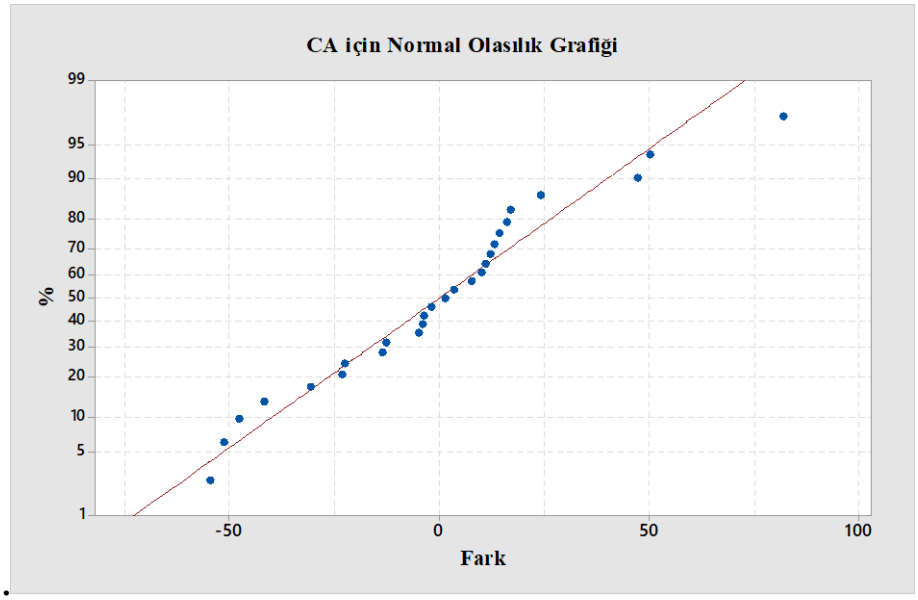
Şekil 4.32. İki parametre (n ve dp) etkileşiminin CA üzerindeki etkisi

CA için etkileşim grafiği Şekil 4.33'de verilmiştir. Bu grafikte iki farklı parametrenin seviyeleri arasındaki ikili etkileşim görülmektedir.



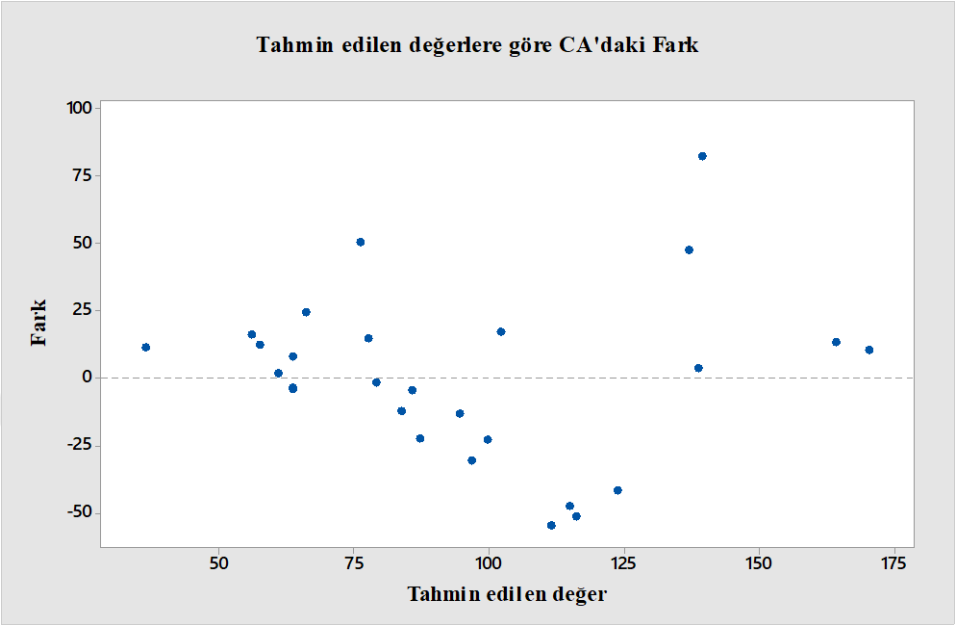
Şekil 4.33. CA için etkileşim grafiği

CA için normal olasılık grafiği, normallikten önemli sapmaları belirler (Şekil 4.34).



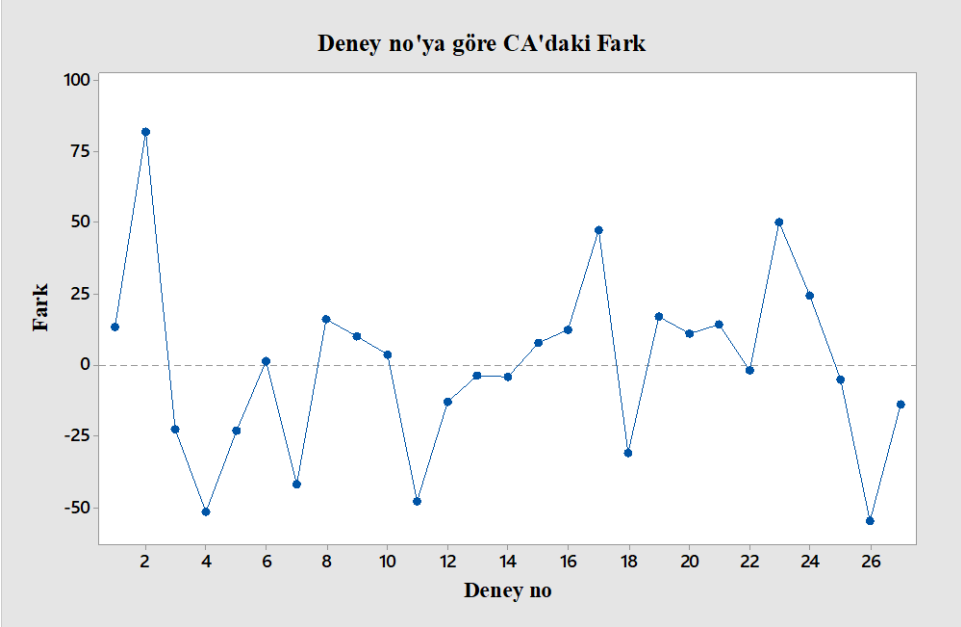
Şekil 4.34. CA'daki farkların normal dağılıma uyum grafiği

Artık (fark) değerlerine karşın yanıt değişkeni CA'nın tahmin değerlerinin grafiği Şekil 4.35'deki gibidir.



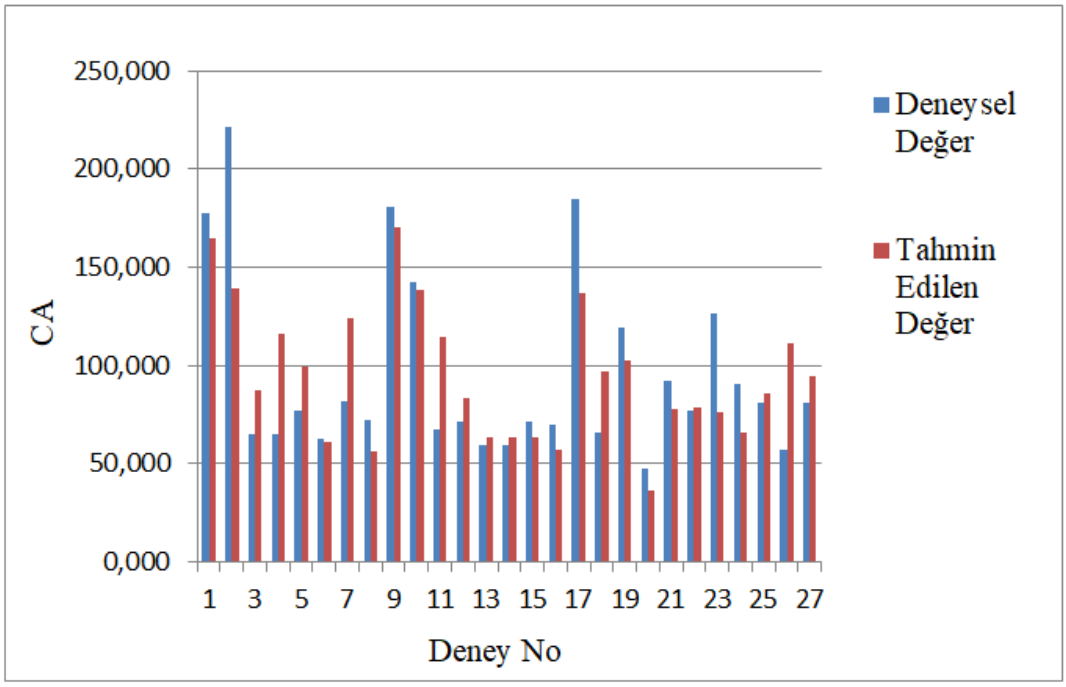
Şekil 4.35. CA'daki farklara karşı uygun değer grafiği

CA'daki farka karşı deney sırası Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. CA'daki farklara karşı deney sırası grafiği

CA bağımlı değişkeninin, modelden tahmin edilen değeri ile deney sonucu arasındaki fark Şekil 4.37'de görülmektedir. Deneysel (gerçek) değer ile tahmin edilen (teorik) değer arası fark ortalama % 23,8'dir.



Şekil 4.37. CA'nın modelden tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri

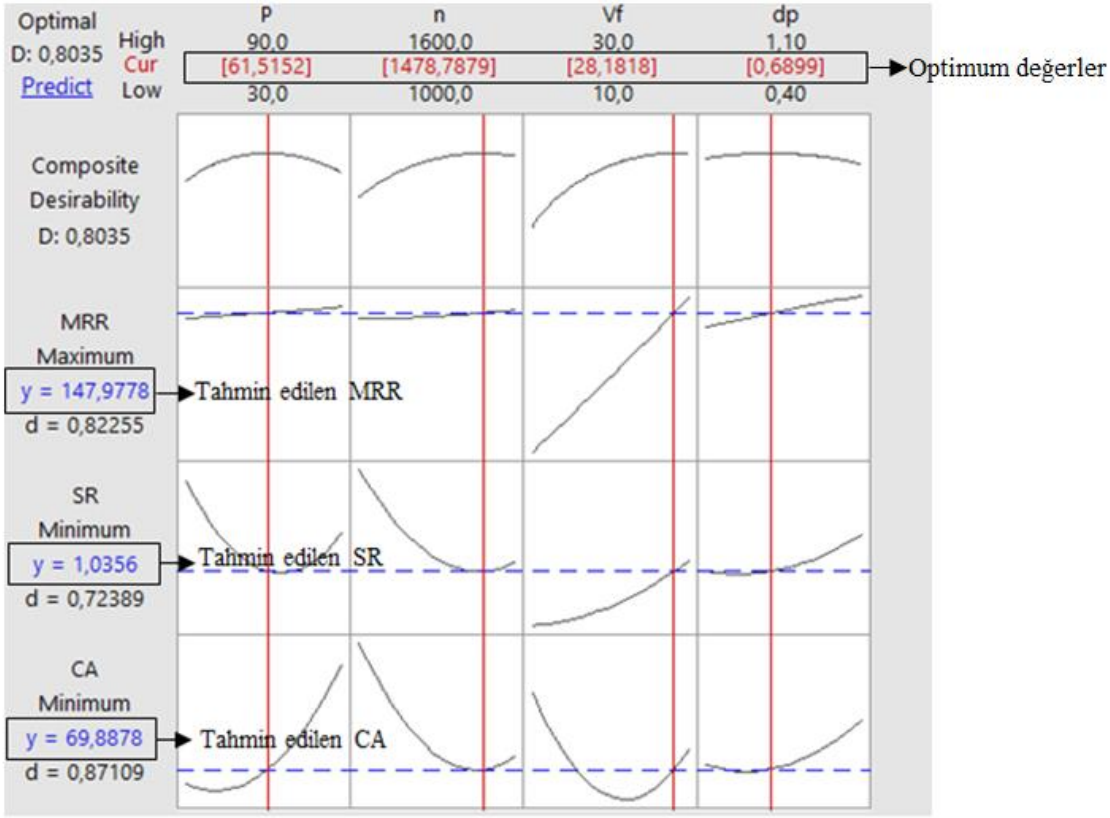
4.3. Optimizasyon Sonuçları

4.3.1. Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) ile Çok Yanıtlı Optimizasyon

Bu çalışmada MRR, SR ve CA yanıt değerleri, kompozit arzu edilebilirlik yaklaşımı kullanılarak, eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3) ile verilen modeller üzerinden eşzamanlı olarak optimize edilmiştir. Optimal şartlar, Şekil 4.38'de görüldüğü gibi Response Optimizer ile türetilmiştir. Parametrelerin (girdi faktörlerinin) bulunan optimum değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelge 4.9'da optimal çözüm ile ilgili değerler verilmiştir. Optimizasyondan sonra tahmin edilmiş yanıt değerleri (predicted values) ile doğrulama deneyleri yapılarak bulunan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Optimum şartlarda yapılan deneylerin sonuçları ile tahmin edilen sonuçlar ve aralarındaki fark (%) Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Parametrelerin bulunan optimum değerleri

Parametreler	Optimum değerler
Ultrasonik güç: P (%)	61,515
Devir sayısı: n (rpm)	1 478,788
İlerleme hızı: V_f (mm/dak)	28,182
Gagalama delme derinliği: dp (mm)	0,69



Şekil 4.38. MRR, SR ve CA'nın çoklu optimizasyonu için arzu edilebilir (D: 0,8035) yaklaşımlı grafik

Şekil 4.38'de görülen optimal D (desirability) değeri, eşitlik (3.10) ile (bkz. Bölüm 3.7.1) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$w = (w_1 + w_2 + w_3) = (1 + 1 + 1) = 3$ alınmıştır.

$D = (d_{MRR}^{\ 1} + d_{SR}^{\ 1} + d_{CT}^{\ 1})^{1/3} = (0,82255 + 0,72389 + 0,87109)^{1/3} = 0,8035$

Çizelge 4.9. Çoklu optimizasyon çözümü

Yanıt	Amaç	Optimal çözüm				En düşük	Hedef	En yüksek	Ağırlık	Önem	Tahmini değer	d değeri
		P (%)	n (rpm)	V_f (mm/dak)	dp (mm)							
MRR (mm^3/s)	Maks.	61,515	1 478,788	28,182	0,69	47,036	169,755	169,755	1	1	147,978	0,82255
SR (µm)	Min.	61,515	1 478,788	28,182	0,69	0,653	0,653	2,039	1	1	1,036	0,72389
CA (mm^2)	Min.	61,515	1 478,788	28,182	0,69	47,421	47,421	221,711	1	1	69,888	0,87109

Çizelge 4.10. Yanıtların tahmin edilen değerleri ile deneysel sonuç değerleri

Çoklu yanıt optimizasyonundaki Yanıtlar	Amaç	Tahmin edilen değerler	Deneysel sonuçlar	Sonuçlar arasındaki fark (%)
MRR (mm^3/s)	Maksimum	147,978	147,631	0,234
SR (µm)	Minimum	1,036	0,938	9,424
CA (mm^2)	Minimum	69,888	55,931	19,970

Girdi parametrelerinin optimum değerleri seçildikten sonra çıktı yanıtları yüzey yanıt metodundaki arzu edilebilirlik yaklaşımı ile tahmin edilmiş ve optimum parametre şartları kullanılarak, döner ultrasonik imalat ile kuvars cam üzerinde deney yapılıp bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulunan optimum parametrelere göre tahmin edilen sonuçların değerleri, yapılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, MRR için % 0,2, SR için % 9,4, CA için % 19,9 aralığında fark olduğu görülmüştür (Çizelge 4.10). Yanıt değerler için güven aralıkları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Çoklu optimizasyonda güven aralığı

Yanıt	Tahmin edilen değerler	Deneysel sonuçlar	% 95 CI low	% 95 CI high
MRR	147,98	147,631	145,46	150,5
SR	1,036	0,938	0,805	1,266
CA	69,9	55,931	16,8	122,9

4.3.2. Gri İlişki Analizi Yöntemi (GRA) ile Çok Yanıtlı Optimizasyon

Bu çalışmada, çoklu performans özelliklerine sahip RUD proses parametrelerini optimize etmek için RSM ile birlikte GRA yöntemi de kullanılmıştır. Öncelikle, deneyler RSM yöntemindeki BBD tasarımı ile planlanmıştır. Gri ilişki analizi (GRA), performans parametrelerini, kaldırılan malzeme hacmi (MRR), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve çapak alanı (CA) üzerinde çoklu optimize edecek şekilde uyarlanmıştır. Daha sonraki aşamalarda, değişkenlerin, MRR, SR ve CA performans karakteristikleri üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için varyans analizi (ANOVA) yaklaşımı seçilmiştir.

GRA yönteminin adımlarından biri olan normalizasyon işlemi için, bu çalışmada RSM_BBD ile tasarlanan ve yapılan deney sonuçları (bkz. Çizelge 4.1) kullanılacaktır.

MRR, SR ve CA'nın deney sonuçları alınıp, normalize edilen değerler Çizelge 4.12'de belirtilmiştir. MRR için (3.11) eşitliği, SR ve CA için (3.12) eşitliği (bkz. Bölüm 3.7.2. GRA) kullanılmıştır.

Çizelge 4.12. Normalizasyon verileri

Deney No	Sonuçlar (Responses)			Normalizasyon (Normalization)		
	CA (mm^2)	**SR Ra ort. (µm)**	**MRR (mm^3/s)**	**CA (mm^2)**	**SR Ra ort. (µm)**	**MRR (mm^3/s)**
1	177,779	2,039	101,816	0,252	0,000	0,446
2	221,711	1,943	51,265	0,000	0,069	0,034
3	64,712	1,601	96,012	0,901	0,316	0,399
4	64,813	1,607	105,783	0,900	0,312	0,479
5	76,719	1,735	154,506	0,832	0,219	0,876
6	62,433	1,370	101,816	0,914	0,483	0,446
7	82,170	1,090	51,740	0,801	0,685	0,038
8	72,289	1,626	94,288	0,857	0,298	0,385
9	180,864	1,514	107,017	0,234	0,379	0,489
10	142,343	1,861	154,862	0,455	0,128	0,879
11	67,309	**0,653**	47,036	0,886	1,000	0,000
12	71,241	0,741	53,755	0,863	0,937	0,055
13	59,801	0,920	103,479	0,929	0,807	0,460
14	59,527	0,845	103,716	0,931	0,862	0,462
15	71,282	0,944	103,716	0,863	0,790	0,462
16	69,724	1,139	141,431	0,872	0,649	0,769
17	184,431	1,341	**169,755**	0,214	0,503	1,000
18	66,088	0,672	56,233	0,893	0,986	0,075
19	119,376	1,073	102,884	0,587	0,697	0,455
20	**47,421**	1,236	112,679	1,000	0,579	0,535
21	92,105	1,284	162,325	0,744	0,545	0,939
22	77,223	1,291	107,507	0,829	0,540	0,493
23	126,532	0,938	53,754	0,546	0,794	0,055
24	90,468	1,046	98,594	0,753	0,716	0,420
25	80,946	1,203	111,696	0,808	0,603	0,527
26	56,962	1,222	162,680	0,945	0,590	0,942
27	81,164	0,976	108,453	0,806	0,767	0,500
Min	47,421	0,653	47,036	0	0	0
Maks.	221,711	2,039	169,755	1	1	1

Normalizasyondan sonra (3.15) eşitliği ile uzaklık matrisi, tüm girdi değişkenleri eşit öneme sahip olduğu için tanımlama katsayısı 0,5 alınarak (3.14) eşitliği ile de gri ilişki katsayıları hesaplanmıştır. Yanıtların normalize edilmiş değerleri kullanılarak hesaplanan gri ilişki katsayıları Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Hesaplanmış gri ilişki katsayısı (GRC) verileri

Deney No	Uzaklık Matrisi (Distance Matrix)			Gri İlişki Katsayısı (GRC) (Grey relational co-efficient)		
	CA (mm^2)	SR Ra ort. (µm)	MRR (mm^3/s)	CA (mm^2)	SR Ra ort. (µm)	MRR (mm^3/s)
1	0,748	1,000	0,554	0,401	0,333	0,475
2	1,000	0,931	0,966	0,333	0,349	0,341
3	0,099	0,684	0,601	0,834	0,422	0,454
4	0,100	0,688	0,521	0,834	0,421	0,490
5	0,168	0,781	0,124	0,748	0,390	0,801
6	0,086	0,517	0,554	0,853	0,492	0,475
7	0,199	0,315	0,962	0,715	0,613	0,342
8	0,143	0,702	0,615	0,778	0,416	0,448
9	0,766	0,621	0,511	0,395	0,446	0,494
10	0,545	0,872	0,121	0,479	0,365	0,805
11	0,114	0,000	1,000	0,814	1,000	0,333
12	0,137	0,063	0,945	0,785	0,888	0,346
13	0,071	0,193	0,540	0,876	0,722	0,481
14	0,069	0,138	0,538	0,878	0,783	0,482
15	0,137	0,210	0,538	0,785	0,705	0,482
16	0,128	0,351	0,231	0,796	0,588	0,684
17	0,786	0,497	0,000	0,389	0,502	1,000
18	0,107	0,014	0,925	0,824	0,973	0,351
19	0,413	0,303	0,545	0,548	0,623	0,479
20	0,000	0,421	0,465	1,000	0,543	0,518
21	0,256	0,455	0,061	0,661	0,523	0,892
22	0,171	0,460	0,507	0,745	0,521	0,496
23	0,454	0,206	0,945	0,524	0,709	0,346
24	0,247	0,284	0,580	0,669	0,638	0,463
25	0,192	0,397	0,473	0,722	0,558	0,514
26	0,055	0,410	0,058	0,901	0,549	0,897
27	0,194	0,233	0,500	0,721	0,682	0,500
Min.	0	0	0	Tanımlama katsayısı (ζ) = 0,5		
Maks.	1	1	1			

GRC hesaplandıktan sonraki adım, gri ilişki derecesi (GRG)'nin hesaplanmasıdır. GRC'lere göre (3.16) eşitliği ile hesaplanan gri ilişki dereceleri (GRG) ve bu derecelerin sırası Çizelge 4.14'te verilmiştir.

GRG değerleri maksimum değerden başlayıp, minimum değere doğru azalarak sıralanmıştır. En yüksek GRG, en iyi performansı gösterir. Çizelge 4.14'te maksimum GRG değeri, deney no 26 için bulunmuştur.

Çizelge 4.14. Gri ilişki dereceleri ve sıralaması

Deney No	**Gri İlişki Katsayısı (GRC) Grey relational co-efficient**			**Gri İlşki Derecesi (GRG) Grey Relation Grade Actual GRG**	
	CA (mm^2)	**SR Ra ort. (µm)**	**MRR (mm^3/s)**	**Ortalama GRG değeri**	**Sıralama (Ranking of GRG)**
1	0,401	0,333	0,475	0,403	26
2	0,333	0,349	0,341	0,341	27
3	0,834	0,422	0,454	0,570	19
4	0,834	0,421	0,490	0,581	18
5	0,748	0,390	0,801	0,647	11
6	0,853	0,492	0,475	0,606	14
7	0,715	0,613	0,342	0,557	20
8	0,778	0,416	0,448	0,548	23
9	0,395	0,446	0,494	0,445	25
10	0,479	0,365	0,805	0,549	22
11	0,814	1,000	0,333	0,716	3
12	0,785	0,888	0,346	0,673	9
13	0,876	0,722	0,481	0,693	5
14	0,878	0,783	0,482	0,714	4
15	0,785	0,705	0,482	0,657	10
16	0,796	0,588	0,684	0,689	7
17	0,389	0,502	1,000	0,630	13
18	0,824	0,973	0,351	0,716	2
19	0,548	0,623	0,479	0,550	21
20	1,000	0,543	0,518	0,687	8
21	0,661	0,523	0,892	0,692	6
22	0,745	0,521	0,496	0,587	17
23	0,524	0,709	0,346	0,526	24
24	0,669	0,638	0,463	0,590	16
25	0,722	0,558	0,514	0,598	15
26	0,901	0,549	0,897	**0,782**	**1**
27	0,721	0,682	0,500	0,634	12
Gri ilişki derecesi ortalama değeri : GRGm =				0,607	

Yapılan yirmi yedi deney arasında 26. deneyin, maksimum MRR, minimum SR ve minimum CA için en iyi performans şartlarına sahip olduğu görülmüştür. En yüksek GRG, ideal değere yakın olan deney şartlarını (P3_n2_V_f3_dp2) verir. En yüksek MRR, en düşük SR ve en düşük CA'ya ulaşılan 26. deney parametreleri % 90 ultrasonik güç, 1300 rpm devir sayısı, 30 mm/dak ilerleme hızı ve 0,75 mm gagalama delme derinliğidir.

GRG değeri hesaplandıktan sonra, girdi faktörlerinin her bir seviyesindeki GRG'lerin ortalaması alınarak, yeni ortalama GRG'ler aşağıdaki gibi hesaplanır.

Örneğin, ultrasonik güç (P) faktörünün 1. Seviyesi için GRG, GRG P1 olarak gösterilirse, P'nin 1. Seviyesi olan %30 güç için hesaplanan GRG aşağıdaki gibidir.
1.,2.,3.,4.,5. ve 6. deneylerde, ultrasonik güç (P) %30 alınmıştır. Bu deneylere karşılık gelen GRG değerlerinin ortalaması GRG P1'i verecektir.
GRG P1 = (0,403 + 0,341 + 0,570 + 0,581 + 0,647 + 0,606) / 6 = 0,525 bulunur.
Devir sayısı (n) faktörünün 1. Seviyesi olan 1000 rpm için de aynı işlem yapılır.
Deney tasarımına göre, devir sayısı (n)'nın 1000 rpm alındığı deneyler, 1., 7., 8., 9., 10. ve 22. deneylerdir. Toplam 6 deneyde 1000 rpm devir sayısı kullanılmıştır.
GRG n1 = (0,403 + 0,557 + 0,548 + 0,445 + 0,549 + 0,587) / 6 = 0,515 bulunur.
İlerleme hızı (V_f) faktörünün 1. Seviyesi olan 10 mm/dak, 2., 7., 11., 12., 18. ve 23. deneylerde kullanılmıştır.
GRG V_f1 = (0,341 + 0,557 + 0,716 + 0,673 + 0,716 + 0,526) / 6 = 0,588 bulunur.
Gagalama delme derinliği (dp) faktörünün 1. Seviyesi olan 0,40 mm, 3., 8., 11., 16., 19. ve 24. deneylerde kullanılmıştır. Buna göre,
GRG dp1 = (0,570 + 0,548 + 0,716 + 0,689 + 0,550 + 0,590) / 6 = 0,610 bulunur.

Her bir faktörün (parametrenin), 3 farklı seviyesi için ortalama GRG ler ayrı ayrı hesaplanarak bulunur. Deneyde kullanılan 4 parametrenin 3 seviyesi için oluşturulmuş ortalama GRG tablosu Çizelge 4.15'de verilmiştir.

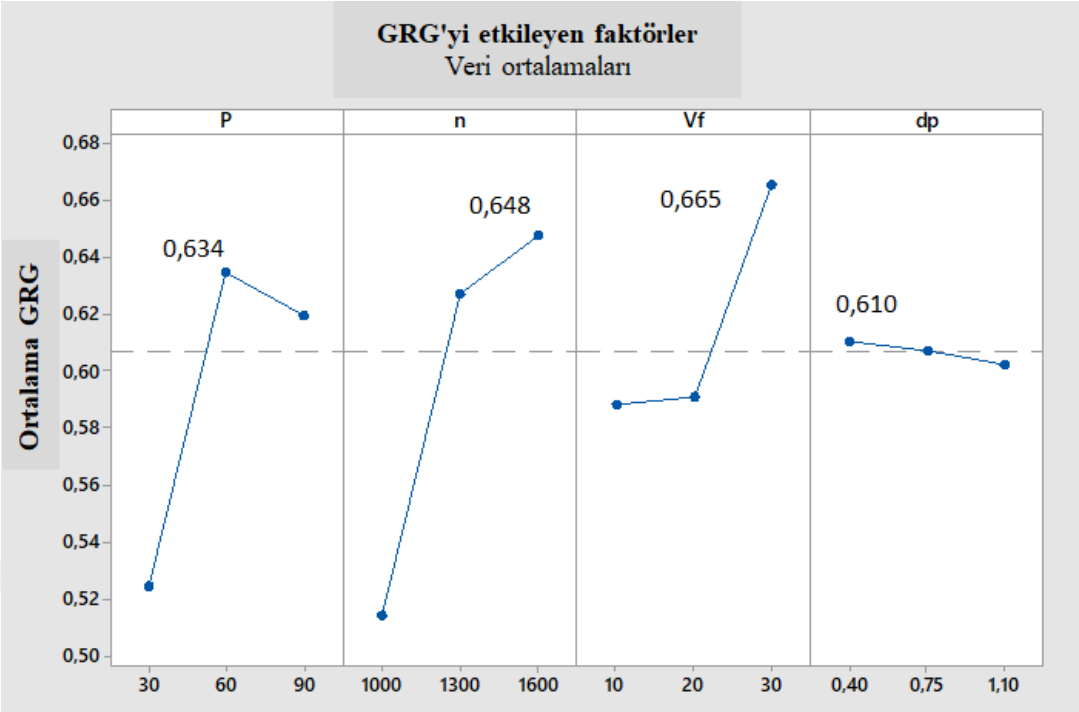
Çizelge 4.15. Parametrelerin seviyeleri için ortalama GRG

Parametre		**Seviye 1**	**Seviye 2**	**Seviye 3**	**En Önemli Etki Seviye Farkı** (Maks. Seviye – Min. Seviye)
P	Ultrasonik güç	0,525	**0,634**	0,620	0,109
n	Devir sayısı	0,515	0,627	**0,648**	**0,133**
V_f	İlerleme hızı	0,588	0,591	**0,665**	0,077
dp	Gagalama delme derinliği	**0,610**	0,607	0,602	0,008

Döner ultrasonik delme prosesi ile kuvars parçanın delme işleminde yapılan toplam 27 deneyde kullanılan her bir parametrenin her bir seviyesi için hesaplanan ortalama GRG'ler ve en önemli etkiyi bulmak için GRG farkları Çizelge 4.15'de verilmiştir. Buna göre, farkın maksimum (0,133) olduğu parametre devir sayısıdır ve sonuçlar üzerinde en etkili parametredir. Bunu ultrasonik güç, ilerleme hızı ve gagalama delme derinliği takip eder.

Daha yüksek daha iyi olan GRG'lerin olduğu seviyelere göre Çizelge 4.15'den optimum parametre seviyeleri, P2_n3_V_f3_dp1 olarak seçilir. Buna göre, P'nin 2. Seviyesi % 60, n'nin 3. Seviyesi 1600 rpm, V_f'nin 3. Seviyesi 30 mm/dak, dp'nin 1. Seviyesi ise 0,40 mm'dir. Bulunan optimum parametre şartlarında deney yapılıp, MRR 145,310 mm^3/s, SR 0,958 μm, CA 64,355 mm^2 olarak hesaplanmıştır..

Daha yüksek MRR, daha düşük SR ve daha düşük CA'ya karşılık gelen daha yüksek değerli GRG'ler üzerinde RUD proses parametrelerinin etkileri Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39. Proses parametrelerinin GRG üzerindeki etkileri

Şekil 4.39'daki GRG'yi etkileyen faktörler yardımıyla optimal parametre şartları bulunduktan sonra, bu şartlar, çok yanıtlı optimizasyon için çoklu yanıtı temsil eden GRG'nin tahmin edilen değerini hesaplamak için kullanılır.

ANOVA uygulamasının temel amacı, çıktı yanıtlar üzerinde her bir parametrenin önemli etkilerini incelemek içindir. GRG için ANOVA tablosu Çizelge 4.16'da verilmiştir. ANOVA sonucuna göre, devir sayısı (n) parametresi en önemli girdi işlem değişkenidir. Bu değişkenin p değeri de 0,05'in altında olduğu için istatistiksel açıdan anlamlıdır.

GRG için olan ANOVA tablosunda, F değeri en büyük olan devir sayısı faktörünün sonuçlar üzerindeki etkisi önemlidir. Devir sayısı, katkı yüzdesi en yüksek parametre olup, yanıtlar üzerinde en önemli değişkendir. Ultrasonik güç, ilerleme hızı ve gagalama delme derinliği sırasıyla ikinci, üçüncü ve dördüncü önemli parametrelerdir.

Çizelge 4.16. GRG için ANOVA

Kaynak (Source)	Kareler toplamı (Sum of squares)	Serbestlik derecesi (dof)	Ortalama kare (mean square)	F değeri (F-value)	p değeri (p value)	% Katkı (% Contribution)
Model	0,174	14	0,012	1,66	0,191	
P	0,027	1	0,027	3,62	0,081	10,248
n	0,053	1	0,053	7,07	0,021 *	**20,036**
V_f	0,018	1	0,018	2,37	0,150	6,706
dp	0,000	1	0,000	0,03	0,875	0,074
P*P	0,036	1	0,036	4,82	0,048 *	13,664
n*n	0,025	1	0,025	3,38	0,091	9,568
V_f*V_f	0,000	1	0,000	0,00	0,984	0,001
dp*dp	0,005	1	0,005	0,68	0,424	1,938
P*n	0,006	1	0,006	0,82	0,383	2,320
P*V_f	0,001	1	0,001	0,08	0,781	0,229
P*dp	0,000	1	0,000	0,00	0,985	0,001
n*V_f	0,000	1	0,000	0,01	0,927	0,025
n*dp	0,014	1	0,014	1,92	0,191	5,447
V_f*dp	0,000	1	0,000	0,01	0,926	0,025
Hata (Error)	0,090	12	0,007			34,006
Uyum eksikliği (Lack-of-Fit)	0,088	10	0,009	10,56	0,090	33,374
Saf hata (Pure Error)	0,002	2	0,001			0,632
Toplam (Total)	0,264	26	0,010			
R^2 65,99 %	Düzeltilmiş R^2 (adjusted) 26,32 %			Tahmin edilen R^2 (predicted) 0,00 %		

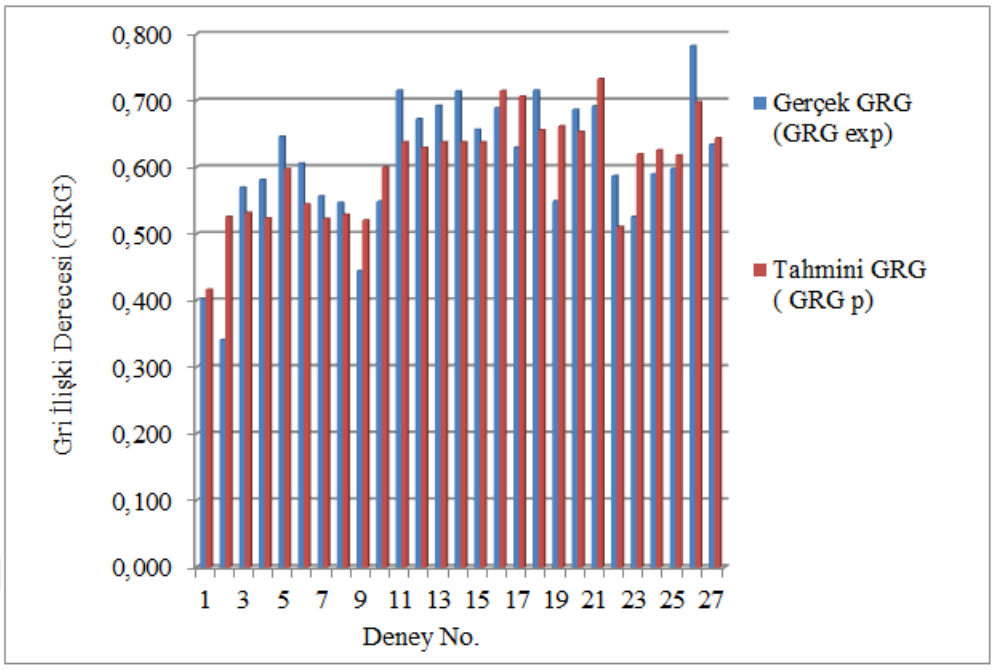
Anova tablosunda p değeri 0,05'in altında olan parametrelerin etkileri önemlidir ve bunlar (*) ile gösterilmiştir.

Şekil 4.39'da görüldüğü gibi bulunan optimum parametre şartları olan P2_n3_V_f3_dp1 kullanılarak, GRG'nin tahmin edilen değeri, eşitlik (3.18) ile hesaplanır (bkz. Bölüm 3.7.2. GRA). Deney setindeki 27 deneyin her birinin şartları için tahmini GRG (GRG p) değerleri, eşitlik (3.18) kullanılarak hesaplanmış ve gerçek (deneysel) GRG (GRG exp) değerleri arasındaki fark (hata) % olarak, Çizelge 4.17'de verilmiş, Şekil 4.40'da grafik ile gösterilmiştir. GRG değerleri arasındaki fark ortalama % 9,18'dir.

GRG değerleri için Çizelge 4.17'de verilen % Fark, gerçek GRG ile tahmin edilen GRG arasındaki farkın, tahmin edilen GRG'ye göre %'sidir.

Çizelge 4.17. Gerçek ve tahmini GRG değerleri

Deney No	**Gerçek GRG exp**	**Tahmini GRG p**	**% Fark (Hata)**
1	0,403	0,417	-3,393
2	0,341	0,526	-35,110
3	0,570	0,532	7,206
4	0,581	0,524	10,945
5	0,647	0,598	8,124
6	0,606	0,545	11,265
7	0,557	0,523	6,468
8	0,548	0,529	3,501
9	0,445	0,521	-14,553
10	0,549	0,600	-8,452
11	0,716	0,638	12,201
12	0,673	0,630	6,822
13	0,693	0,638	8,574
14	0,714	0,638	11,953
15	0,657	0,638	2,989
16	0,689	0,715	-3,577
17	0,630	0,707	-10,868
18	0,716	0,656	9,135
19	0,550	0,662	-16,977
20	0,687	0,654	5,055
21	0,692	0,733	-5,573
22	0,587	0,511	14,953
23	0,526	0,620	-15,119
24	0,590	0,626	-5,736
25	0,598	0,618	-3,258
26	**0,782**	**0,698**	12,090
27	0,634	0,644	-1,478
Ortalama % IFarkI			% 9,18



Şekil 4.40. Deney şartlarına göre gerçek ve tahmini GRG

GRA analizine göre bulunan optimum parametrelere (P2_n3_V_f3_dp1) göre, tahmin edilen GRG p değeri, eşitlik (3.18) ile hesaplanıp, Çizelge 4.18'de verilmiştir.

GRG p = (GRG P $_{L2}$ + GRG n $_{L3}$ + GRG $V_{f\,L3}$ + GRG dp $_{L1}$) – (3 x GRG m)

GRG p (optimum) = (0,634 + 0,648 + 0,665 + 0,610) – (3 x 0,607) = 0,736 bulunur.

GRG p'nin güvenilirliğini kontrol etmek için güven aralığı (C.I.), eşitlik (3.19) ve (3.20) ile hesaplanır (bkz. Bölüm 3.7.2. GRA)

$$C.I. = \sqrt{F\alpha\,(n1, n2)\; x\; Ve\; x\; [\frac{1}{neff} + \frac{1}{R}]} = \sqrt{4{,}75\;\; x\; 0{,}007478\; x\; [\frac{1}{(27/5)} + \frac{1}{3}]}$$

C.I. = √ (0,01842) = 0,13571 bulunur.

η1=1'dir. η2=fe=dof (hata)=12'dir. ANOVA tablosundan Ve=0,007478 okunur.

Fα (1,12) = 4,75 olarak F tablosundan okunur (Savaşkan, 2003). R=3, N=27.

ηeff = 27 / (1 + (DOF GRGP + DOF GRGn + DOF GRGV_f + DOF GRG dp)) = 27/5

Fα(1,12), % 95 için F tablosundan okunur (Savaşkan, 2003). GRA yöntemi ile bulunan optimum şartlar için, tahmin değeri GRG p = 0,736 ve güven aralığı C.I.=0,13571, (3.21) eşitliğinde yazılarak (GRG p - C.I. ≤ GRG exp ≤ GRG p + C.I) =

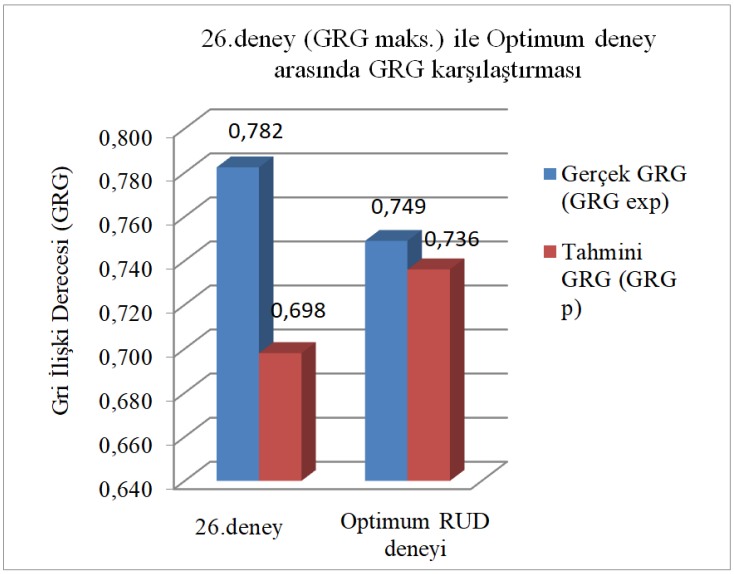
(0,736 – 0,13571 ≤ GRG exp ≤ 0,736 + 0,13571) GRG exp için deney aralığı (0,600 ≤ GRG exp ≤ 0,872) bulunur (Çizelge 4.18).

Çizelge 4.18. GRA yöntemi ile bulunmuş en iyi ve optimum şartların GRG değerleri

	GRA'da GRG'si en yüksek olan (en iyi performanslı) 26. deneyin RUD parametreleri		GRA ile önerilmiş Optimum RUD parametreleri	
	Tahmini değer GRG p	Gerçek deneysel değer GRG exp.	Tahmini değer GRG p	Doğrulama deneyleri GRG exp
Parametre Seviyesi	P3_n2_V_f3_dp2	P3_n2_V_f3_dp2	P2_n3_V_f3_dp1	P2_n3_V_f3_dp1
GRG	0,698	0,782	0,736	$0,600 \leq$ GRG exp $\leq 0,872$

Çizelge 4.18'de görüldüğü gibi GRA analiz yöntemi ile bulunmuş optimum parametre kombinasyonunda, eşitlik (3.18) ile tahmin edilen GRG p değeri 0,736 hesaplanmış, optimum şartlarda yapılan deney sonucuna göre GRG exp. 0,749 bulunmuştur, bulunan değer, doğrulama deney aralığı ($0,600 \leq$ GRG exp $\leq 0,872$) içindedir.

Gerçek (deneysel) GRG exp ile tahmini (teorik) GRG p değeri arasındaki fark, 26. deney şartlarında (P3_n2_V_f3_dp2) %12, optimum deney şartlarında (P2_n3_V_f3_dp1) ise %1,8'dir. Şekil 4.41'de görüldüğü gibi optimum deney şartlarında gerçek GRG ile teorik GRG arasındaki fark daha azdır. Bu farkın az olması, GRA analizi ile bulunan optimum şartların doğruluğu için önemlidir.



Şekil 4.41. 26. deney ile optimum deney arasında GRG karşılaştırması

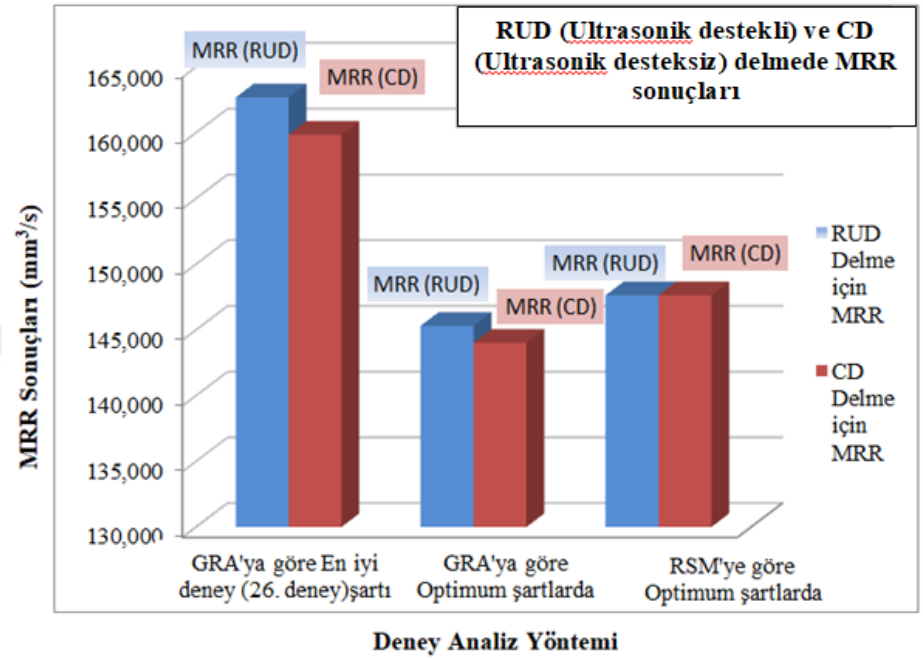
4.4. Optimum Şartlarda Ultrasonik Destekli ve Ultrasonik Destek Olmadan İmalat Yapılıp Sonuçların Değerlendirilmesi

Döner ultrasonik destekli delme prosesinde, deney sonuçlarına uygulanan yüzey yanıt metodolojisi (RSM) ve gri ilişki analizi (GRA) yöntemleri ile bulunan optimum işlem parametreleri ile ultrasonik destekli ve ultrasonik destek olmadan deneyler yapılmış sonuçlar Çizelge 4.19'da verilmiştir.

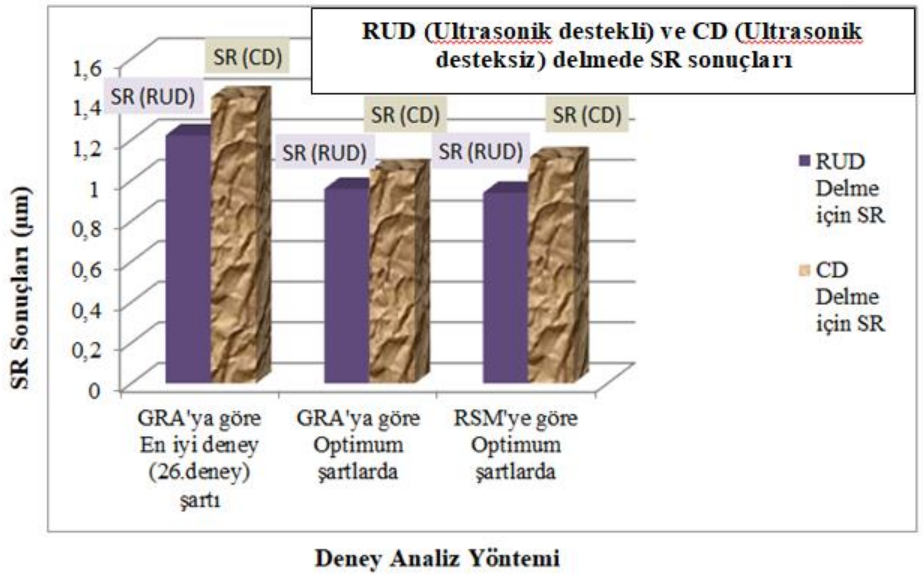
Çizelge 4.19. Optimum şartlarda ultrasonik destekli ve ultrasonik desteksiz deney sonuçları

Analiz türü / İmalat yöntemi / Seviyeler	**Faktörler**				**Sonuçlar**		
	P (%) Ultrasonik güç	**n (rpm)** Devir sayısı	**V_f (mm/dak)** İlerleme hızı	**dp (mm)** Gagalama delme derinliği	**CA (mm^2)** Çapak alanı	**SR Ra ort. (µm)** Yüzey pürüzlülüğü	**MRR (mm^3/s)** Kaldırılan malzeme hacmi
GRA 26.deney Ultrasonik destekli (RUD) En iyi performans P3_n2_V_f3_dp2	90	1300	30	0,75	56,962	1,222	162,680
GRA 26.deney Ultrasonik desteksiz (CD) En iyi performans n2_V_f3_dp2	0	1300	30	0,75	54,301	1,408	159,841
GRA Optimum Ultrasonik destekli (RUD) P2_n3_V_f3_dp1	60	1600	30	0,40	64,355	0,958	145,310
GRA Optimum Ultrasonik desteksiz (CD) n3_V_f3_dp1	0	1600	30	0,40	64,001	1,050	144,018
RSM Optimum Ultrasonik destekli (RUD)	61,52	1478,79	28,18	0,69	55,931	0,938	147,631
RSM Optimum Ultrasonik desteksiz (CD)	0	1478,79	28,18	0,69	63,657	1,109	147,631

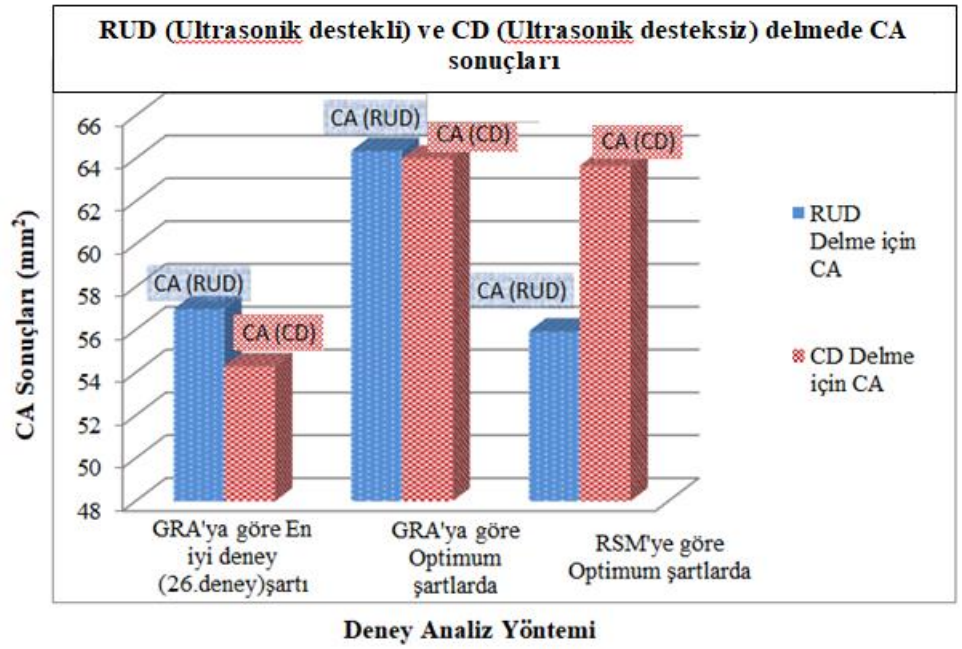
Optimum şartlar altında, sırasıyla MRR, SR ve CA'nın döner ultrasonik destekli delme (RUD) ile ultrasonik desteğin olmadığı geleneksel delme (CD) prosesinin karşılaştırılması, Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de verilmiştir.



Şekil 4.42. MRR'nin delme yöntemleri (RUD & CD) arasında karşılaştırılması



Şekil 4.43. SR'nin delme yöntemleri (RUD & CD) arasında karşılaştırılması



Şekil 4.44. CA'nın delme yöntemleri (RUD & CD) arasında karşılaştırılması

5. SONUÇ

Bu çalışmada kuvars cam üzerinde, farklı RUD parametrelerinin etkileri, RSM ve GRA yöntemleri gibi iki farklı yöntem kullanılarak deneysel olarak bulunmuştur. Delinmiş kuvars camın delik kalitesini ölçmek için kaldırılan malzeme hacmi (MRR), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve çapak alanı (CA) modelleri geliştirilmiştir.

RSM tekniği kullanılarak, MRR, SR ve CA için tahmini modellerin oluşturulduğu ve optimal şartların sağlandığı sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Yanıt yüzey analizinden alınan grafiklere göre, kuvars camın döner ultrasonik delinmesinde, kaldırılan malzeme hacmi (MRR), tüm parametrelerden etkilenmiştir. Ancak MRR'yi en çok etkileyen parametre en büyük katkı yüzdesiyle ilerleme hızı (V_f) olmuştur. İlerleme hızındaki artış MRR'yi artırırken, SR'yi de artırmıştır. Ancak V_f, 10 mm/dak'dan 20 mm/dak' ya çıkarken CA'nın önce azalmasına sebep olurken, V_f'nin 20 mm/dak' dan 30 mm/dak'ya çıkışı ile CA da artış görülmüştür.

Ultrasonik güç (P) faktörü, MRR'deki artışta daha az etkili olurken SR'nin azalmasındaki katkısı daha büyük olmuştur. P, % 30 dan % 60'a çıkarken, SR'de hızlı bir düşüş yani yüzey pürüzlülüğünde iyileşme olmuştur.

Devir sayısı (n)'in 1000 rpm ile 1300 rpm arasındaki artışı ile çapak alanı (CA) keskin bir şekilde azalmıştır. Optimum noktadan sonra yavaşça artışa geçmiştir.

Devir sayısı (n) ile birlikte gagalama delme derinliği (dp)'nin iki faktörlü etkileşiminin çapak alanı üzerindeki etkisinin p değeri 0,074 olduğu için sınırda bir anlamlılığı vardır. Çapak alanı, devir sayısındaki artış ile azalırken, gagalama delme derinliğindeki artış ile artmıştır.

Çok yanıtlı optimizasyon yöntemlerinden olan Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) kullanılarak, arzu edilebilir (desirability) yaklaşıma göre, MRR'nin maksimum, SR ve CA'nın minimum olması amacıyla, kuvars camın proses parametrelerinin optimum

şartları, ultrasonik güç (P) için % 61,515 (% 62), devir sayısı (n) için 1478,788 (1479) rpm, ilerleme hızı için 28,182 (28) mm/dak ve gagalama delme derinliği için 0,69 mm olarak bulunmuştur. Optimal çözüm ile bulunan bu parametreler ile doğrulama deneyi yapıldığında, deney sonuçlarının MRR için 147,631 mm^3/s, SR için 0,938 μm, CA için 55,931 mm^2 olduğu görülmüştür.

Çoklu optimizasyon için ayrıca GRA yöntemi de kullanılmıştır. Gri İlişki Analizi (GRA) kullanılarak RUD parametreleri optimize edildiğinde yapılan yirmi yedi deney arasında, gri ilişki derecesi (GRG) değeri maksimum olduğu için en iyi performansa sahip olan deneyin 26. deney olduğu görülmüştür. Maksimum çoklu performans karakteristiklerini ortaya koyan ve GRG sıralamasında, en yüksek GRG değeri ile birinci sırada olan 26. deneydeki şartlar, P3_n2_V_f3_dp2 şeklindedir. RUD prosesi ile işlenmiş kuvars malzemede en yüksek MRR, en düşük SR ve en düşük CA'ya ulaşılan 26. deneyin parametreleri % 90 ultrasonik güç, 1300 rpm devir sayısı, 30 mm/dak ilerleme hızı ve 0,75 mm gagalama delme derinliğidir. En yüksek GRG değeri, 26. deney kombinasyonu ile elde edilmiştir. Deney sonucuna göre MRR 162,680 mm^3/s, SR 1,222 μm, CA 56,962 mm^2 olarak bulunmuştur.

RSM yönteminin BBD tasarımına göre yapılan deneylerde 4 parametre, 3 seviye kullanılmıştır. Parametrelerin her bir seviyesinin ortalama GRG değerleri hesaplanarak, en büyük GRG değerine karşılık gelen seviyeler optimum parametre seviyeleri olarak kabul edilmiş ve optimum şartlar, P2_n3_V_f3_dp1, yani % 60 ultrasonik güç, 1600 rpm devir sayısı, 30 mm/dak ilerleme hızı ve 0,40 mm gagalama delme derinliği olarak bulunmuştur. Bu şartlar, denenmeyen bir parametre kombinasyonu olduğu için, bulunan optimum şartlarda deney yapılmıştır. GRA analizine göre optimum şartlarda yapılan deney sonucunda, MRR 145,310 mm^3/s, SR 0,958 μm, CA 64,355 mm^2 bulunmuştur.

Parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan ortalama GRG lerin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkı ve katkı yüzdesi en büyük olan devir sayısıdır. Sonuçlar üzerinde en etkili parametrenin öncelikle devir sayısı faktörü, sonra sırasıyla ultrasonik güç, ilerleme hızı ve gagalama delme derinliği olduğu görülmüştür.

RSM ve GRA analizleri ile bulunan optimum şartlarda ultrasonik güç olmadan da deneyler yapılmış sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ultrasonik destekli ile ultrasonik desteksiz imalat arasındaki en büyük fark, yüzey pürüzlülüğünde görülmüştür. Ultrasonik destekli imalatta, yüzey pürüzlülüğünde % 9,6'dan % 18,2'ye varan iyileşme görülürken, MRR sonuçlarında çok fazla fark görülmemiştir. Çapak alanında, özellikle RSM optimizasyon şartlarında %13,8 iyileşme görülmüştür.

Gelecekte yapılması planlanan çalışma olarak devir sayısı parametresinde değişiklik yapılarak kuvars cam işleme prosesinin daha yüksek devirlerle gerçekleştirilmesi ve yüksek devirlerin işleme olan etkilerinin daha detaylı incelenmesi hedeflenmektedir. Buna ek olarak gücün yanısıra ultrasonik frekans ve genliğin sürece olan etkisinin de incelenmesi önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

Akbulut, Ö. (2024). Bilimsel Makalelerde Raporlanması Önerilen Çıkarımsal İstatistikler. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, *27*(1), 238-247. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1282850.

Anwar, S., Nasr, M. M., Pervaiz, S., Al-Ahmari, A., Alkahtani, M., ve El-Tamimi, A. (2018). A study on the effect of main process parameters of rotary ultrasonic machining for drilling BK7 glass. Advances in Mechanical Engineering, 10(1), 1687814017752212.

Azarhoushang, B., ve Akbari, J. (2007). Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7-8), 1027-1033.

Choi, S. J., Lee, C. M., ve Kim, D. H. (2022). Experimental investigation for multiresponse optimization in rotary ultrasonic side milling of quartz. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(3-4), 1583-1597. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09993-5.

Çaydaş, U., ve Hasçalık, A. (2004). CNC Tel Erezyon Tezgahlarında Farklı Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (006), 201-214.

Gao, J., Caliskan, H., ve Altintas, Y. (2019). Sensorless control of a three-degree-of-freedom ultrasonic vibration tool holder. *Precision Engineering*, 58, 47-56.

Geng, D., Lu, Z., Yao, G., Liu, J., Li, Z., ve Zhang, D. (2017). Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of thick CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *123*, 160-170.

Han, C., Luo, M., Zhang, D., & Wu, B. (2018). Iterative learning method for drilling depth optimization in peck deep-hole drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, *140*(12), 121009.

Hu, Y., Wang, H., Ning, F., Cong, W., ve Li, Y. (2017, June). Surface grinding of optical BK7/K9 glass using rotary ultrasonic machining: an experimental study. In International Manufacturing Science and Engineering Conference (Vol. 50725, p. V001T02A014). American Society of Mechanical Engineers.

Jain, A. K., ve Pandey, P. M. (2016). Study of Peck drilling of borosilicate glass with RUM process for MEMS. Journal of Manufacturing Processes, 22, 134-150.

Jiao, Y., Liu, W. J., Pei, Z. J., Xin, X. J., ve Treadwell, C. (2005). Study on edge chipping in rotary ultrasonic machining of ceramics: an integration of designed experiments and finite element method analysis.

Kumar, V. (2013). Optimization and modelling of process parameters involved in ultrasonic machining of glass using design of experiments and regression approach. American Journal of Materials Engineering and Technology, 1, 13-18.

Kumar, M. N., Subbu, S. K., Krishna, P. V., ve Venugopal, A. (2014). Vibration assisted conventional and advanced machining: A review. *Procedia Engineering*, *97*, 1577-1586.

Kumar, S., Doloi, B., ve Bhattacharyya, B. (2019, Kasım). Experimental investigation into micro ultrasonic machining of quartz. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 653, No. 1, p. 012027). IOP Publishing. https://doi:10.1088/1757-899X/653/1/012027.

Kumar, V., ve Singh, H. (2020). Parametric optimization of rotary ultrasonic drilling

using grey relational analysis. Materials Today: Proceedings, 22, 2676-2695.
Liu, F., Chen, T., Duan, Z., Suo, Y., & Zhang, C. (2023). Ultrasonic assisted pecking drilling process for CFRP/Ti laminated materials. *Journal of Manufacturing Processes*, *108*, 834-851.
Marcel, K., Marek, Z., ve Jozef, P. (2014). Investigation of ultrasonic assisted milling of aluminum alloy AlMg4. 5Mn. *Procedia Engineering*, 69, 1048-1053.
Marturi, B., Kolli, M., Kumar, A., Pichi Reddy, S., & Naresh Dasari, S. (2020). Multi-Parametric Optimization of Electrical Discharge Machining of Inconel-690 Using RSM-GRA Technique. In *Advances in Applied Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAMER 2019* (pp. 1113-1125). Springer Singapore.
Mendeş, M., Subaşı, S., ve Başpınar, E. (2005). Bilimsel çalışmalarda p-değerinin rapor edilmesi (P<0.01?, P<0.05?, P>0.05?). Journal of Agricultural Sciences, 11(04), 359-364.
Naveen Sait, A., Aravindan, S. ve Noorul Haq, A. (2009). Optimisation of machining parameters of glass-fibre-reinforced plastic (GFRP) pipes by desirability function analysis using Taguchi technique. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 43, 581-589.
Neugebauer, R., ve Stoll, A. (2004). Ultrasonic application in drilling. *Journal of materials processing technology*, 149(1-3), 633-639.
Pazarkaya, İ. (2013). Talaşlı Üretim için Bir Ultrasonik Sistem Tasarımı ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi (Master's thesis).
Pervaiz, S., Deiab, I., & Kishawy, H. (2012). Experimental study of conventional and peck drilling operations. In Proceedings of the 40th annual North American manufacturing research conference (NAMRC40).
Savaşkan, M. (2003). Deney tasarımı yöntemlerinin karşılaştırmalı kullanımı ile ince sert seramik kaplı matkap uçlarının performans değerlendirmesi ve optimizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
Sharma, A., Jain, V., ve Gupta, D. (2019). Comparative analysis of chipping mechanics of float glass during rotary ultrasonic drilling and conventional drilling: For multi-shaped tools. Machining Science and Technology.
Sindhu, D., Thakur, L., ve Chandna, P. (2019). Multi-objective optimization of rotary ultrasonic machining parameters for quartz glass using Taguchi-Grey relational analysis (GRA). *Silicon*, 11, 2033-2044. https://doi.org/10.1007/s12633-018-0019-6.
Sindhu, D., Thakur, L., ve Chandna, P. (2020). Parameter optimization of rotary ultrasonic machining on quartz glass using response surface methodology (RSM). *Silicon*, 12, 629-643.
Singh, R. P., ve Singhal, S. (2016). Rotary ultrasonic machining: a review. *Materials and manufacturing processes*, 31(14), 1795-1824.
Singh, R. P., Kataria, R., Singhal, S., Garg, R. K., ve Tyagi, M. (2020). Hole quality measures in rotary ultrasonic drilling of silicon dioxide (SiO2): investigation and modeling through designed experiments. *Silicon*, 12(11), 2587-2600. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00354-8.
Sofuoğlu, M. A. (2016). Ultrasonik yardımlı işleme teknikleri. 1st International MediterraneanScience and Engineering Congress (IMSCE, 2016)
Srinivasan, D., Sevvel, P., Dhanes Babu, S.D. ve Roy, V. (2024). Optimization of parameters and formulation of numerical model employing GRA–PCA and RSM

approach for friction stir welded Ti–6Al–4V alloy joints. *Materials Research Express*, 11(5), 056511.

Tosun, N., & Pihtili, H. (2010). Gray relational analysis of performance characteristics in MQL milling of 7075 Al alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *46*, 509-515.

Wang, J., Feng, P., Zheng, J., ve Zhang, J. (2016). Improving hole exit quality in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites using a compound step-taper drill. *Ceramics International*, 42(12), 13387-13394.

Wang, J., Feng, P., Zhang, J., Zhang, C., ve Pei, Z. (2016). Modeling the dependency of edge chipping size on the material properties and cutting force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101, 18-27.

Wang, J., Zha, H., Feng, P., ve Zhang, J. (2016). On the mechanism of edge chipping reduction in rotary ultrasonic drilling: a novel experimental method. *Precision Engineering*, 44, 231-235. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.008.

Xiao, F., Yan, B., Jin, G., Liu, H., Sun, G., ve Tan, H. (2021, Haziran). Ultrasonic-assisted grinding experiments on quartz glass and investigation of factors influencing surface roughness. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1948, No. 1, p. 012226). IOP Publishing. https://doi:10.1088/1742-6596/1948/1/012226.

Yaka, M. (2019). AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün istatistiksel incelenmesi (Yüksek lisans tezi). openaccess.amasya.edu.tr.