



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TAMBURLU KUMLAMA MAKİNASINDA
BİLYA PÜSKÜRTME PARAMETRELERİNİN
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ
Ramazan BARAN

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

11-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Ramazan BARAN

Tarih: 28/11/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

TAMBURLU KUMLAMA MAKİNASINDA BİLYA PÜSKÜRTME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Ramazan BARAN

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

2024, 74 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Nafiz YAŞAR
Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ
Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALİ**

Değişken yükler altında çalışan makine elemanlarının yorulma ömrü, çatlak ilerlemesi ve aşınma gibi olumsuz durumlar, endüstriyel performans ve makine elemanları çalışma güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Yüzeysel pürüzlülüğü ile yorulma ömrü arasındaki doğrudan ilişki nedeniyle, yüzeysel pürüzlülüğünün iyileştirilmesi malzeme ömrünü önemli ölçüde uzatır. Bu tez çalışmasında, Al7075 T6 alüminyum alaşımı ve AISI4140 çeliği numuneleri kullanılarak bilya püskürtme işlemi gerçekleştirilmiş ve Taguchi yöntemi ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Deneysel parametreler malzeme cinsi, bilya çapı ve maruz kalma süresi olarak belirlenmiştir. Her bir faktör iki seviye olarak ele alınmış ve tüm numunelere hem alt hem de üst yüzeylerde bilya püskürtme işlemi uygulanmıştır. Deneyler, malzeme türü olarak Al7075 ve AISI4140 çeliği, SAE J444 standartlarındaki S170 ile S330 çelik bilyalar ve maruz kalma süresi olarak 30 saniye ile 60 saniye seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Bilya püskürtme işlemi öncesinde, tüm numunelerin alt ve üst yüzeylerinde yüzeysel pürüzlülük testleri yapılmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Belirtilen seviyelerde bilya püskürtme işlemi gerçekleştirilmiş olup işlem sonrasında tekrar yüzeysel pürüzlülük testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Alt ve üst yüzeyler için iki ayrı L_8 Taguchi ortogonal deney tasarımı oluşturulmuş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hem alt hem de üst yüzeylerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Taguchi L_8 ortogonal deney tasarımları için en iyi sonuçların numunelerin her iki yüzeyinde de 3 numaralı deneyde üst yüzeyler için $1.4453 \mu\text{m}$, alt yüzeyler için $1.212 \mu\text{m}$ ortalama yüzeysel pürüzlülüğü (R_a) olduğu belirlenmiştir.

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, üst yüzeyler için en yüksek etkiye sahip faktörlerin sırasıyla malzeme faktörünün %78.98, bilya çapının %5.30 ve maruz kalma süresinin %2.62 olduğu hesaplanmıştır. Numunelerin üst yüzeylerine ait anlamlılık değeri R^2 ise %90.30 olarak bulunmuştur. Alt yüzeyler için yapılan analizlerde, en büyük etki sırasıyla malzeme için %78.39, bilya çapı %2.09 ve maruz

kalma süresi %0.04 olarak belirlenmiştir. Taguchi yöntemi analizi sonucunda alt yüzeyler için anlamlılık değeri %96.30 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bilya Püskürtme işlemi, Kuşlama işlemi, Taguchi yöntemi, Optimizasyon, Yüzey pürüzlülüğü,



ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF SHOTBLASTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN DRUM SANDBLASTING MACHINE

Ramazan BARAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

2024, 74 Pages

Jury

Doç. Dr. Nafiz YAŞAR

Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALİ

The fatigue life, crack propagation, and wear of machine components operating under variable loads are critical factors for industrial performance and the operational safety of machine elements. Due to the direct relationship between surface roughness and fatigue life, improving surface roughness significantly extends material life. In this thesis, shotblasting was applied to samples made of Al7075 T6 aluminium alloy and AISI4140 steel, and parameter optimization was performed using the Taguchi method. The experimental parameters included material type, shot diameter, and exposure time. Each factor was considered at two levels, and the shotblasting process was applied to both the top and bottom surfaces of all samples. The experiments were conducted with Al7075 and AISI4140 steel as the material types, S170 and S330 steel shots according to SAE J444 standards, and exposure times of 30 seconds and 60 seconds.

Prior to the shotblasting process, surface roughness tests were conducted on the top and bottom surfaces of all the samples, and average values were calculated. The shotblasting process was performed at the specified levels, and surface roughness tests were repeated afterward, with the results evaluated comparatively. Two separate L_8 Taguchi orthogonal experimental designs were created for the top and bottom surfaces, and the results were analysed. Upon reviewing the results, similar findings were obtained for both the top and bottom surfaces. For the Taguchi L_8 orthogonal experimental designs, the best results were found in the third experiment, with average surface roughness (R_a) values of $1.4453 \mu\text{m}$ for the top surface and $1.212 \mu\text{m}$ for the bottom surface.

When the variance analysis results were examined, the factors with the highest impact on the top surface were found to be the material type with 78.98%, the shot diameter with 5.30%, and the exposure

time with 2.62%. The determination of coefficient (R^2) for the top surfaces was found to be 90.30%. For the bottom surfaces, the analysis revealed that the greatest effect was due to the material type with 78.39%, the shot diameter with 2.09%, and the exposure time with 0.04%. The determination of coefficient for the bottom surfaces was calculated to be 96.30%.

Keywords: Optimization, Shotblasting Process, Sandblasting Process, Surface Roughness, Taguchi Method.



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması, yürütülmesi ve her aşamasında bana değerli desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden kıymetli hocam Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ 'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Fikir ve önerileri ile bana destek olan Doç. Dr. Nafiz YAŞAR ve tez çalışmasının her aşamasında desteklerini sunan Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALİ hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamda gerçekleştirilen deneylerin yapılmasında sağladıkları değerli katkılarından dolayı Favori Otomotiv Gıda Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ramazan BARAN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KUMLAMA ve BİLYA PÜSKÜRTME İŞLEMLERİ.....	13
3.1. Kumlama Makineleri	13
3.2. Tamburlu Kumlama Makinesi	14
3.3. Tamburlu Kumlama Makinesi Bölümleri ve Çalışma Prensibi.....	15
3.4. Aşındırıcılar	18
3.4.1. Silis kumu	19
3.4.2. Alüminyum oksit	19
3.4.3. Garnet.....	20
3.4.4. Cam küre.....	21
3.4.5. Seramik küre	22
3.4.6. Soda	22
3.4.7. Çelik grid	23
3.4.8. Dökme demir bilyalar	24
3.4.9. Çelik bilyalar.....	24
3.5. Kumlama ve Bilya Püskürtme İşlemlerini Etkileyen Parametreler	26
3.5.1. Püskürtme basıncı	26
3.5.2. Maruz kalma süresi	27
3.5.3. Bilya cinsi	27
3.5.4. Bilya çapı	28
3.5.5. Nozul açısı	28
3.5.6. Nozul mesafesi.....	29
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	30
4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri	30
4.1.1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a).....	31
4.1.2. Ortalama pürüzlülük derinliği (R_z).....	32
4.1.3. Karekök ortalama pürüzlülük (R_q)	32
5. TAGUCHI YÖNTEMİ.....	34
5.1. Taguchi Metodu Ortogonal Dizin.....	35

6. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER	37
6.1. Çalışmada İşlenen Materyaller	37
6.2. Çalışmada Kullanılan Bilyalar	37
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
7.1. Deneysel Süreç İş Akış Şeması	39
7.2. Taguchi Ortogonal Dizin	40
7.3. Numunelerin Hazırlanması	40
6.4. Ön Yüzey Pürüzlülük Testlerinin Yapılması.....	42
7.5. Bilya Püskürtme İşlemi Deneylerinin Yapılması	43
7.6. Bilya Püskürtme İşlemi Sonrası Yüzey Pürüzlülük Deneylerinin Yapılması	45
8. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ ANALİZİ ve TARTIŞMA	47
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
9.1. Sonuçlar	54
9.2. Öneriler	55
KAYNAKLAR	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Tamburlu kumlama makinası(Anonim, 2024a).....	15
Şekil 3.2. Bilya püskürtme tezgâhı şematik gösterimi (PATEL, 2012)	16
Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülük parametreleri (Kadivar ve ark., 2021)	31
Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük cihazı.....	33
Şekil 7.1. Deneysel süreç iş akış şeması.....	39
Şekil 7.2. a) Numunelerin kesildiği şerit testere tezgâhı	41
Şekil 7.3. AISI4140 çelik malzemesi ön yüzey pürüzlülük deneyi	42
Şekil 7.4. Bilyalı püskürtme deneylerinin yapıldığı kumlama tezgâhı.....	43
Şekil 7.5. Numunelerin tambur içerisine yerleştirilmesi	44
Şekil 7.6. Çalışmada kullanılan çelik bilya türleri (Anonim, 2020).....	45
Şekil 7.7. BP işlemi sonrası yüzey pürüzlülük ölçümler	46
Şekil 8.1. BP işlemi sonucu numunelerin üst yüzeyine ait R_a için S/N oranlarının tepki grafikleri.....	48
Şekil 8.2. BP işlemi sonucu kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimi	49
Şekil 8.3. Numunelerin Alt yüzeyine ait $R_{a(alt)}$ için S/N oranlarının tepki grafikleri ...	51

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 5.1. Örnek kontrol faktörü ve seviyeleri	36
Tablo 5.2. Taguchi L_{27} ortogonal dizin	36
Tablo 7.1. Deney tasarımı kontrol faktörü ve seviyeleri.....	40
Tablo 7.2. Taguchi L8 ortogonal deney tasarımı	40
Tablo 7.3. AISI4140 malzemesi kimyasal bileşimleri % değerleri (Chander ve ark., 2012)	41
Tablo 7.4. AI7075 T6 malzemesi kimyasal bileşimleri % değerleri (Mohan ve ark., 2016)	41
Tablo 7.5. AI7075 T6 Malzemesi mekanik özellikleri (Mohan ve ark., 2016)	41
Tablo 7.6. AISI4140 malzeme mekanik özellikleri (Chander ve ark., 2012)	41
Tablo 7.7. M1 Mahr yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri.....	42
Tablo 7.8. Numunelerin Üst yüzeylerinin ($Ra_{üst}$) Ön Yüzey pürüzlülük değerleri	43
Tablo 7.9. Deneylerin yapıldığı kumlama tezgâhı teknik özellikleri.....	44
Tablo 7.10. Kullanılan bilyaların mekanik özellikleri (Anonim, 2020)	44
Tablo 7. 11. Çelik bilyaların kimyasal bileşimleri (%) (Anonim, 2020)	45
Tablo 7.12. BP işlemi sonrası alt ve üst yüzeylerine ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	45
Tablo 8.1. Numunelerin üst yüzeylerinin S/N oranları çıktıkları	47
Tablo 8.2. $Ra_{(üst)}$ için S/N tepkisi	48
Tablo 8.3. Numunelerin üst yüzeylerine ait Ra_1 için varyans analizi.....	50
Tablo 8.4. Numunelerin alt yüzeylerinin S/N oranları çıktıkları.....	51
Tablo 8.5. Alt yüzeylere ait Ra için S/N oranı cevapları	52
Tablo 8.6. Numunelerin alt yüzeylerine ait S/N oranları	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μm	:	Mikrometre
$^{\circ}$:	Derece
m	:	BP işleminde kullanılan malzeme
d	:	BP işleminde kullanılan bilya çapı
s	:	BP işleminde maruz kalma süresi

Kısaltmalar

AEY	:	Ayrık Eleman Yöntemi
Adj MS	:	Karelerin ortalaması
Adj SS	:	Kareler toplamı
AISI	:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AKM	:	Atomik Kuvvet Mikroskobu
BD	:	Bilyalı Dövme
BP	:	Bilya Püskürtme
CYY	:	Cevap Yüzey Yöntemi
DMLS	:	Eklemeli İmalat Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
F	:	F Testi Değeri
kPa	:	Kilo paskal
MPa	:	Mega paskal
P	:	Hata Varyans Değeri
PCR	:	Etkinlik Yüzdesi Oranı
Rpm	:	Dakikadaki devir sayısı
SAE	:	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği
SD	:	Serbestlik derecesi
SEY	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
S/N	:	Sinyal/Gürültü
TEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Günümüz üretim dünyasındaki teknolojinin gelişmesiyle beraber makinelerin karmaşıklığının artması ve çok çeşitli kullanım alanlarının gereksinimleri doğrultusunda, makine imalatında kullanılan malzeme özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Endüstride değişken yükler altında çalışan makine elemanlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla birçok işlem uygulanmaktadır. Bu işlemlerin başında kumlama işlemi, bilya püskürtme (BP) işlemi ve bilyalı dövme (BD) işlemleri gelmektedir. Kaynak, boyama, kaplama, malzeme yüzenindeki pas ve tufalın kaldırılması gibi işlemlerden önce bu prosesler uygulanmaktadır. Kumlama işlemi, ilk olarak 1870 yılında Amerikalı mucit Benjamin Chew Tilghman tarafından patentlenen kum püskürtme makinesi ile tanıtılmıştır. Bu makine, çelik, cam ve kum gibi aşındırıcı materyallerin malzeme yüzeylerine püskürtülerek yüzey pürüzlülüğünün artırılması amacıyla geliştirilmiştir. 20. yüzyıldan itibaren kumlama uygulamalarının kullanım alanları genişlemiş ve bu yöntem, endüstride daha fazla ilgi görmeye başlamıştır.

Bu alandaki çalışmalar genel olarak kumlama işlemi, bilya püskürtme ve bilyalı dövme, işlemleri şeklinde üç ana kategoride sınıflandırılabilir. Temelde bütün uygulamalar birbirlerine çok yakın olmasına karşın uygulama süreçlerinde istenilen sonuçlar birbirlerinden farklılık gösterebilmektedir. Kumlama işlemi daha çok malzeme yüzeylerinde bulunan kir, pas ve istenilmeyen diğer yüzey kusurları (çapak alma, köşe keskinliğini yumuşatma vb.) gibi yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemleri ise malzemelerin yüzeyine doğrudan bilya püskürtülmesiyle yapılan bir işlem olup malzemeye yüzey pürüzlülüğü kazandırmanın yanı sıra malzemenin yorulma ömrünün artırılması hedeflenmektedir (Kawagoishi ve ark., 2013; Unal, 2016; Safari ve Farahani, 2018; Li ve ark., 2019).

Endüstriyel uygulamalarda, işlem kalitesinin yanı sıra ekonomik verimlilik de büyük önem taşımaktadır. Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme proseslerinin parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu proseslerde, Taguchi yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Jamaluddin ve ark., 2016; Reddy ve ark., 2023; Alao, 2024).

1.1. Tezin Amacı

Halen devam eden literatürel çalışmaların sayısında gözle görülür bir artış olduğu, verilen referanslardan da açıkça anlaşılmaktadır. Bu durum, ilgili alandaki araştırmaların ve incelemelerin derinleşerek çeşitlenmesine işaret etmektedir. Özellikle bu tez çalışmasında bilya püskürtme işleminin dikkate alınması, belirli bir dizi katkıya ulaşabilmek amacıyla büyük bir önem taşımaktadır. Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemleri; teknik bir işlem olmanın ötesinde, araştırma alanına ilişkin anlayışımızı derinleştirecek ve mevcut teorik çerçevelerin yeniden değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. Ayrıca, bu proseslerin, uygulamaya yönelik pratik sonuçlar doğurabileceği gibi, teorik tartışmaların da zenginleşmesine katkıda bulunacaktır.

Bu bağlamda, çalışmanın sağladığı katkılar hem akademik literatüre yenilik katacak hem de uygulayıcıların pratikte karşılaştıkları sorunlara aşağıda belirtilen çözüm önerileri sunabilecektir;

- Deneysel çalışmada kullanılan AISI4140 ve Al7075 T6 malzemelerinin belirlenmiş deneysel koşullar altında BP işlemine tabi tutulması sonucu meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişiminin anlaşılır hale gelmesi için istatistiksel bir yaklaşım ortaya koymaktır.
- Bu yaklaşım sayesinde endüstriyel uygulamalara referans olunması sağlanacaktır.
- Akademik bakış açısının oluşturulabilmesi maksatlı referans bir çalışma olmasını sağlamaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması incelendiğinde konu ile ilgili yapılan çalışmalar 3 ana bölüme ayrılabilir. Bunlar; Kumlama işlemi, kumlama işlemine benzer bir yöntem olan fakat aşındırıcı malzeme türüne göre isimlendirilebilecek bilyalı püskürtme işlemi ve bilyalı dövme işlemi olarak sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında her üç proses de incelenmiş olup malzeme ve parametrelerin seçimi ilgili bu alanlarda yapılan çalışmalar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu prosesler ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde belirleyici parametrelerin malzeme cinsine bağlı olarak değişmekle beraber püskürtme basıncı, maruz kalma süresi, aşındırıcı tipi ve boyutu, nozul mesafesi ve açısı gibi faktörler ön plana çıkmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar kumlama, BP ve BD işlemlerinin yüzey pürüzlülüğünün yanında malzemelerin mukavemet, aşınma, korozyon gibi malzeme ömrünü arttıran mekanik özellikleri iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmalardan yola çıkılarak yüzey pürüzlülüğü ile malzeme yorulma ömrü arasında doğrudan bir ilişki olduğu, yüzey pürüzlülüğü iyileştirilen malzemelerde çatlak başlama süresini arttığı anlaşılmaktadır (Naidu ve Raman, 2005; Han, 2021).

Kumlama, BD ve BP'nin en büyük avantajlarından biri de işlem sırasında yüzeyde çok az ısınma meydana gelmesinden kaynaklı, malzeme yüzeyindeki yapısal özelliklerinin bozulmamasını sağlar (Olugbade ve Lu, 2020; Liu ve ark., 2024).

Bu tez çalışmasına yön verilmesi maksadıyla, kumlama işlemine ilişkin gerçekleştirilen ve konuya ışık tutan bazı önemli deneysel çalışmalar aşağıda sıralanmıştır. Bu çalışmalar, kumlama işleminin çeşitli parametrelerinin etkilerini inceleyerek, araştırma sürecinde kullanılan yöntemlerin ve elde edilen sonuçların bilimsel bir temele dayanmasını sağlamaktadır.

Slătineanu ve ark. (2011) Alüminyum malzeme üzerinde yaptıkları çalışmada kumlama işlemi parametrelerinden nozul açısı, nozul-iş parçası mesafesi ve aşındırıcı çaplarının malzeme yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir.

Rodriguez ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada, AISI H13 ve AISI4140 çeliklerinden farklı sertlik seviyelerine sahip altı numune aşındırıcı materyal silis kumu kullanılarak aşınma davranışları kumlama işlemi ile deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel parametreler nozul açıları 10° ile 90° arasında, püskürtme basınçları, 0.689 ve 1.38 bar ve darbe hızları 70 ile 107 m/s hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler

sonucunda her iki çelik için aşınma davranışlarında önemli bir fark tespit edilememiştir. 10° ve 20° nozul açılarında incelenen numunelerde sertlik arttıkça aşınma oranının azaldığı, 30° ile 40° nozul açılarında ise aşınma miktarının neredeyse sabit kaldığı, 60° üzerindeki açılarda ise, daha yumuşak numunelerin belirli bir darbe açısına karşı daha dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca püskürtme basıncının artış oranında bir aşınma artışı olduğu belirlenmiştir.

Bechikh ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, galvanizli çelik üzerinde kumlama parametrelerinin (basınç, açı ve aşındırıcı materyal geometrisi) çelik yüzeyinin kimyasal bileşimi, yüzey pürüzlülüğü ve serbest enerjisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, iki farklı kum püskürtme basıncı (5×10^5 Pa ve 6×10^5 Pa), iki farklı kum püskürtme açısı (75° ve 90°) ve üç farklı cam kum geometrisi (200/300, 90/150 ve 70/110) kullanılmış olup nozul ve iş parçası mesafesi 6.5 mm de sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, daha yüksek kum püskürtme basıncı ile işlenen numunelerde daha pürüzlü yüzeyler ve daha yüksek yüzey serbest enerjisi elde edilmiştir. Kum püskürtme açısındaki değişikliklerin yüzey pürüzlülüğünü çok etkilemediği görülmüştür. Kullanılan aşındırıcı materyal geometrisinin, kum püskürtme açısı ve basıncına göre yüzey özellikleri üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Finger ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada kumlama işleminin zirkonya üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme etkileri incelenmiştir. Numuneler farklı kumlama parametrelerinden püskürtme açısı (45° , 60° ve 90°), püskürtme basıncı (2 bar, 4 bar ve 6 bar) ve nozul iş parçası mesafesi (0.5 cm, 1.0 cm ve 1.5 cm) olarak belirlenip kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en belirgin parametrenin püskürtme basıncı olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kalıntı gerilmesi ve yüksek yüzey pürüzlülük değerleri nozul açısının dik olduğu deneylerde elde edilmiştir.

Miturska-Barańska ve ark. (2021) Yaptıkları çalışmada EN AW 2024 T3 havacılık alüminyum alaşımından üretilen tek katlı yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanımına yönelik kumlama işlemi parametrelerinden püskürtme basıncı, nozul iş parçası mesafesi ve iş parçası hareket hızının etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, prosesten daha fazla verim alınabilmesi için kum püskürtme işlemi sırasında uygulanan püskürtme basıncın 5×10^5 Pa'nın altına düşmemesi gerektiğini, nozul ile kum püskürtülen yüzey arasındaki mesafenin 97 mm'yi aşmaması gerektiğini ve iş parçasının

nozul ile ilgili hareket hızının 75 mm/dk'dan daha fazla olmaması gerektiğini göstermektedir.

Alao (2024) Tarafından yapılan çalışmada, itria tetragonal zirkonya polikristalleri (YTZP) yüzeylerinin iç kısımlarını pürüzlendirmek amacıyla kumlama işlemi parametreleri (nozul açısı, aşındırıcı parçacık boyutu, basınç ve kum püskürtme süresi) Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Varyans analizi sonucunda, püskürtme basıncı ve aşındırıcı parçacık boyutunun tüm performans özelliklerini etkileyen en etkili parametreler olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışmasında, bilya püskürtme işlemine ilişkin gerçekleştirilen bazı önemli deneysel çalışmalar aşağıda sıralanmıştır. Bu çalışmalar, bilya püskürtme işleminin çeşitli parametrelerinin etkilerini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, bu süreçle ilgili daha derinlemesine bir anlayış geliştirilmesine katkı sağlamış ve araştırmanın temelini atmıştır. Bu deneysel bulgular, uygulama alanındaki etkinlikleri artırmak ve ilgili süreçlerin optimizasyonuna yönelik yeni perspektifler sunmak amacıyla önemli bir referans teşkil etmektedir.

Naidu ve Raman (2005) yaptıkları çalışmada, kapsama alanı %100, püskürtme basıncı 0.4 MPa ve Bilya püskürtme süresi 100 saniye olarak seçilen AA6061 T6 A-alüminyum alışımlı üzerinde yorulma ve aşınma davranışları incelenmiştir. BP işleminden sonra maksimum çevrimsel gerilim 169 MPa'da yorulma ömrünü 2.8 kat ve aşınma yorulma ömrünü 2,4 kat arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Jamaluddin ve ark. (2016) Taguchi yönteminin süreç optimizasyonundaki uygulanabilirliğini, bilya püskürtme işlemi parametreleri kullanılarak test edilmiştir. BP işlemi için bilya püskürtme hızı ve döner tabla hızı olmak üzere iki kontrol faktörü ve her bir kontrol faktörü 3 seviye olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Rotor kumlama hızı ve döner tabla hızı sırasıyla 2500-2900rpm ve 35-45rpm olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yüzey pürüzlülük değerleri *S/N* oranlarında %113'lük bir iyileşme olduğu bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü değişimini önemli ölçüde etkileyen temel faktörün, toplam etkilerin %56.9'una katkıda bulunan bilya püskürtme hızı olduğu, optimum parametrelerin ise bilya püskürtme hızının 2900 Rpm, döner tabla hızının ise 39 Rpm olan parametrelerde olduğu belirlenmiştir.

Li ve ark. (2019) Q235 çelik malzemeyi sıcak galvanizleme işleminden önce 0.6 mm çapındaki bilyalar ile 60dk boyunca bilya püskürtme işlemine tabi tutulmuştur. Bilya püskürtme işleminin çelik matris üzerindeki etkisini değerlendirmek için numunelerin morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilimi, faz bileşimi ve mikro sertliği

incelenmiştir. BP işlemi uygulanmış numunelerde yüzeyde birçok küçük çukur ve birikinti meydana gelmiş ve arayüzün dalgalanma derecesi artmıştır. Yüzeye yakın bölgede 12 μm derinliğinde bir plastik deformasyon tabakası oluşmuş ve yüzeydeki taneler deformasyon yönüne dik olarak disk şeklinde uzamıştır. Kalıntı gerilmesi, kaplamanın kalınlaşmasını engellemiş olup yüzey pürüzlülüğü, kaplamanın kalınlığı üzerinde olumsuz bir etki yapmıştır. Tane boyutu ve kristal kusurları dahil dört faktör, daha ince bir galvaniz kaplamasının oluşmasına neden olmuştur. İşlem sonucunda çeliğin yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü de önemli ölçüde arttığı sunucuna varılmıştır.

Yang ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışma, pas temizleme uygulaması için BP işlemi, çok sayıda rastgele püskürtme kullanılarak sonlu elemanlar (SE) simülasyonları ile incelenmiştir. Pasın giderilmesini modellemek için dinamik başarısızlık kriterlerine dayalı eleman silme tekniği kullanılmıştır. Yapılan çalışmada Pas hacmi, hasar görmüş arayüz oranı, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme dağılımı incelenmiştir. Simülasyon verilerini işlemek ve istatistiksel sonuçları elde etmek için ABAQUS/Python betikleri geliştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, pas temizleme hızının esas olarak bilya boyutu, hızı ve çarpma açısına bağlı olduğunu, pas kalınlığı ile pek bir ilgisinin olmadığını göstermiştir. Simülasyonlarda pas parçalarının dökülmesi gözlemlenmiştir. Başlangıçta, çıkarılan pas miktarı, çarpan bilya sayısı ile lineer olarak artmakta ve bir doygunluk değerine ulaşmaktadır. Pas temizleme oranı, çarpma açısının, darbe hızının ve bilya çapının artışıyla artmaktadır. Normal hızın, pas temizleme üzerinde yatay hızdan daha büyük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ise, çarpma hızı, çarpma açısı ve bilya çapının daha büyük olduğu parametrelerde daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Pritima ve ark. (2020) Alüminyum 7068 alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada, çelik bilya ve cam küre kullanılarak bilya püskürtme hızı, nozul mesafesi ve nozul açısının yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılmıştır. Deneysel bulgulara göre, en iyi yüzey pürüzlülüğü değeri 20 m/s püskürtme hızı, 30 mm nozul-iş parçası mesafesi ve 60° açı için 3.4 μm olarak belirlenmiştir.

Praveen ve ark. (2023) Ekskavatörün bom kolu bileşeni olarak kullanılan IS-2062 E350 kalite çeliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki optimum bilyalı püskürtme süresinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Püskürtme basıncının 5 bar olduğu maruz kalma süresinin 8, 10, 12, 14 ve 16 dakikalık sürelerde gerçekleştiği deneylerde istenilen yüzey pürüzlülük değeri 12 dakikalık deneyde sağlanmış olup 12 dakikanın

üzerindeki maruz kalma sürelerinde ise kayda değer bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Reddy ve ark. (2023) Eglin çeliğinin yüzey topografyası, BP işlemi öncesi ve sonrası atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak analiz edilmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri bilya püskürtme mesafesi 300 mm, 600 mm ve 900 mm, bilya püskürtme açısı 30°, 45°, 60° derece, maruz kalma süreleri ise 50 sn, 100 sn ve 150 sn olarak seçilmiştir. Optimum bilyalı püskürtme parametreleri Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ve katkıları varyans analizi ile doğrulanmıştır. En uygun yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin nozul-iş parçası mesafesi 900 mm, püskürtme açısı 60° derece ve maruz kalma süresinin 50 sn olduğu deneyde elde edilmiştir.

Minhas ve ark. (2021) Eklemeli imalat doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) tekniği ile üretilen AlSi10Mg alüminyum alaşımlı plakalar için istenen yüzey pürüzlülük değerlerini elde etmek amacıyla optimum bilya püskürtme koşulları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yüzey pürüzlülüğü kullanılarak cevap yüzey yöntemi ile kuadratik model geliştirilmiş ve bu modelin tahmin etkinliği ANOVA ile doğrulanmıştır. Giriş parametreleri olarak püskürtme basıncı, maruz kalma süresi ve bilya çapı olmak üzere üç farklı parametre seçilmiş olup 30 adet deney yapılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, püskürtme basıncının %41.89 ile yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin en önemli parametre olduğu, maruz kalma süresinin %29,29 ve bilya boyutunun ise %23.71 gibi bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 3.455 μm olan numunede püskürtme basıncının 4 bar, bilya çapının 70-150 μm arasındaki değişen küresel cam boncuklar ve maruz kalma süresinin ise 60 sn olan deneyde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise 10.385 μm olarak ölçülen numunede püskürtme basıncının 6 bar, bilya çapının 0-50 μm arasındaki değişen küresel cam boncuklar ve maruz kalma süresinin ise 30 sn olan deneyde olduğu tespit edilmiştir.

Safari ve Farahani (2018) Alüminyum 2024-T3 alaşımı, Araldite 2015 ve düşük viskoziteli epoksi HPL1012/HPH112 olmak üzere iki farklı yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerin kumlama ve bilya püskürtme işlemlerinin, birleştirilen bölgelerdeki yüzey pürüzlülüğü ve mukavemete etkilerinin belirlenmesi amacı ile bir çalışma yapılmıştır. Kumlama ve bilya püskürtme işlemi uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülüğünün artırılmasıyla bağlantıların kesme dayanımının sürekli olarak arttığı görülmüştür. Bilya püskürtme işlemi ile elde edilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü, kumlama

işlemi ile elde edilen numunelerin yaklaşık yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir. Her iki yapıştırıcı için kumlama ve bilya püskürtme numunelerinde optimum yüzey pürüzlülüğünün aynı olduğu bulunmuştur. Bu durum, bu yöntemlerin yapıştırıcı türünden bağımsız olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, her bir numunede 10 mm uzunluğunda 0.15 mm/s hızında yapılmıştır. En yüksek kesme dayanımı, 0.6 mikron yüzey pürüzlülüğüne sahip maksimum 6 bar basınçta kumlanmış numuneler için elde edilmiştir.

Pathak ve Dodkar (2020) tarafından bilya püskürtme ve bilyalı dövme parametrelerinin biyel kolunda oluşan artık gerilimler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü biyel kolunun yorulma ömrü açısından zararlı etkilerden dolayı, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için bilya püskürtme işlemi uygulanmıştır. 4 aşamada gerçekleştirilen deneylerde 1. Aşama da sadece BP işlemi 2. Aşamada (BP)+(BD) 3. Aşamada (BP)+(BD) +(BP) 4. Aşamada ise (BP)+(BD)+(BP)+(BD) işlemleri uygulanmış olup gri ilişkisel analiz kullanılarak basınç artık gerilimi ve yüzey pürüzlülüğü hedef değerlerine ulaşmak için en uygun parametreleri belirlemek amacıyla bilyalı püskürtme ve bilyalı dövme işlemleri uygulanmıştır. Yapılan çalışmada en uygun parametreler artık gerilme 408.23 MPa ve yüzey pürüzlülüğü 3.84 μm Ra olarak ölçülen 3. Aşamada gerçekleştirilen 15 dakika kumlama işleminden sonra 120 Saniye bilyalı dövme işlemi ardından tekrar 15 Dakika kumlama işlemine tabi tutulan numunede tespit edilmiştir.

Daha spesifik bir uygulama alanına sahip olan bilyalı dövme işlemi de bu tez çalışması kapsamında ayrıntılı bir literatür taraması ile incelenmiş olup, söz konusu işlemde gerçekleştirilen bazı deneysel çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

Kawagoishi ve ark. (2013) tarafından maraging çeliğinin yorulma mukavemetinin artırılması amacıyla bilyalı dövme işleminin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar BD işleminin maraging çeliğin yorulma mukavemetini artırmanın yanı sıra nem duyarlılığını da iyileştiren etkili bir proses olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda BD uygulaması sırasında meydana gelen basınçlı kalıntı geriliminin yanı sıra çeliğin korozyon direncini de arttırdığı görülmüştür.

Nam ve ark. (2016) Uçak gövdelerinde kullanılan Al2124 T851 alüminyum alaşımının SAE AMS 2430S standardında bilyalı dövme işlemine tabi tutmuşlardır. Nozul-iş parçası mesafesi, püskürtme basıncı, nozul açısı ve maruz kalma süresi olmak üzere dört farklı bilyalı dövme parametresi üç seviyede incelenmiştir. Almen yoğunluğu ve kapsama alanı üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada en iyi sonuçların nozul-iş

parçası mesafesi için 50 mm, püskürtme basıncı için 2 kg/cm², nozul açısı için 51° ve maruz kalma süresi için 180 sn olduğu sonucuna varılmıştır.

Unal (2016) tarafından yapılan çalışmada, almen şeridinin yay yüksekliğini ve özelliklerini doğrudan etkileyen bilyalı dövme parametreleri, almen yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği cevap yüzey yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Giriş parametreleri hava basıncı, bilya çapı ve maruz kalma süresinin, almen yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği üzerindeki etkisi ANOVA regresyon analizi kullanılarak belirlendiği çalışmada maruz kalma süresi ve bilya çapının artması, yay yüksekliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca her iki parametrenin beraber artırılması ile yüzey pürüzlülüğünde de artış gözlemlenmiştir. Mikro sertlik üzerindeki en önemli faktörün ise hava basıncı ve kısa maruz bırakılma süreleri olduğu saptanmıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda, 0.5 µm Ra yüzey pürüzlülüğü, maksimum sertlik ve maksimum almen yoğunluğu olduğu optimum parametreler, 28 saniye maruz bırakılma süresi, 0.2794 mm (S110) bilya çapı ve 723 kPa hava basıncı olduğu belirlenmiştir.

Uzan ve ark. (2018) Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alüminyum alaşım malzemenin bilyalı dövme işleminin yorulma direnci üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada S110 çelik bilyalar ile Z210 seramik kürelerle bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda yüzeye yakın bölgede gerilme sertleşmesi gözlemlenmiştir. Yorulma direncinde özellikle yüksek çevrimli yorulma süreçlerinde önemli iyileşmelere yol açmıştır. Yorulma çatlağının başlama derinliği bilyalı dövme yapılmayan numunelere göre daha derin olduğu belirlenmiştir

Maleki ve ark. (2019) tarafından yapılan yüksek karbonlu AISI1060 çeliği üzerinde bilyalı dövme işleminin mikrosertlik, tane boyutu ve artık gerilim üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan istatistik deneysel sonuçlarda yüzey kapsamı, mikrosertlik, tane boyutu ve artık gerilim için etki değerleri sırasıyla %68, %89 ve %57 olarak bulunmuştur.

Omari ve ark. (2019) 1070 çelik malzemenin mekanik özellikleri ve yüzey özelliklerini artırmak amacıyla bilyalı dövme işleminin etkileri incelenmiştir. Parametreler 206.8, 482.6, ve 689.5 kPa olan üç farklı basınç, maruz kalma süreleri ise 4 dk, 7 dk ve 10 dk olarak belirlenmiştir. Püskürtme basıncının ve maruz kalma süresinin yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini tahmin etmek için pareto grafikleri oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlarda incelenen parametreler üzerinde etkili olan temel faktör, bilya püskürtme basıncı olup maruz kalma süresinin daha az etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan taramalı elektron mikroskobu (TEM) analizinde de

bu sonuçlar desteklenmiştir. Ayrıca numune üzerindeki iyileştirmeler belirli bir basınca kadar devam ettiği bu basınca ulaşıldığında ise basıncın artırılması, bilya ile dövülen yüzeyin gerilme sertleşmesi nedeniyle olumsuz bir etkiye yol açtığını göstermektedir. Bilyalı dövme işlemi sunucunda 7 dakika maruz kalma süresi ve 482.6kPa püskürtme basıncının 1070 çelik kanatçıklarının yüzey ve mekanik özelliklerini iyileştirmede en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

Wang ve ark. (2019) 42CrMo çelik numuneleri için optimum bilyalı dövme parametrelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, sonlu elemanlar metodu (SE) ve cevap yüzey yöntemi (CYY) kullanılarak bilyalı dövme parametrelerinden atış hızı, atış çapı ve kapsama oranı için en uygun değerler elde edilmiştir. Çalışma sonuçları incelendiğinde 42CrMo çelik numuneleri için optimum değerlerin 88 m/s bilya püskürtme hızı, 0.8 mm bilya çapı ve %170 kapsama oranı olduğu belirlenmiştir. 42CrMo çelik numunelerinin yorulma ömürleri deneylerinde %104 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

Martín ve ark. (2020) Al7075-T651 alüminyum alaşım üzerinde yapılan bilyalı dövme işleminin artık gerilmelerin ve yüzey koşullarının aşınma yorulma ömrü üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenip, çevrimli yükleme nedeniyle sürtünme yorulma testlerinde üretilen artık gerilim gevşemesi analiz edilmiştir. Ayrıca, bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğünün aşınma yorulma ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, bilyalı dövme işleminin özellikle yüksek çevrimli yorulma için yorulma ömrünü büyük ölçüde arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır.

Mohamed ve ark. (2020) tarafından düşük karbonlu çelik kullanılarak yapılan çalışmada, yüzeydeki düzensizliklerin azaltılması ve işlem süresinin azaltılması amacıyla standart almen şerit örneklerinde incelenen bilyalı dövme işlem parametreleri için en uygun koşulların, 276 kPa püskürtme basıncı, 203 mm püskürtme nozul-iş parçası mesafesi ve 5.3 mm/sn nozul hızı olduğu görülmüştür.

Han (2021) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında AISI52100 çeliği bilyalar kullanılarak AISI5160 çeliği üzerinde çeliğin ömrünün artırılması amacı ile bilyalı dövme prosesi uygulanmıştır. Değişken sürelerde uygulanan bilyalı dövme prosesinin süre artmasına bağlı olarak basma gerilmesinin arttığı, aşınmanın ise malzemenin ilk durumuna göre düştüğü gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme süresi arttıkça aşınmanın ise arttığı görülmüştür.

Wang ve ark. (2021) Bilyalı dövme prosesinde daha çok püskürtme basıncı, maruz kalma süresi, bilya çapı baz alınarak optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada Ayrık Eleman Yöntemi (AEY) ve Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) modeller oluşturularak granül akış hızı, nozul hareket hızı ve nozul-iş parçası mesafesi gibi parametrelerden yola çıkarak numunelere çarpan bilya sayısını tahmin etmek için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Yapılan modellerden eşdeğer atış hızı gerçek atış hızına tam olarak eşit olmasa da simülasyon analizinde yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, almen şeridi yay yüksekliği deformasyonu ve kapsama yüzdesi açısından bilyalı dövme prosesi etkisinin korunduğu belirlenmiştir.

Ebrahimzadeh ve ark. (2024) tarafından AISI316L paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacı ile deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Cevap yüzey Yöntemi (CYY) kullanarak BD Prosesi parametrelerinden dövme hızı (hava basıncı) ve kaplama yüzdesi optimize edilmiştir. Mikrosertlik artışı, martenzit dönüşümü ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasının hedeflendiği çalışmada, 6 bar basınç ve %1860 kapsama yoğunluğunun en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

Wang ve Kim (2024) yaptıkları çalışmada ABAQUS yazılımını kullanarak bilyalı dövme sürecini simüle etmek için bir ayrık eleman-sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan rastgele çoklu bilya analiz modeli, cevap yüzey yöntemi (CYY) ile bilyalı dövme işlemi parametreleri optimize edilmiştir. Ardından, deneyler ve geri yayılım (BP) yapay sinir ağı modeli ile sonuçlar doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, bilya hızı 70 m/s, çarpma açısı 61.45° ve bilya çapı 0.78 mm olduğunda bilyalı dövme etkisinin en üst seviyeye ulaştığını göstermektedir. Bu koşullarda yüzey pürüzlülük değeri %101.84 oranında iyileştirilmiş olup, yay yüksekliği ise %54.66 artmıştır.

Bu çalışma, işleyiş ve uygulama süreçlerine göre bilya püskürtme işlemi tanımına daha uygun bir şekilde ele alınmıştır. Her ne kadar benzer çalışmalardaki parametreler incelenmiş olsa da parametrelerin belirlenmesi malzeme türü ve mukavemeti, malzemenin özgül ağırlığı, belli parametrelerin sabit alınması sebebi ile optimize edilecek olan parametreler (Maruz kalma süresi, Bilya çapı) yapılan ön deneylerden sonra belirlenmiştir (Baran ve Neşeli, 2024). Literatür incelendiğinde, mevcut çalışmaların genellikle yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip malzemeler üzerinde yoğunlaştığı, buna karşın düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip malzemelerin kumlama, BP ve BD işlemlerine tabi tutulmadığı ve bu alanda bir boşluğun bulunduğu tespit edilmiştir. Mekanik özellikleri belirgin bir şekilde birbirinden farklı olan iki malzeme cinsi, farklı boyutlardaki iki çelik bilya ve iki farklı sürede optimizasyon gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında, Al7075 T6 alüminyum alaşımı ve AISI4140 çelik

numunelerinin tornalama işlemi sonrasında elde edilen düşük yüzey pürüzlülüğünün, BP işlemi sonucu yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenecektir.



3. KUMLAMA ve BİLYA PÜSKÜRTME İŞLEMLERİ

Kumlama ve bilya püskürtme işlemleri, metal yüzeylerin temizlenmesi ve hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan bir mekanik aşındırma yöntemidir (Arifvianto ve ark., 2020; Zulkarnain ve ark., 2021). Bu işlemler, yüksek hızda hava akışı altında metal yüzeylerine püskürtülen silis kumu, alüminyum oksit, çelik bilyalar gibi aşındırıcı malzemelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Metal yüzeylerdeki pas, korozyon, oksit tabakaları, tufal ve diğer istenmeyen yüzey kusurlarını etkili bir şekilde gidermektedir (Hansel, 2000). Malzeme yüzey pürüzlülüğünü artırarak kaplama ve boyama işlemleri için ideal bir yüzey hazırlar. Metal yüzeylere bu işlemlerin uygulanması, yüzey kalitesini doğrudan etkiler ve kaplama işlemlerinin performansını iyileştirmesinden ötürü malzeme bilimi açısından önem teşkil eder. BP prosesinde kullanılan çelik bilyalar, metal yüzeylere belli bir hız ile çarptığında oldukça etkili bir şekilde yüzeydeki kir, pas ve diğer istenmeyen materyalleri temizler. BP işleminin temel prensibi, yüzey üzerine yönlendirilen bilyaların kinetik enerjisiyle malzeme yüzeyinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Çelik yüzeylerde kumlama işlemi, paslanma riskini azaltıp, kaplama dayanıklılığını artırarak metalin ömrünü uzatır. Parametrelerin seçimi işlenecek olan malzemeye göre değişkenlik göstermekte olup malzemenin yapısı, mukavemeti, kimyasal bileşimleri gibi etmenler dikkate alınarak seçilmelidir. Bu işlemler sırasında kullanılan bilya boyutu ve türü, metal yüzeyin aşındırma derecesini ve pürüzlülüğünü etkiler. Püskürtme basıncı, maruz kalma süresi ve kullanılacak bilya boyutunun seçilmesi önem arz eder. Kumlama işleminin metal yüzeylere olan etkileri, yüzey sertliği, mikroyapı ve kaplama özellikleri üzerinde önemli değişiklikler yaratabilir. İşlem sonrası metal yüzeylerde oluşan mikroskobik pürüzler, kaplama veya boyama işlemlerinin işlevselliğini artırabilir ancak aşırı kumlama, yüzeyde mikro çatlaklara ve mekanik gerilmelere yol açabilir. Bu yüzden, kumlama işleminin kontrol edilmesi ve optimize edilmesi gereklidir (Almen, 1943; Fedoryszyn ve Zyzak, 2010; Byrne ve ark., 2013; Kumar ve ark., 2013).

3.1. Kumlama Makineleri

Kumlama makineleri, kumlama yöntemine göre seçilmekte olup, metal yüzeylerin temizlenmesi, pürüzsüzleştirilmesi ve malzeme ömrünün artırılması amacıyla kullanılan

çeşitli teknikler ve ekipmanları kapsar. Kuşlama, genellikle metal yüzeylerine yüksek hızda aşındırıcı maddeler püskürtme işlemi olarak tanımlanır ve birkaç temel yöntemi içerir. Bu makineler, çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun olarak yatay, dikey, tünel tipi, çalkalama ve robotik kuşlama makineleri gibi farklı türlerde tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Yatay ve dikey kuşlama makineleri, farklı parça boyutları için uygun olup, tünel tipi makineler büyük üretim hatlarında kullanılır. Robotik kuşlama makineleri ise otomasyon ve yüksek hassasiyet sağlamakta olup, büyük ölçekli üretim tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuşlama makineleri iş parçasının büyüklüğü, şekli ve işlem gereksinimlerine göre seçilmektedir (Narkhede ve ark.; Fedoryszyn ve Zyzak, 2010; Wrona ve ark., 2012).

Bu proste kullanılan tezgahlar çok çeşitli olup endüstriyel uygulamalarda kullanılan kuşlama makineleri türleri aşağıda sıralanmıştır (Anonim, 2024b);

- Basınçlı kuşlama Kabini
- Vakumlu / Enjeksiyonlu Kuşlama Kabini
- Portatif / Seyyar kuşlama makinesi
- Sulu Kuşlama Makinesi
- Cam kuşlama makinesi
- Otomatik kuşlama makinesi
- İmplant medikal kuşlama makinesi
- Askılı Kuşlama Makinesi
- Tamburlu Kuşlama Makinesi
- Sac ve Profil Kuşlama Makinesi
- Mermer Kuşlama Makinesi

Bu tez çalışmasında BP işlemi parametrelerinden maruz kalma süresi ve bilya çapını optimize etmek amacıyla Al7075 T6 alüminyum alaşımı ve AISI4140 çelik numuneler lastik bantlı tamburlu kuşlama makinasında işlenmiştir.

3.2. Tamburlu Kuşlama Makinesi

Tamburlu kuşlama makineleri, döner bir tambur içinde yer alan parçalar veya malzemeler üzerine yüksek hızda aşındırıcı materyaller fırlatılarak, yüzeydeki kir, oksit, pas ve diğer istenmeyen maddeleri ortadan kaldırır. Tamburlu kuşlama makinesi, özellikle küçük ve orta boyutlu iş parçalarının yüksek hacimli üretim süreçlerinde etkin

bir şekilde kullanılmakta olup, yüzey temizliği ve aşındırma işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, tamburlu kumlama makineleri, işlem sırasında kumun ve diğer aşındırıcı malzemelerin daha eşit bir şekilde dağılmasını sağlayarak, yüzey pürüzlülüğünü artırmakta ve böylece işlem sonrası uygulamalardan, kaplama veya boyama işlemlerinin kalitesini iyileştirmektedir. Şekil 3.1’de lastik bantlı tamburlu kumlama makinesi verilmiştir.



Şekil 3.1. Tamburlu kumlama makinesi(Anonim, 2024a)

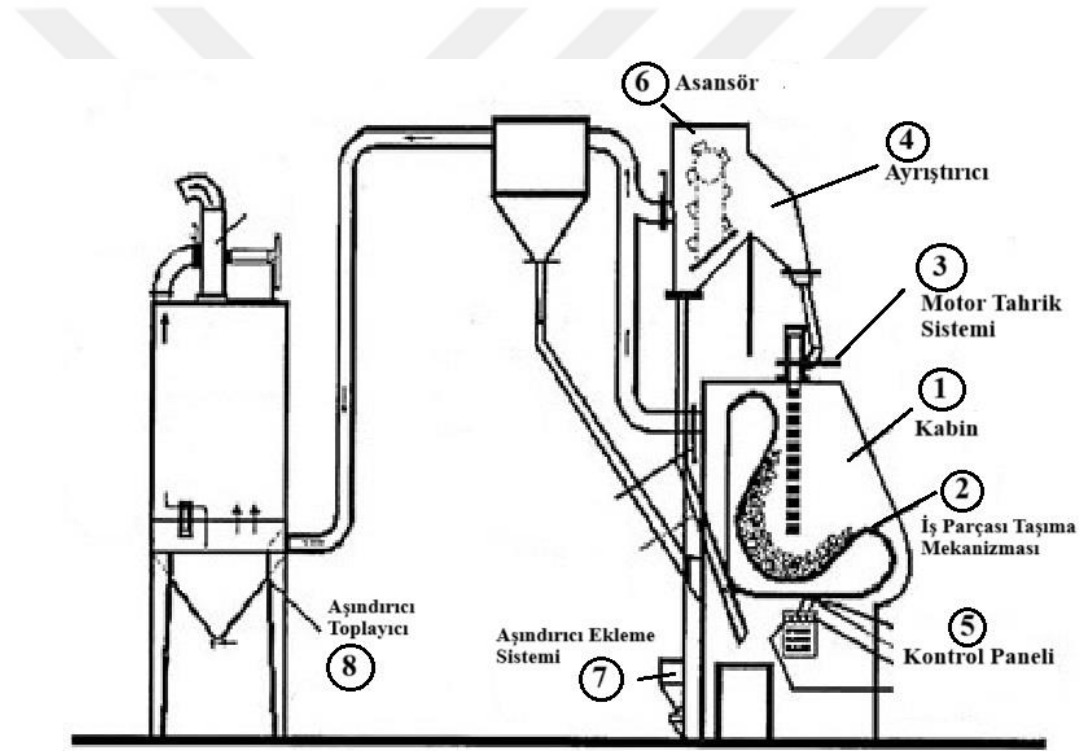
Kumlama tezgahındaki tasarım iyileştirmeleri, aşındırıcı malzeme akışının ve tambur hareketinin optimize edilmesini içerir, bu sayede aşınma ve yıpranma oranları düşer. Bu nedenlerden ötürü, tamburlu kumlama makineleri, endüstriyel uygulamalarda ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif sunma potansiyeline sahip olmaktadır. Bu makinelerin kullanımı, maliyet etkinliğini artırırken, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir yaklaşım sergilemektedir (Anonymous, 2024b).

3.3. Tamburlu Kumlama Makinesi Bölümleri ve Çalışma Prensibi

Aşamalı ve entegre bir süreç olarak çalışan tamburlu kumlama makinesinin çalışmasında ilk olarak, iş parçaları ve aşındırıcı malzemeler makinenin yükleme platformuna yerleştirilir, bu işlem otomatik yükleme sistemleri veya manuel olarak

gerçekleştirilir. Kabin kapatıldığında, türbin sistemi aktive edilir ve türbinler, belirli bir hız ve açıyla aşındırıcıları iş parçasına püskürterek tambur belli bir hız ile dönmeye başlar. Bu mekanik işlem, iş parçasının yüzeyindeki kir, pas veya pürüzlerin temizlenmesini ve yüzeyin homojen bir şekilde pürüzsüzleştirilmesini sağlar. İşlem sırasında kullanılan aşındırıcılar, geri dönüşüm sistemi aracılığıyla toplanır, ayrılır ve temizlenir, böylece malzeme yeniden işleme sürecine dahil edilir ve atık miktarı minimize edilerek ekonomik bir katkı sağlanmış olur. Makinenin kontrol paneli, türbin hızları ve aşındırıcı akış miktarları gibi parametreleri hassas bir şekilde izler ve ayarlar, böylece işlem süreci optimize edilir (Almen, 1943; Wrona ve ark., 2012; de, 2014).

Kumlama ve bilya püskürtme tezgâhları belli başlı bazı genel çalışma prensibi Şekil 3.2’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Bilya püskürtme tezgâhı şematik gösterimi (PATEL, 2012)

Şekil 3.2’de verilen ve balonlar ile temsil edilen tezgâh bileşen sistemleri aşağıda detaylandırılmıştır;

Kabin

Tamburlu kumlama makinesinin merkezi bileşenlerinden biri olan kabin sistemi, silindirik bir yapıdan ve döner bir tamburdan oluşur. Bu yapı, genellikle yüksek dayanıklılığa sahip metal alaşımlarından imal edilir ve aşındırıcıların iş parçalarına etkili bir şekilde aktarılmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Tamburun iç yüzeyi, aşındırıcı malzemelerin iş parçalarının tüm yüzeylerine eşit şekilde ulaşabilmesi amacıyla döner ve

kumlanacak olan bütün malzemelerin eşit bir şekilde kumlanmasını sağlar. Bu dinamik, kumlama işleminin etkinliğini artırarak iş parçalarının yüzey kalitesini optimize eder, mekanik aşınma ve yüzey pürüzlülüğünü azaltır.

İş Parçası Taşıma Mekanizması

Parçaların taşınması için kullanılan bu sistemler, işleme sürecine tabi tutulacak parçaların türü, boyutları ve yüzey kalitesi gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde çeşitlenmektedir. Bu çeşitlenme, her bir parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerine uygun olarak taşıma yöntemlerinin optimize edilmesine olanak tanır. Tamburlu kumlama makinası küçük ve orta büyüklükteki parçaların işlenmesi için daha uygundur. Bu makinelerde kullanılan taşıma sistemleri, işleme sırasında parçalara homojen bir yüzey işlemini uygulanabilmesi için gereken hassasiyeti ve kontrolü sağlamaktadır.

Motor ve tahrik sistemi

Motor tahrik sistemi, aşındırıcı malzemeyi yüksek hızlarda püskürtmek için kullanılan tamburlu kumlama makinesinin bir bölümüdür. Genel olarak bu sistem bir veya birkaç döner türbin kanata sahip olup, yüksek hızda dönerek aşındırıcıları belirli bir açıyla tambur yüzeyine yönlendirir. Elektrik motoru tarafından tahrik edilen türbinlerin motor gücü ve hız ayarları, kumlama verimliliğini ve kalitesini etkiler.

Ayrıştırıcı Sistemi

Filtreleme sistemi, BP işleminde ortaya çıkan aşındırıcı materyal ve partikülleri havadan temizleyen sistemdir. Filtreler, havada bulunan partikülleri yakalayıp iş ortamının temiz ve sağlıklı kalmasını sağlar. Filtrelerin düzenli olarak temizlenmesi veya değiştirilmesi, sistemin verimliliği açısından önem arz eder.

Kontrol paneli

Kontrol panelleri, kumlama makinelerinin işlevlerini yönetmek için kullanılan elektronik bir ünedir. Bu panel, operatörlere makinenin çalışma hızını, türbin hızını, kumlama süresini ve diğer parametreleri ayarlama imkânı sunar. Gelişmiş kontrol panelleri, otomatik ayar ve hata teşhis sistemleri ile donatılmıştır.

Aşındırıcı geri dönüşüm sistemi (Asansör)

Geri dönüşüm sistemleri, asansör adı verilen ve BP işleminde kullanılan aşındırıcı malzemeyi toplayarak yeniden kullanılabilir hale getirir. Bu sistemler, toplanan

malzemeyi bir ayrıştırma ünitesinde temizler, yabancı partikülleri ve kirleticileri ayırarak ayrıştırılan aşındırıcıları depolama tanklarına geri gönderir. Bu süreç, malzemenin tekrar BP işlemlerinde kullanılmasını sağlar.

Aşındırıcı Ekleme Sistemi

Bu prosesler için işlem sürecinin güvenli ve optimize edilecek olan iş parçasının homojen bir şekilde kumlanması amacı ile oluşturulmuş sistemlerdir. Aynı zamanda, operatörlere ergonomik bir çalışma alanı sunarak iş parçalarının işleme sırasında daha etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanır, bu da işlem verimliliğini ve genel iş güvenliğini artırır.

Aşındırıcı Toplama Sistemi

BP işlemi sırasında kullanılan aşındırıcı materyallerin toplanarak yeniden kullanılmasını sağlayan bir mekanizmadır. Çevresel etkileri azaltmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla tasarlanan bu sistemler prosesin daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

3.4. Aşındırıcılar

Metal yüzeylerin kumlama işleminde kullanılan aşındırıcı malzemeler, yüzeylerin temizlenmesi, pürüzsüzleştirilmesi ve belirli fiziksel özelliklerin kazandırılması amacıyla seçilmektedir. BP işleminde kullanılan bilyalar genellikle yüzeyin temizlenmesi sırasında hem mekanik hem de termal bir etki sağlayan çelik, dökme demir veya benzeri sert malzemelerden oluşmaktadır. İşlem hem güvenliği sağlamak hem de bilyaların geri dönüşümünü kolaylaştırmak amacıyla kapalı bir ortamda gerçekleştirilir. BP işlemi sırasında, bilya püskürtme nozulları, uygulamanın etkinliğini arttıracak şekilde ayarlanmaktadır. Bu ayarlama, aşındırıcıların yüzeye eşit dağılımını sağlayarak, malzeme üzerindeki etkilerin tutarlılığını ve etkinliğini artırır. Böylece, işlem sonucunda elde edilen yüzey özellikleri üzerinde olumlu bir etki sağlanmış olur. Yüzeye doğru püskürtülen bilyalar, yüksek hızda hareket eder ve yüzeyin tüm noktalarına etki eder, bu da yüzeyin homojen bir şekilde temizlenmesini ve pürüzsüzleştirilmesini sağlar (Brezinová ve ark., 2015; Ngalula, 2020; Rudawska, 2023). Bu süreç, genellikle bir tür döngüsel sistemle gerçekleştirilir kullanılan bilyalar işlemin ardından toplanır, temizlenir ve tekrar kullanılır. Bu da malzeme israfını azaltmakta olup ekonomik bir katkı sağlar.

Naidu ve Raman (2005) yaptıkları çalışmada BP işleminin düşük değişken yükler altında çalışan makine elemanlarında, aşınma yorulma ömrünü artırmak için en ucuz ve en iyi yöntemlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Aşağıda verilen başlıklar altında Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işleminde kullanılan aşındırıcılara ait detaylara değinilmiştir.

3.4.1. Silis kumu

Silis kumu, metallerin kumlama işleminde yaygın olarak kullanılan bir aşındırıcı çeşididir. Silis kumu, sert ve keskin taneciklere sahip olduğundan, metal yüzeylerdeki pas, kir, eski kaplamalar ve diğer kirleticileri etkili bir şekilde temizler. Ayrıca, metal yüzeylerin pürüzlülüğünü ve kaba yüzey dokusunu iyileştirerek sonraki işlem adımları için daha iyi bir yüzey hazırlığı sağlar. Bu nedenle, otomotiv endüstrisi, inşaat sektörü ve çeşitli imalat uygulamalarında silis kumu aşındırıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Bandaru, 2004; Ngalula, 2020). Şekil 3.3'te silis kumuna ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.3. Kumlama işleminde kullanılan silis kumu (Anonim, 2024c)

3.4.2. Alüminyum oksit

Metallerin kumlama işleminde etkili bir aşındırıcı olarak kullanılan alüminyum oksit (Al_2O_3), yüksek sertlik ve aşındırma gücüne sahip olduğundan, metal yüzeylerin temizlenmesi, pürüzsüzleştirilmesi ve yüzey hazırlığı için ideal bir aşındırıcıdır. Özellikle metal yüzeylerdeki pas, oksit tabakaları, boya ve diğer kirleticileri etkili bir şekilde temizler. Ayrıca, alüminyum oksidin tanecikleri genellikle keskin köşelere sahip

olduğundan, yüksek verimlilikle yüzeyin aşındırılmasını sağlar. Alüminyum oksit otomotiv, havacılık, imalat ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Alüminyum oksidin avantajları arasında yüksek aşındırma kapasitesi, düşük toz yayılımı ve tekrar kullanılabilirliği bulunur. Alüminyum oksit, silis kumuna kıyasla sağlık riskleri açısından daha az tehlikeli bir alternatif olarak kabul edilir (Azarhoushang ve ark., 2021; Rudawska, 2023). Şekil 3.4'te alüminyum oksit görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.4. Kumlama işleminde kullanılan Alüminyum oksit (Anonymous, 2024a)

3.4.3. Garnet

Doğal olarak oluşan ve sert bir mineral olan garnet (Şekil 3.5) genellikle koyu kırmızı veya kahverengi renklerde bulunur. Kumlama işlemlerinde, garnet tanecikleri metal yüzeylere yüksek basınçla püskürtülerek, yüzeydeki pas, kir, oksit tabakaları ve diğer kirlenmeler etkili bir şekilde temizlenir. Garnetin sertliği, metal yüzeylerin düzgün bir şekilde aşındırılmasını ve pürüzsüzleştirilmesini sağlar (Stefanescu, 2017; Ngalula, 2020). Ayrıca, garnet, silis kumuna kıyasla sağlık açısından daha güvenli bir aşındırıcı türü olarak kabul edilir.



Şekil 3.5. Kumlama işleminde kullanılan garnet (Anonymous, 2024a)

3.4.4. Cam küre

Genellikle şeffaf veya opak camdan üretilen cam boncuklar, yuvarlak ve tanecikli yapıya sahip olmaları nedeniyle yüzeyleri aşındırırken daha hafif bir etki sağlarlar. Bu özellikleri sayesinde, metal yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesi ve temizlenmesi amacıyla kullanılırken, yüzeyde istenmeyen derin izler veya aşırı aşınma riski taşımaz. Cam boncuklar, özellikle hassas yüzey işleme ve yüzeyin hafifçe parlatılması gereken uygulamalarda etkilidir. Metal yüzeylerde, pas, kir ve hafif oksit tabakalarını temizlerken, aynı zamanda yüzeyde homojen bir pürüzsüzlük sağlar (Guo ve ark., 2019; Zulkarnain ve ark., 2021). Kabine tipi, tünel tipi basınçlı hava kumlama makinelerinde kullanımı uygundur. Şekil 3.6'da cam kürelere ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.6. Kumlama işleminde kullanılan cam küreler (Anonymous, 2024a)

3.4.5. Seramik küre

Seramik küreler, metallerin kumlama işleminde yüksek sertlikleri ve aşındırma kapasiteleri sayesinde tercih edilen bir aşındırıcı çeşidi olarak kullanılmaktadır. Yüksek dayanıklılığı sayesinde metal yüzeylerde etkili bir temizlik ve pürüzsüzleştirme sağlar, yüzeyde derin izler bırakmadan pas, oksit ve kir tabakalarını temizler. Bu küreler, özellikle sert metal yüzeylerin işlenmesinde üstün performans gösterir (Kosmač ve ark., 1999; Malkin ve Guo, 2008). Seramik küreler, basınçlı hava kumlama makinelerinde, tünel kumlama sistemlerinde ve kabine kumlama makinelerinde kullanılmaları uygundur. Yüksek aşındırma gücü ve uzun ömürleri, seramik kürelerin verimliliğini artırırken, endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek sertlik ve dayanıklılık gerektiren işlemlerde tercih edilen aşındırıcı olarak karşımıza çıkar. Şekil 3.7’de seramik kürelere ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.7. Seramik küreler (Anonymous)

3.4.6. Soda

Soda (NaHCO_3), metallerin kumlama işleminde kullanılan hafif ve çevre dostu bir aşındırıcı malzeme olarak kabul edilir. Metal yüzeylerin temizlenmesi, pas ve kirlerin giderilmesi ile yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesinde etkilidir. Soda aşındırıcı, özellikle yüzeyde hassas bir temizlik gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Düşük aşındırma gücü gerektiren işlemler için kullanımı uygundur. Soda daha çok basınçlı hava kumlama makinelerinde metal yüzeylerin temizlenmesi için kullanılırken, tozun yayılımını en aza indirmek ve güvenli çalışma koşulları sağlamak amacıyla kabine kumlama makinelerinde

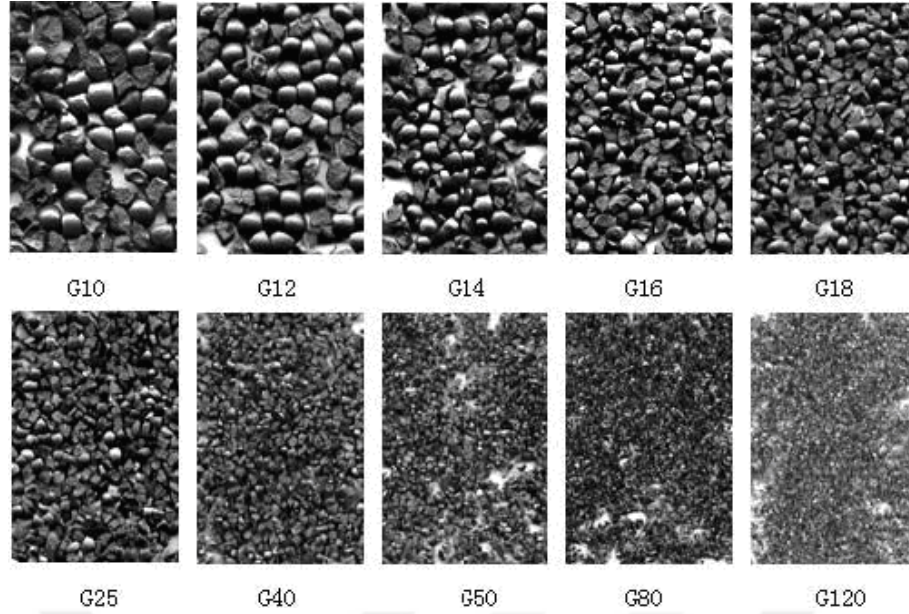
de kullanılabilir (Normandin ve Slaton, 2006; Rudawska, 2023). Şekil 3.8’de sodaya ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.8. Kumlama işleminde kullanılan soda (Anonymous)

3.4.7. Çelik grid

Çelik gridler, metallerin kumlama işlemlerinde yüksek sertlik ve aşındırma kapasitesi sunan bir aşındırıcı çeşididir. Bu aşındırıcı, metal yüzeylerdeki pas, oksit ve diğer kir tabakalarını etkili bir şekilde temizleyerek yüzey pürüzlülüğünü iyileştirilmesinde önemli bir aşındırıcıdır. Çelik grid’in yüksek sertlik ve kırılma özellikleri ve malzemenin tekrar kullanılabilirliği, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik avantajları sunar. Çelik grid, tünel kumlama makineleri, basınçlı hava kumlama makineleri ve endüstriyel kumlama makineleri gibi kumlama sistemlerinde kullanıma uygundur; bu makinelerde, çelik grid’in yüksek performansı ve dayanıklılığı, geniş ölçekli ve yüksek hacimli yüzey işleme uygulamalarında verimliliği artırır. Bu özellikleri, çelik gridin metal yüzeylerin derinlemesine temizliği ve pürüzsüzleştirilmesi için ideal bir aşındırıcı haline getirir (Azarhoushang ve ark., 2021). Farklı boyut ve çaplara sahip çelik gridler Şekil 3.9’daki görselde verilmiştir.



Şekil 3.9. Farklı boyutlardaki çelik gridler (Anonim, 2024c)

3.4.8. Dökme demir bilyalar

Dökme demir bilyalar, metallerin kumlama işlemlerinde ekonomik ve etkili bir aşındırıcı olarak kullanılırlar. Bu bilyalar, metal yüzeylerdeki pas, kir ve eski kaplamalar ve metallerin yüzeyinde bulunan tufalin giderilmesinde yaygın olarak kullanılırlar. Dökme demir bilyaların, tünel kumlama makineleri, basınçlı hava kumlama makineleri ve endüstriyel kumlama makineleri gibi çeşitli kumlama sistemlerinde kullanılması, yüksek verimlilikle metal yüzeylerin temizlenmesini ve pürüzsüzleştirilmesini sağlar. Bu bilyalar, özellikle büyük hacimli işlemler ve maliyet açısından avantajlı olsalar da çelik bilyalara kıyasla daha hızlı aşınabilme eğiliminde olduklarından, uzun vadeli kullanılmamaları bir dezavantaj oluşturmaktadır (Durman, 1983).

3.4.9. Çelik bilyalar

Çelik bilyalar, bilya püskürtme işlemlerinde yüksek sertlik ve aşındırma kapasiteleri ile yüksek performans gösterirler. Bu aşındırıcı malzeme, metal yüzeylerdeki pas, oksit ve diğer kir tabakalarını etkin bir şekilde temizler. Çelik bilyaların yüksek sertliği, metal yüzeylerde derinlemesine aşındırma yerine homojen bir pürüzsüzlük sağlar, bu da işlem sonrası yüzey kalitesini artırır. Çelik bilyalar, tünel kumlama makineleri, basınçlı hava kumlama makineleri ve endüstriyel kumlama makineleri gibi çeşitli kumlama sistemlerinde kullanıma uygundur. Bu makinelerde, çelik bilyaların

yüksek performansı, geniş ölçekli ve yüksek hacimli yüzey işleme uygulamalarında verimliliği artırır. Özellikle tünel kumlama makinelerinde, çelik bilyaların sürekli akışta kullanılması büyük metal parçaların etkili bir şekilde temizlenmesini sağlar. Basınçlı hava kumlama makinelerinde, çelik bilyalar metal yüzeylerde yoğun aşındırma kapasitesi sunarak yüksek performanslı işlem yapılmasını sağlar. Endüstriyel kumlama makinelerinde ise, çelik bilyaların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü, yüksek hacimli üretim süreçlerinde tutarlılık ve verimlilik sağlar. Bilyaların sertliğinde dolayı çarptıkları yüzeyde çatlak başlama derinliğini arttırarak malzemelerin yorulma mukavemetinin artmasını sağlarlar (Durman, 1983; Normandin ve Slaton, 2006). Şekil 3.10’da SAE J444 standardında ve farklı bilya çaplarına sahip çelik bilyalara ait görsel verilmiştir.

Bu çalışmada BP işlemi esnasında şekil 3.11’de görülen SAE J444 standardındaki çelik bilyalardan çapı 0.42 mm olan S170 ve çapı 0.84 mm olan S330 çelik bilyalar kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Çelik bilyalar (Anonim, 2020)

3.5. Kumlama ve Bilya Püskürtme İşlemlerini Etkileyen Parametreler

Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemlerinde istenilen sonuçların elde edilmesi için parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler malzeme türüne ve işlem amacına göre değişkenlik gösterir. Kumlama, BD ve BP işlemleri için parametreler, uygulanacak malzemeye cinsine göre belirgin bir şekilde değişkenlik gösterebilmektedir. Bundan dolayı prosesin uygulanacağı malzeme mekanik özellikleri de bu işlemler sırasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu uygulamalarda en etkili parametreler sırası ile püskürtme basıncı, maruz kalma süresi, bilya türü ve bilya çapı olarak gelmektedir.

Kumlama işlemi sırasında, kullanılan aşındırıcı malzemenin türü ve çapı, uygulanan püskürtme basıncı ve akış hızı, yüzey pürüzlülük değerlerinin etkinliğini belirler. Bilya püskürtme işleminde, bilya çapı, malzeme bileşimi, uygulanan kinetik enerji ve çarpma açısı vb. parametreler yüzeyin temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bilyalı dövme işleminde ise bilya çapı, çarpma enerjisi, darbe hızı, çarpma açısı ve işlem süresi, metal yüzeyinde çatlak başlama süresini arttırarak malzemenin yorulma dayanımını arttırmada önemli bir rol oynar. Bu parametrelerin malzeme özellikleri ve işlem hedefleri doğrultusunda optimize edilmesi, işlem verimliliğini ve yüzey kalitesini iyileştirmektedir.

3.5.1. Püskürtme basıncı

Kumlama ya da bilya püskürtme işlemlerinde püskürtme basıncı, yüzey işleme etkinliğini ve sonuçlarını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Genel olarak püskürtme basıncı işlenecek olan malzemeye göre seçilmekte olup sert ve mukavemetli malzemeler için yüksek daha düşük mukavemetli malzemeler için ise düşük püskürtme basıncı seçilmektedir. Yüksek püskürtme basıncı, bilya, kum veya diğer aşındırıcı taneciklerinin kinetik enerjisini arttırarak kumlanacak olan yüzeye yüksek hızda çarpmasını sağlar, bu da temizlik, aşındırma veya pürüzlendirme etkisini artırır. BP işlemi esnasında uygulanan yüksek basınç yüzeyde istenmeyen mikro çatlaklar ve malzeme yorulma ömrünün azalmasına neden olabilir (Omari ve ark., 2019; Ngalula, 2020). Düşük basınç ise, taneciklerin yüzeye daha düşük hızda çarpmasına yol açarak daha kontrollü bir aşındırma ve yüzey işleme sağlar. Fakat düşük püskürtme basıncının olduğu durumlarda verimliliğin sağlanabilmesi için maruz kalma süresinin arttırılması gerekebilir bu da işlem

süresi uzatıp zaman kaybına yol açabilir. Sonuç olarak kumlama işlemi, bilyalı püskürtme işlemi ve bilyalı dövme işlemlerinin her birinde optimum sonucun elde edilebilmesi için işlenecek olan malzeme ve diğer parametreler göz önünde bulundurularak püskürtme basıncı seçilmelidir (Finger ve ark., 2020).

Bu çalışmada püskürtme basıncı bütün numuneler için sabit sabit seçilmiş olup 7.5 kW'lık türbin gücü ve 3000 dev/dk döndürme türbin devrine sahip tamburlu kumlama makinasında deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.5.2. Maruz kalma süresi

Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemlerinde maruz kalma süresi yüzey işleme sonuçlarının belirlenmesinde önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar. Daha uzun maruz kalma süreleri, yüzeye püskürtülen aşındırıcıların malzeme ile etkileşim süresini artırarak, daha derin ve etkili aşındırma, temizleme veya yüzey pürüzlülüğü sağlayıp daha homojen bir pürüzlülüğe yol açabilir. Ancak, uzun maruz kalma sürelerinde, malzemenin mekanik davranışını olumsuz yönde etkileyebilecek yüzeyde aşırı aşınma, malzeme yorulması ve istenmeyen deformasyon risklerini de beraberinde getirebilir (Han, 2021). Kısa maruz kalma sürelerinde ise, yüzeyde daha sınırlı bir değişiklik sağlanarak, malzeme aşınma oranları azaltmanın yanı sıra yüzey işleme verimliliği ve etkisi azaltabilir. Bu bağlamda, maruz kalma süresinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, proses verimliliği ve yüzey kalitesi işlemlerinin dengeli bir şekilde yürütülmesine imkân tanır (Ahmed ve ark., 2015; Maleki ve ark., 2019).

Bu tez çalışmasında numuneler 30 sn ve 60 sn süreler ile bilya püskürtme işlemine tabi tutulmuştur. Sürelerin belirlenmesi AISI4140 çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilen ön deneylerden sonra belirlenmiştir. Yapılan ön deneylerde 60 saniye üzerindeki BP işlemi sürelerinde numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

3.5.3. Bilya cinsi

Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemlerinde seçilen bilya türü, yüzey işleme parametrelerinde belirleyici bir unsurdur. Bilya türü, malzemenin sertliği, kimyasal bileşimi ve geometrik özellikleri, işlem sırasında uygulanan kinetik enerjinin yüzey etkileşimleri üzerindeki etkisini belirler. Çelik bilyalar yüksek sertlikleri sayesinde

daha etkili bir aşındırma ve temizlik sağlarken, seramik veya cam bilyalar, düşük aşındırma oranı ve daha az yüzey hasarı ile daha hassas işleme uygulamaları için tercih edilmektedir. Kumlama işleminde bilya türünün seçimi, yüzey işleme verimliliğinin, işleme kalitesinin ve malzeme performansının en uygun seviyede tutulmasını sağlamak için dikkatle seçilmelidir (Aparicio ve ark., 2003; Bagheri ve Guagliano, 2009). Bu tez çalışmasında BP işlemi için sertliği 40-50 HRC arasında değişen çelik bilyalar kullanılmıştır.

3.5.4. Bilya çapı

Bilya çapı, aşındırıcıların yüzeye uyguladığı kinetik enerjiyi, aşındırma ve temizleme kapasitesini belirler. Büyük çaplı bilyalar, yüksek enerji transferi sağlayarak derin kaplamaların ve kirlerin etkili bir şekilde çıkarılmasına yardımcı olabilir. Ancak, büyük bilyalar, yüzeyde daha fazla hasar ve istenmeyen pürüzlülüklere yol açabilir. Küçük çaplı bilyalar ise daha hassas ve kontrollü bir işleme sağlar, yüzeyde daha ince ve homojen pürüzlülükler oluşturur, fakat aşındırma süresi uzaması ve istenilen mekanik özelliklere erişilememesinden dolayı verimlilik düşebilir. Bu nedenle, yüzey işleme sürecinin verimliliği ve yüzey kalitesi artırılması amacıyla bilya çapının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir (Aparicio ve ark., 2003; Petit-Renaud, 2003; Bagheri ve Guagliano, 2009).

Bu çalışmada 0.42 mm çapa sahip S170 ve 0.84 mm çapa sahip S330 çelik bilyalar kullanılmıştır. Üretilen bilyaların sınıflandırılması mekanik özellikleri, kimyasal bileşimleri ve geçtikleri elek çapına göre belirlenmekte olup kinetik enerjileri, hız ve kütleyle bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla bilyaların enerji transferine bakıldığında S330 çelik bilyaların S170 çelik bilyalara göre yaklaşık olarak 8 kat daha fazla enerjiye sahiptir.

3.5.5. Nozul açısı

Kumlama, bilya püskürtme ve bilyalı dövme işlemlerinde nozul açısının önemi, işlem etkinliğinin ve yüzey kalitesinin optimize edilmesi açısından önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar. Nozul açısı, iş parçasına uygulanan aşındırıcıların yüzeye çarpma açısını ve kinetik enerjisini belirler, bu da yüzeyde elde edilen aşındırma, temizleme malzeme yüzeyinde istenilen mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Püskürtme açısının

yanlış seçilmesi yüzeyde düzensiz bir aşındırma ve homojen olmayan bir aşındırmaya sebep olabilir. Özellikle bilyalı dövme uygulamalarında, nozul açısının doğru bir şekilde ayarlanması, yüzeydeki sıkıştırma gerilmelerinin ve yorulma ömrünün iyileştirilmesi için kritik öneme sahiptir (Heaton, 1989; Byrne ve ark., 2013). Doğru püskürtme açısının seçilmesiyle istenilen yüzey özelliklerinin elde edilmesindeki işlem sürecinin etkinliği ve iş parçasının performans ve dayanıklılığı artırılmış olacaktır. Çalışmada kullanılan nozul püskürtme açısı bütün deneyler için sabit ve numunelerin yüzeylerine homojen olarak gelecek şekilde ayarlanmıştır.

3.5.6. Nozul mesafesi

Malzemelerin yüzey kalitesinin iyileştirilmesindeki başka bir parametre ise nozul iş parçası mesafesidir. Nozul mesafesi fırlatılan aşındırıcıların kinetik enerjisini etkilemesinden kaynaklı malzeme aşındırma derecesini, yüzey pürüzlülüğünü ve işlem süresini etkiler (Byrne ve ark., 2013). Nozul iş parçası mesafesinin yakın olması, aşırı aşındırma ve potansiyel olarak yüzeyde hasara neden olabilirken, çok uzak bir mesafe ise yetersiz aşındırma ve düzensiz yüzey sonuçlarına yol açabilir. Doğru nozul mesafesinin seçilmesi enerji dağılımı optimize edilip yüzeyin homojen bir şekilde işlenmesi sağlanır.

BP işlemi sırasında kullanılan nozul mesafesi bütün deneyler için sabit ve 800 mm olarak gerçekleştirilmiştir.

4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Malzemelerin yüzeyindeki mikro düzensizliklerin ve girinti-çıkıntıların derecesini tanımlayan yüzey pürüzlülüğü malzemelerin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Binali, 2017). Yüzey pürüzlülüğü, metal parçaların performansını ve ömrünü doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle, malzeme yüzeyinde oluşan sürtünme, aşınma, yorulma ve kaplama özellikleri gibi çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri etkiler. Yüksek pürüzlülüğe sahip yüzeyler, genellikle daha fazla sürtünme ve aşınma riski taşımalarından dolayı enerji tüketimini artırabilir ve parçaların ömrünü kısaltabilir. Yüzey pürüzlülüğündeki artış, özellikle değişken yükler altında çalışan makine elemanlarında gerilme konsantrasyonlarını artırıp, mikro çatlakların oluşumuna ve büyümesine zemin hazırlayarak malzemenin yorulma ömrünü kısaltabilir. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması maksadıyla kumlama, BP işlemi ve BD işlemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda uygulanan bu işlemlerin malzemeye yüzey pürüzlülüğü kazandırmanın yanı sıra mukavemetlerinde de iyileşmelere sebep olduğu yapılan literatürel çalışmalardan anlaşılmaktadır (Kawagoishi ve ark., 2013; Unal, 2016; Demir ve ark., 2018; Safari ve Farahani, 2018; Li ve ark., 2019; Binali ve ark., 2023).

Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılan yöntemler arasında kontakt profilometreler, lazer tarayıcılar ve dijital mikroskoplar bulunur. Kontakt profilometreler, yüzey boyunca bir probun hareketiyle mikro yükseklikleri tespit ederken, lazer tarayıcılar temassız bir şekilde yüksek çözünürlüklü yüzey profilleri sağlar. Dijital mikroskoplar ise yüzeyin detaylı optik görüntülerini elde ederek pürüzlülüğü değerlendirir (Bennett, 1992; Poon ve Bhushan, 1995; Launhardt ve ark., 2016).

4.1. Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri

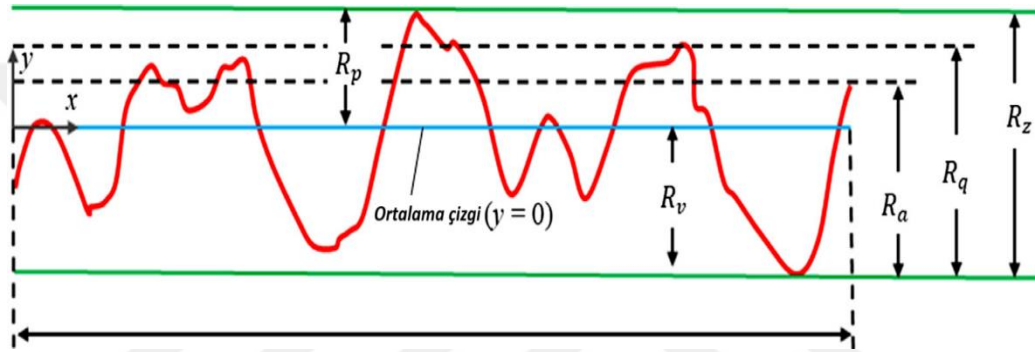
Yaygın olarak kullanılan pürüzlülük parametreleri aşağıda sıralanmıştır (Neşeli ve ark., 2012; Dobes ve ark., 2017; Alajmi, 2021; Kadivar ve ark., 2021);

- Ortalama Pürüzlülük Yüksekliği (R_a)
- Ortalama Pürüzlülük Derinliği (R_z)
- Karekök Ortalama Pürüzlülük (R_q)
- Toplam Pürüzlülük Yüksekliği (R_t)
- Pürüzlülük Asimetrisi (R_{sk})
- Pürüzlülük Keskinliği (R_{ku})
- Yüzey Dalgalanma Uzunluğu (S_m)

- Pürüzlülük Zirve Yüksekliği (S_p)
- Pürüzlülük Vadisi Derinliği (S_v)

Metallerin yüzey pürüzlülüğünün ölçümlerinde birçok parametre ve yöntem olup bunlar arasında yaygın olarak kullanılan parametrelerin literatür araştırması sonucu sırası ile Ortalama Pürüzlülük Yüksekliği (R_a), Ortalama Pürüzlülük Derinliği (R_z) ve Karekök Ortalama Pürüzlülük (R_q) olduğu saptanmıştır (Rao ve ark., 2016; Binali, 2024; Rosentritt ve ark., 2024).

Yaygın olarak kullanılan yüzey pürüzlülük ölçümü parametreleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülük parametreleri (Kadivar ve ark., 2021)

4.1.1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a)

Ortalama yüzey pürüzlülüğü parametresi (R_a), yüzeyin profil eğrisinin ortalama yüzey seviyesinden olan aritmetik ortalama uzaklığını ifade eder. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Yüzeydeki tüm pürüzlülüklerin aritmetik ortalamasını hesaplayarak, yüzeyin genel düzensizlik derecesini belirler. Bu ölçüm, yüzeyin düzensizlik seviyesini tek bir sayı ile özetler ve kalite kontrolü, malzeme işleme ve üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılır. R_a değeri düşükse, yüzeyin daha düzgün olduğunu; R_a değeri yüksekse, yüzeyin daha pürüzlü olduğunu gösterir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü fonksiyonu Denklem 4.1’de verilmiştir (Neşeli ve ark., 2012).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad 4.1$$

- R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü

- L : Ölçüm uzunluğu
- $y_{(x)}$: Yüzey profilindeki yükseklik değeri

4.1.2. Ortalama pürüzlülük derinliği parametresi (Rz)

Ortalama Pürüzlülük Derinliği (Rz), genellikle 5 mm uzunluğundaki bir ölçüm uzunluğu boyunca yüzeydeki en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki mesafelerin ortalaması alınarak yüzey pürüzlülüğü belirlenir. Bu parametre, yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Rz değerlerinin yüksek olması yüzeyde belirgin pürüzlülükler olduğunu, düşük değerler ise daha düzgün yüzeyleri işaret eder. Ortalama pürüzlülük derinliği Denklem 4.2’de verilmiştir (Kadivar ve ark., 2021).

$$Rz = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{p,i} + R_{v,i}) \quad 4.2$$

- Rz : Ortalama Pürüzlülük derinliği
- N : Ölçüm uzunluğundaki örnekleme sayısı
- $R_{p,i}$: i . Ölçüm segmentindeki tepe yüksekliği
- $R_{v,i}$: i . Ölçüm segmentindeki çukur yüksekliği

4.1.3. Karekök ortalama pürüzlülük parametresi (Rq)

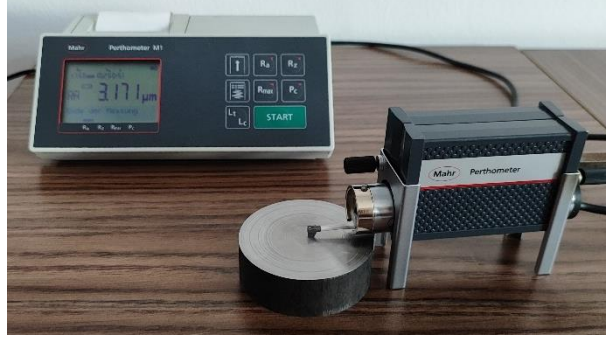
Bu parametre, yüzey pürüzlülüğünün nicel bir ölçümünü sağlar ve yüzey profilindeki pürüzlülüklerin ortalama karekök değerini ifade eder. Yüzey profilindeki yükseklik değişimlerinin karelerinin ortalamasının karekökü alınarak hesaplanır. Bu hesaplama, yüzeydeki pürüzlülüklerin genel etkisini daha hassas bir şekilde yansıtır. Karekök ortalama pürüzlülük parametresi Denklem 4.3’te verilmiştir (Kadivar ve ark., 2021).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [y_{(x)} - \bar{y}]^2 dx} \quad 4.3$$

- Rq : Ortalama karekök pürüzlülük parametresi

- L : Ölçüm uzunluğu
- $y(x)$: Yüzeyin herhangi bir noktasındaki yükseklik fonksiyonu
- \bar{y} : Ortalama yüzey yüksekliği

Mahr tipi pertometer M1 yüzey pürüzlülük cihazı Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük cihazı

Bu tez çalışmasında metallerin yüzey pürüzlülüğünün ölçümünde en fazla kullanılan ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) parametresi kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.

5. TAGUCHI YÖNTEMİ

Japon mühendis ve istatistikçi Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bir kalite yönetim sistemi olan Taguchi yöntemi, ürünlerin ve süreçlerin kalitesini artırmaya yönelik sistematik bir yaklaşım sunar. Bu yöntem ile, üretim süreçlerinde kullanılan deneysel tasarım ve istatistiksel analiz teknikleri ile prosesi iyileştirmeyi amaçlar (Antony ve ark., 2006; Binali ve ark., 2024). Taguchi yöntemi, minimum sayıda deneyle süreç performansını iyileştirebilen güçlü ve etkili bir deney tasarımıdır. Taguchi tasarımı, üretim süreçlerinde hedef fonksiyonlarının optimum değerlerini belirlemeyi amaçlar (Asiltürk ve Neşeli, 2012; Binali ve ark., 2022). Taguchi yöntemi, kontrol edilebilir faktörlerin ve rastgele değişkenlerin etkilerini analiz ederek, optimum üretim koşullarının belirlenmesine ve kalite sorunlarının çözülmesine yardımcı olur. Taguchi yöntemi, ortogonal diziler kullanarak deney tasarımını sistematik bir şekilde sunar ve Sinyal/Gürültü (S/N) oranları ile ürünün performansı değerlendirilir. Kalite iyileştirmesi, zaman tasarrufu, maliyet tasarrufu ve performans artışı gibi avantajlar sunan bu metod etkili sonuçlar sağlar. Taguchi Metodu Kumlama, BP ve BD işlemlerinde yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemidir (Mohammadi ve ark., 2007; Karna ve Sahai, 2012; Maleki ve ark., 2019; Reddy ve ark., 2023).

Taguchi yönteminde 3 temel S/N oranı hesaplama yöntemi bulunmaktadır bunlar;

- *En küçük en iyi*
- *En büyük en iyi*
- *Normal en iyi*

En küçük en iyi

Taguchi yöntemindeki en küçük değerlerin arandığı sonuçlarda kullanılan bu fonksiyonda, kalite kontrol ve iyileştirme süreçlerinde performans ölçüm değerlerinin mümkün olduğunca düşük tutulmasını hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu metodoloji, özellikle hata oranları, arıza frekansları, bozulma seviyeleri veya istenmeyen özelliklerin minimize edilmesi gereken durumlarda uygulanır. İlgili S/N oranları, performansın hangi ölçüde iyileştirildiğini değerlendirmek için kullanılır. Taguchi yöntemi en küçük en iyi objektif fonksiyonu Denklem 5.1'de verilmiştir (Haq ve ark., 2008).

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad 5.1$$

- y_i : Ölçülen sonuç değeri
- n : Gözlem sayısı

En büyük en iyi

Bu fonksiyon, ürün veya bir sürecin performansının mümkün olduğunca yüksek olması gerektiği durumlar için kullanılır. İstenilen sonuç, performansın, ölçüm değerlerinin en yüksek olmasını sağlamaktır. Bu tür bir hedef genellikle ürünün verimliliği, gücü veya dayanıklılığı gibi nitelikler için geçerlidir. Taguchi yöntemi en büyük en iyi objektif fonksiyonu Denklem 5.2’de verilmiştir (Haq ve ark., 2008).

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad 5.2$$

- y_i : Ölçülen sonuç değeri
- n : Gözlem sayısı

Normal en iyi

Performansın belirli bir hedef veya nominal değere olabildiğince yakın olması gerektiği durumlar için kullanılan bu fonksiyon, genellikle ürünün hedef değeri veya tasarım kriterleri ile ilişkili olan durumlarda kullanılır. Taguchi yöntemi normal en iyi objektif fonksiyonu Denklem 5.3’te verilmiştir (Haq ve ark., 2008)

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \right) \quad 5.3$$

- y_i : Ölçülen sonuç değeri
- n : Gözlem sayısı
- μ : Ortalama değer

5.1. Taguchi Metodu Ortogonal Dizin

Taguchi metodu üretimin olduğu birçok alanda deney sayısının azaltılması, maliyetin düşürülmesi, optimum parametrelerinin seçilmesi gibi durumlarda yaygın

olarak kullanılan bir metottur. Bu metot ile uygun kontrol faktörlerinin seçilmesi ve bu kontrol faktörlerine bağlı deney sayısının belirlenmesi amacı ile seviyeler belirlenmektedir (Asiltürk ve Neşeli, 2012; Kuntoğlu ve Sağlam, 2019). Tablo 5.1’de her biri 3 seviyede olan A, B ve C kontrol faktörleri ve seviyeleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Örnek kontrol faktörü ve seviyeleri

<i>Sembol</i>	<i>Kontrol Faktörü</i>	<i>Seviye 1</i>	<i>Seviye 2</i>	<i>Seviye 3</i>
<i>a</i>	A	1	2	3
<i>b</i>	B	1	2	3
<i>c</i>	C	1	2	3

Belirlenen Kontrol faktörleri ve seviyelerine bağlı olarak oluşturulan Taguchi ortogonal dizinler yapılması gereken deney sayısını vermektedir. Tablo 5.2’de yukarıda örnek olarak oluşturulan L_{27} kontrol faktörleri ve seviyelerine ait Taguchi ortogonal dizin verilmiştir.

Tablo 5.2. Taguchi L_{27} ortogonal dizin

Deney No	Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
10	2	2	2
11	2	2	1
12	2	1	1
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
25	3	1	1
26	3	1	2
27	3	2	1

Taguchi yöntemi analiz sonuçları yukarıda verilmiş olan denklemlerden (5.1-5.3) yapılan çalışmaya uygun denklem seçilerek sonuçlar elde edilir. Bu tez çalışmasında en küçük yüzey pürüzlülük değerleri arandığı için Denklem 5.1 kullanılmıştır.

6. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

6.1. Çalışmada İşlenen Materyaller

Bu tez çalışmasında savunma sanayi, otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılan çeliklerden AISI4140 çelik ve Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemeler kullanılmıştır. T6 ısıtılma işlemine tabi tutulan alüminyum alaşımının seçilmesinin sebebi AISI4140 çeliğe kıyasla sertlik ve akma mukavemetlerinin düşük olması ve alüminyum alaşımındaki boşluklu yapıda olmasından kaynaklıdır. T6 ısıtılma işlemine tabi tutulan Al7075 alaşımının seçilmesi ile hem boşluklu yapının giderilmesi hem de sertlik ve akma mukavemetleri AISI4140 çelik malzemesine yaklaştırılmak amacı ile yapılmıştır.

6.2. Çalışmada Kullanılan Bilyalar

Son zamanlarda kumlama ve türevleri işlemlerinin daha spesifik olarak uygulanması bu proseslerde malzemelerin sadece bir ara işlem olarak kullanılmasının dışına çıkmıştır. BP ve BD işlemlerine tabi tutulan malzemelere, yüzey pürüzlülüğü kazandırmanın yanında mukavemetlerinin de iyileştirilerek bir son işlem olarak kullanılmaktadır. Bu işlemlerde kullanılan aşındırıcılar önemli görev görmektedir. Çelik bilyaların kullanılması taşıdıkları enerji transferi ile yüzeyde bir sıkıştırma meydana getirerek malzeme yüzey mukavemetinin artmasına sebep olmaktadır. Çelik bilyalar elek çapına göre belirlenmekte olup SAE J444 standardına göre kategorize edilmektedir. Çeliklerin taşıdığı enerji kinetik enerji hesabına göre belirlenmektedir. (Denklem 6.1)

$$KE = \frac{1}{2}mV^2 \quad 6.1$$

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad 6.2$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 6.3$$

Çalışmada kullanılan çelik bilyalar aynı yoğunluğa sahip olduklarından dolayı bilya çaplarından yola çıkılarak taşıdıkları enerji hesaplanabilir. Denklem 6.2'den yola çıkılarak bilya hacimleri Denklem 6.3'te yazılığında bilyaların kütleleri bulunabilir. Çalışmada kullanılan bilyalardan S330 bilyanın çapı S170 bilyanın çapının iki katıdır. Dolayısıyla S330 bilyaların taşıyacakları enerji S170 bilyaların taşıyacakları enerjinin sekiz katı kadar olacaktır.

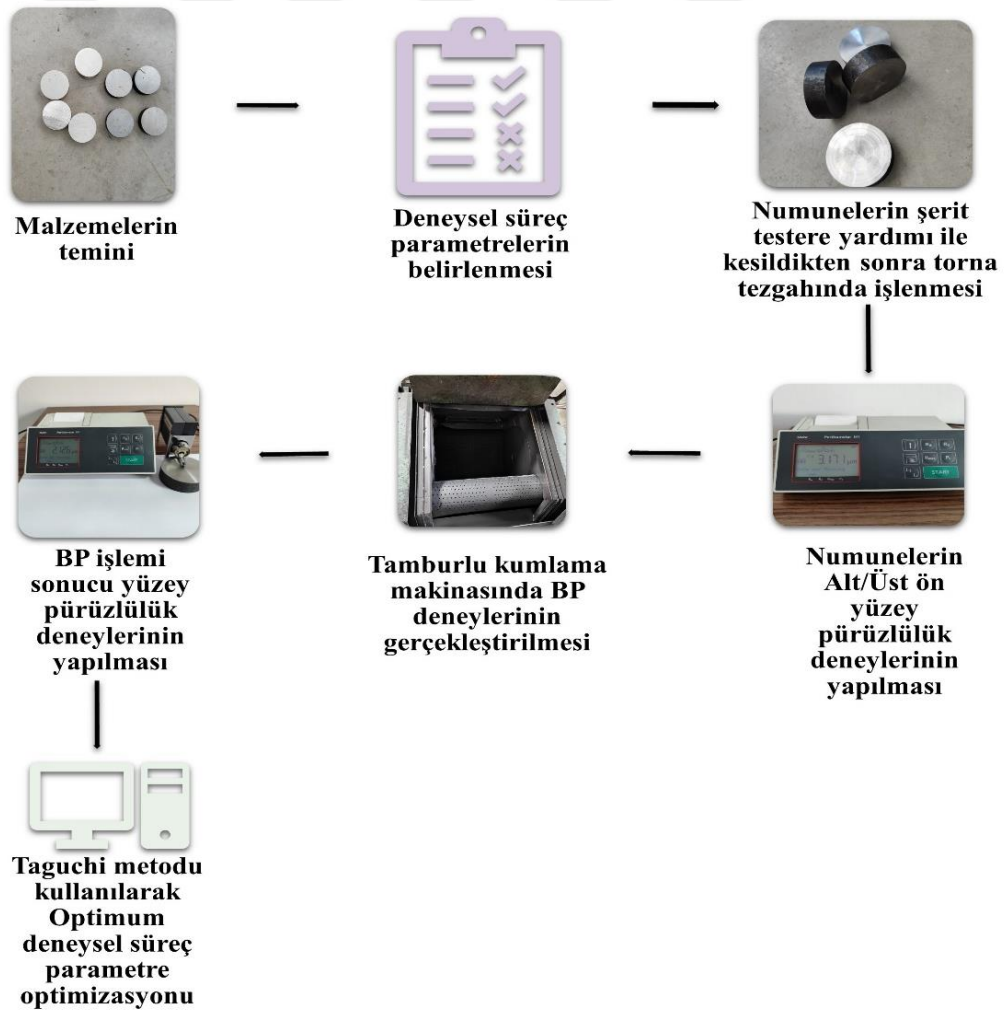


7. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu tez çalışmasında $\varnothing 65 \times 20$ mm boyutlarındaki Al7075 T6 ve AISI4140 numunelerinin tornada işlenmesinden sonra oluşan yüzey pürüzlülüklerinin tamburlu kumlama makinasında iki farklı sürede (30 sn ve 60 sn) ve SAE J444 standardındaki iki farklı çapta çelik bilyaların (S170 ve S330) kullanılması sonucu yüzey pürüzlülük davranışları istatistiki olarak incelenmiştir.

7.1. Deneysel Süreç İş Akış Şeması

Bu tez çalışması, toplamda yedi aşamadan oluşmakta olup, bu aşamalar aşağıda (Şekil 7.1) sıralanmıştır.



Şekil 7.1. Deneysel süreç iş akış şeması

7.2. Taguchi Ortogonal Dizin

Bu çalışmada iki farklı seviyede üç farklı kontrol faktörü kullanılmıştır. Deneylerde kullanılacak kontrol faktörü ve seviyelerinin tespiti literatüre bağlı yapılan ön deneylerle belirlenmiştir. Deney tasarımı kontrol faktörleri ve bunlara ait seviyeleri Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Deney tasarımı kontrol faktörü ve seviyeleri

Sembol	Kontrol Faktörü	Birimi	Seviye 1	Seviye 2
<i>m</i>	Malzeme	---	AISI4140	Al7075
<i>d</i>	Bilya çapı	mm	S170 (Ø0.42)	S330 (Ø0.84)
<i>s</i>	Maruz kalma süresi	Saniye	30	60

Numunelerin her iki yüzeyi (Alt/Üst) aynı işlemlere tabi tutulmuş olup her iki yüzey için ayrı ayrı L_8 ortogonal deney tasarımı, kodlanmış olarak hazırlanmıştır (Tablo 7.2).

Tablo 7.2. Taguchi L_8 ortogonal deney tasarımı

Deney No	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

7.3. Numunelerin Hazırlanması

Hem alt hem de üst yüzeylerin BP işlemi için Ø65x20 boyutlarında dörder adet olmak üzere toplamda sekiz adet AISI4140 çelik ve Al7075 T6 alüminyum alaşımı numuneler kullanılmıştır. Şerit testere kullanılarak kesilen numuneler daha sonra üniversal torna tezgahında numunelerin her iki yüzeyine alın tornalama işlemi uygulanarak 20 mm kalınlığında eş numuneler elde edilmiştir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. a) Numunelerin kesildiği şerit testere tezgâhı
b) Al7075 T6 ve AISI4140 çelik numuneler

AISI4140 çeliği, sertlik değerleri açısından Al7075 alaşımına göre belirgin bir üstünlük göstermektedir. Bu nedenle, T6 ısıt işlemleri vasıtasıyla yaşlandırılmış Al7075 alüminyum alaşımı seçilerek sertlik değerlerinin AISI4140 çeliğine daha yakın bir seviyede ele alınması amaçlanmıştır. Bu tercih, gerçekleştirilecek bilya püskürtme işlemi sırasında her iki malzeme arasında daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edebilmek amacıyla yapılmıştır. Tablo 7.3'te AISI4140 ve Tablo 7.4'te Al7075 T6 malzemelerinin kimyasal bileşimleri yüzde değerler olarak verilmiştir.

Tablo 7.3. AISI4140 malzemesi kimyasal bileşimleri % değerleri (Chander ve ark., 2012)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
İçerik	0.42	0.34	0.69	0.01	0.01	0.8	1.46	0.11

Tablo 7.4. Al7075 T6 malzemesi kimyasal bileşimleri % değerleri (Mohan ve ark., 2016)

Element	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
İçerik	89.66	0.24	1.52	0.21	2.63	0.06	0.07	0.02	5.59

Deneylerde kullanılan T6 ısıt işlemleri vasıtasıyla yaşlandırılmış Al7075 mekanik özellikleri Tablo 7.5.'te verilmiştir.

Tablo 7.5. Al7075 T6 Malzemesi mekanik özellikleri (Mohan ve ark., 2016)

Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama
630 MPa	532 MPa	10.11

AISI4140 çelik malzemesi mekanik özellikleri Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6. AISI4140 malzeme mekanik özellikleri (Chander ve ark., 2012)

Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama
758	558	21.3

6.4. Ön Yüzey Pürüzlülük Testlerinin Yapılması

Torna tezgahında alın tornama işlemi sonucunda numunelerin (Alt/Üst) her bir yüzeyinden 10'ar adet yüzey pürüzlülük değeri alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri Mahr tipi Perthometer M1 yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 7.7'de yüzey pürüzlülük testlerinin yapıldığı cihazın teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 7.7. M1 Mahr yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	150 μ m kadar
Tarama uzunlukları	1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm
Kesme uzunluğu	0.25 mm, 0.80 mm, 2.5 mm
Ölçüm parametreleri	Ra, Rz, Rmax, Rpc

Perthometer M1 cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ön yüzey pürüzlülük testlerinden AISI4140 çelik numuneye ait görsel Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3. AISI4140 çelik malzemesi ön yüzey pürüzlülük deneyi

Yapılan testler numunelerin tornada işleme hızından dolayı yüzey pürüzlülüğünün nispeten daha yüksek olduğu merkezinden dışa doğru $\text{Ø}20\text{--}\text{Ø}40$ mm aralığında yüzey pürüzlülük ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuçların karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla her bir numunenin alt ve üst yüzeylerine aynı işlem parametreleri uygulanmış olup yüzey pürüzlülük değerleri alınmıştır. Tablo 7.8'de tornalama işleminden sonra her bir numunenin alt ve üst yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması verilmiştir.

Tablo 7.8. Numunelerin Üst yüzeylerinin ($Ra_{üst}$) Ön Yüzey pürüzlülük değerleri

Deney No	m	d	s	BP işlemi öncesi ($Ra_{üst}$) μm	BP işlemi öncesi (Ra_{alt}) μm
1	1	1	1	2.270	1.902
2	1	1	2	2.263	2.063
3	1	2	1	2.039	1.660
4	1	2	2	2.898	2.155
5	2	1	1	1.148	1.607
6	2	1	2	1.899	1.605
7	2	2	1	1.089	0.985
8	2	2	2	0.866	1.015

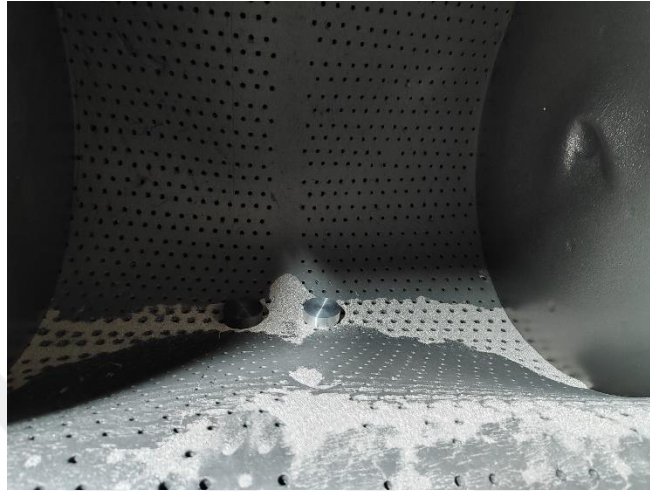
7.5. Bilya Püskürtme İşlemi Deneylerinin Yapılması

Numuneler iki farklı süre (30 sn, 60 sn) ve SAE J444 standardındaki iki farklı bilya çapı (S170, S330) kullanılarak Konya’da Faaliyet gösteren Favori Otomotiv Gıda Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. firması bünyesinde bulunan Lastik Bantlı Tamburlu Kuşlama Makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 7.5 kW gücünde ve dakikada yaklaşık olarak 100 kg püskürtme kapasitesine sahip olan kuşlama makinesinde numunelerin her birinin Alt/Üst yüzeylerine aynı işlem uygulanmış olup Al7075 T6 malzemesi için 8 adet, AISI4140 çelik malzemesi için 8 adet olmak üzere toplamda 16 tane deney gerçekleştirilmiştir. Bilyalı püskürtme deneyleri şekil 7.4’te görülen lastik bantlı tamburlu kuşlama makinasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4. Bilyalı püskürtme deneylerinin yapıldığı kuşlama tezgâhı

Deneyler gerçekleştirilirken tambur sabit bir konumda tutulup numuneler yerleştirilmiş ve nozullardan fırlatılan bilyaların tambur yüzeyine eşit olarak gelecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 7.5'te numunelerin tambur içerisindeki yerleşim düzenleri görülmektedir.



Şekil 7.5. Numunelerin tambur içerisine yerleştirilmesi

Deneylerin yapıldığı lastik bantlı tamburlu kumlama makinasının teknik özellikleri Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.9. Deneylerin yapıldığı kumlama tezgâhı teknik özellikleri

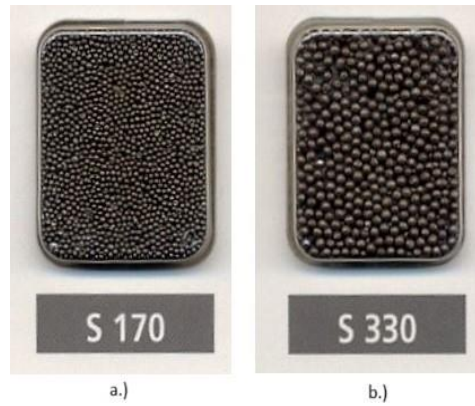
Tambur kapasitesi	300 kg
Tambur boyu	800 mm
Tambur çapı	700 mm
Türbin gücü	7.5 kw
Türbin devri	3000 dev/dk
Türbin çapı	320 mm
Türbin granül akışı	100 kg/dk
Tambur döndürme gücü	0.75 kw
Tambur döndürme devri	1000 dev/dk

Bu çalışmada kullanılan bilyaların mekanik özellikleri Tablo 7.10'de verilmiştir.

Tablo 7.10. Kullanılan bilyaların mekanik özellikleri (Anonim, 2020)

Sembol	Çapı(mm)	Yoğunluk(gr./cm ³)	Sertlik Rockwell (HRc)
S330	0.84	7	40 – 50
S170	0.42	7	40 - 50

Bu tez çalışmasında kullanılan SAE J444 standartlarındaki S170 ve S330 bilyalara ait görsel şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.6. Çalışmada kullanılan çelik bilya türleri (Anonim, 2020)

Çalışmada kullanılan çelik bilyaların kimyasal bileşim yüzdeleri Tablo 7.11’de verilmiştir.

Tablo 7. 11. Çelik bilyaların kimyasal bileşimleri (%) (Anonim, 2020)

C	Mn	Si	S	P
0.10-0.15	1.20-1.50	0.1-0.25	0.035 (max)	0.35 (max)

7.6. Bilya Püskürtme İşlemi Sonrası YüzeY Pürüzlülük Deneylerinin Yapılması

İki farklı süre ve iki farklı bilya çapı kullanılarak yapılan bilya püskürtme işlemi sonrası yüzeY pürüzlülük deneyleri ön yüzeY pürüzlülük testlerinin yapıldığı yüzeYlerde her bir yüzeYde 10 tane olmak üzere yüzeY pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 36° derecelik açılarla 10 adet eşit çizgi çekilerek gerçekleştirilmiş olup ortalamaları alınmıştır. Tablo 7.12’te Numunelerin BP işlemi sonrası alt ve üst yüzeYlerine ait ortalama yüzeY pürüzlülük değerleri verilmiştir.

Tablo 7.12. BP işlemi sonrası alt ve üst yüzeYlerine ait ortalama yüzeY pürüzlülük değerleri

Deney No	m	d	s	BP işlemi sonrası ($Ra_{üst}$) μm	BP işlemi sonrası (Ra_{alt}) μm
1	1	1	1	1.788	1.749
2	1	1	2	1.560	1.435
3	1	2	1	1.445	1.212
4	1	2	2	1.459	1.360
5	2	1	1	2.066	1.992
6	2	1	2	2.270	1.987
7	2	2	1	2.333	2.189
8	2	2	2	1.913	2.153

BP işleminin sonrası AISI4140 ve Al7075 T6 numunelerine ait yüzey pürüzlülük ölçümlerinin alındığı yüzey görüntüleri Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7. BP işleminin sonrası yüzey pürüzlülük ölçümler

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ ANALİZİ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, malzeme cinsi (AISI4140, Al7075 T6), bilya çapı (S330, S170) ve maruz kalma süresi (30 sn, 60 sn) olmak üzere üç faktör ve her bir faktör için iki farklı seviye kullanılarak L_8 ortogonal Taguchi deney tasarımı hazırlanmıştır. Numunelerin hem üst hem de alt yüzeyleri aynı işleme tabi tutulduğu için, yüzeyin etkilerini değerlendirebilmek adına toplamda iki tane ortogonal L_8 Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada en küçük yüzey pürüzlülük değerleri arandığı için Denklem 5.1’de verilen Taguchi yöntemi *en küçük en iyi* denklemi kullanılmıştır. Numunelerin üst yüzeylerinin S/N oranları Tablo 8.1’de verilmiştir. S/N oranlarında S istenilen çıktıyı N ise hata miktarını ifade eder. S/N oranları analizinde değer büyük olması deneydeki olumlu etkiyi göstermektedir. Numunelerin S/N oranları analizleri incelendiğinde 3 numaralı deneyin ($m1d2s1$) en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

Tablo 8.1. Numunelerin üst yüzeylerinin S/N oranları çıktıları

Deney No	m	d	s	Üst Ra_1 (μm)	SNRA1
1	AISI4140	S170	30	1.7877	-5.045892803
2	AISI4140	S170	60	1.5599	-3.861935161
3	AISI4140	S330	30	1.4453	-3.199160054
4	AISI4140	S330	60	1.4586	-3.278724185
5	Al7075	S170	30	2.0656	-6.300924498
6	Al7075	S170	60	2.27	-7.120517144
7	Al7075	S330	30	2.3333	-7.359411621
8	Al7075	S330	60	1.9132	-5.635207444

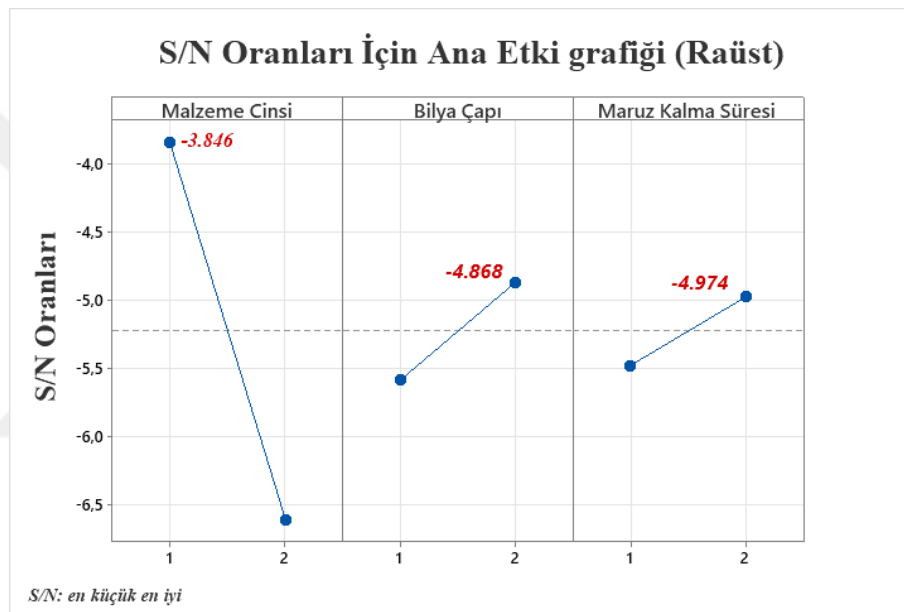
BP işlemi AISI4140 çelik numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ancak Al7075 T6 malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etkiler yarattığı görülmektedir. Bu durumun alüminyum malzeme yoğunluğunun düşük olması, sertliğinin AISI4140 çelik malzemesine oranla daha düşük olması, akma dayanımının düşük olması, püskürtme basıncının yüksek olması gibi parametreler etkili olmuş olabilir. Bu çalışmada değerlendirilen yüzey pürüzlülük değerleri tornalama işleminden sonra oluşan nispeten daha küçük yüzey pürüzlülük değerleri ele alınmıştır.

BP işlemine tabi tutulan malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri malzeme sertlik ve akma mukavemetlerine bağlı olmakla birlikte BP işlemi parametrelerine göre şekillenmektedir (Uzan ve ark., 2018; Omari ve ark., 2019; Pathak ve Dodkar, 2020).

Yapılan bu çalışmada S330 bilyaların yüzey pürüzlülüğünü düşürme etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Daha küçük aşındırıcı boyutları, bilya püskürtme işlemi sırasında yüzeyde daha küçük çukurlar meydana getirme eğilimindedir, bu da birim alan

başına çukur yoğunluğunun artmasına yol açar. Bu bağlamda, daha büyük aşındırıcılar tarafından oluşturulan yüzeyler, daha düşük pürüzlülük değerlerine sahip olup, daha homojen ve düzgün bir yapıyı teşkil eder (Minhas ve ark., 2021). Ahmed ve ark. (2015) AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde yaptıkları çalışmada bilya boyutunun artırılması, yüzey pürüzlülüğünün azalmasına ve korozyon direncinin artmasına neden olmuştur.

Kontrol faktörlerinin grafik şeklindeki ana etki oranları Şekil 8.1’de verilmiştir. Grafikten yola çıkarak kontrol faktörlerinden etki değerlerinin yüksek olan parametrelerin malzeme için AISI4140 çeliği, bilya çapı için S330, maruz kalma süresi için ise 60 saniye (*m1d2s2*) olduğu görülmektedir.



Şekil 8.1. BP işlemi sonucu numunelerin üst yüzeyine ait Ra için S/N oranlarının tepki grafikleri

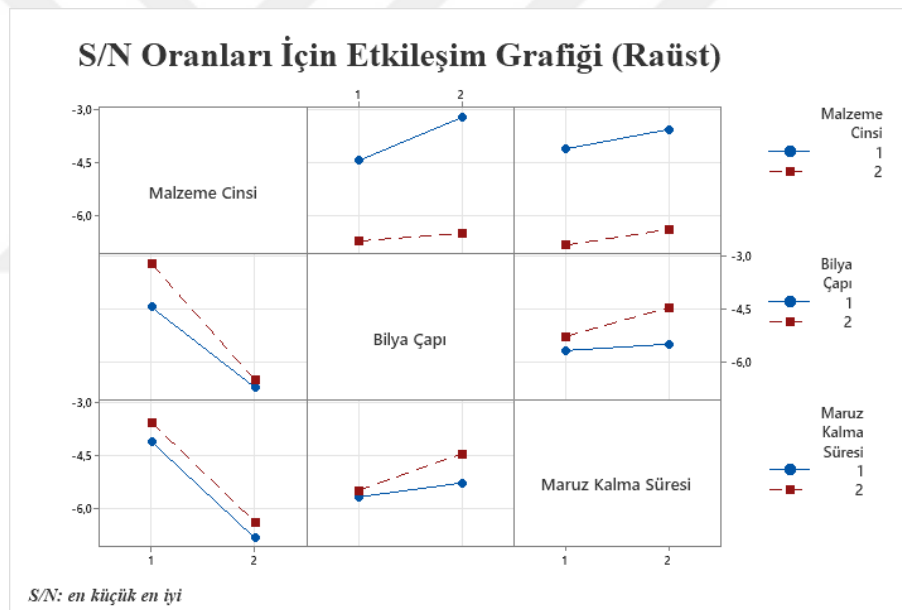
Tablo 8.2’de S/N oranları cevap tablosunda her bir faktörün seviyelere göre etki değerleri hesaplanmıştır. Delta değerleri kontrol faktörleri seviyelerinin etki değerlerini vermektedir. Rank ise kontrol faktörleri seviyelerinin etki sıralamasını vermektedir. Dolayısıyla tablo incelendiğinde numunelerin üst yüzeyleri için en etkili kontrol faktörü seviyelerinin *m1d2s2* olduğu görülmektedir.

Tablo 8.2. Ra_(üst) için S/N tepkisi

Seviye	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
1	-3.846*	-5.582	-5.476
2	-6.604	-4.868*	-4.974*
Delta	2.758	0.714	0.502
Rank	1	2	3

*Kalın yazılı ifadeler en yüksek etkiye sahip faktör seviyelerini gösterir.

Şekil 8.2’de BP işlemi kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimi verilmiştir. Bu parametrelerin birbirleri ile etkileşimli olduğunu ifade edebilmemiz için faktörlerin paralellikten uzak olması gerekmektedir. Şekil incelendiğinde malzeme faktörünün diğer faktörler ile etkileşiminin daha fazla olduğu görülmektedir. Birinci sütun incelendiğinde malzeme faktörü artarken maruz kalma süresinin değişmediğini ve bilya çapı etkileşiminin arttığı görülmektedir. İkinci sütunda bilya çapı artarken AISI4140 çelik malzeme etkileşiminin arttığı, Al7075 T6 malzeme etkileşiminin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. Yine ikinci satırda bilya çapı artarken maruz kalma süresi faktörünün ikinci seviyesi (60 sn) etkileşiminin daha fazla olduğu görülmektedir. Üçüncü satır incelendiğinde maruz kalma seviyesi artarken AISI4140 çelik etkileşiminin etkileşiminin daha fazla olduğu, yine maruz kalma süresi artarken S330 bilya çapı etkileşiminin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 8.2. BP işlemi sonucu kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimi

Varyans analizi (ANOVA) faktör etkililiğini belirlemek için kullanılır. Yapılan çalışmada her bir faktöre ait seviye iki olduğu için serbestlik dereceleri bir olarak hesaplanmıştır. Toplam kareler sütununda başka bir faktör etkisi olmadan her bir faktörün S/N oranı üzerindeki etkileri verilmiştir. Düzeltilmiş ortalama kareler sütununda ise her bir faktörün etki değerlerinin serbestlik derecesine bölünmesi ile elde edilir. F değeri her bir faktörün hata varyans değerine bölünmesiyle elde edilir. F değerindeki faktörün büyük çıkması, faktörün varyans üzerindeki etkisinin fazla olduğu anlamını taşır.

Tablo 8.3'te numunelerin üst yüzey pürüzlülük değerlerine ait varyans analiz F testi sonuçlarına göre malzeme faktörü 8.933 ile en yüksek etkiye sahipken bunu 0.563 ile bilya çapı, 0.278 ile maruz kalma süresi, 0.277 ile $m*d$ faktörü, 0.113 ile $d*s$ faktörü ve 0.003 ile $m*s$ faktörü gelmektedir.

ANOVA tablosu içerisinde yer alan P değeri, kontrol faktörlerinin sonuçlara anlamlı bir etkisinin olup olmadığını test eder (Asiltürk ve ark., 2016). Esasen F testini doğrulayan bir göstergedir denebilir. P değerinin 0.05'ten küçük olması durumu sonuca anlamlı bir etkisinin olduğu anlamını taşımaktadır. P değerinin 0.05'ten büyük olması, bu etkenin sonuca anlamlı bir etkisi olmadığını gösterir. R^2 (Coefficient of determination) faktörlerin birbirleri ile anlamlılık değerini bir bütün olarak ifade eder. Dolayısıyla P değerinin büyük çıkması R^2 değerinin düşük çıkacağı anlamını taşımamaktadır. R^2 değerinin %90'dan yüksek çıkması halinde çalışmanın geçerli olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosunda her faktörün kendi aralarında etkileri incelendiğinde en yüksek etkiye sahip faktörlerin sırası ile m için %78.98, d için %5.30, s için %2.62, $m*d$ için %2.60, $m*s$ için %0.03 ve $d*s$ için %1.06 olduğu belirlenmiştir.

0 ile 1 aralığında bir değere sahip ve 1'e yakın değerin en iyi sonuçları verdiği Taguchi analizinde anlamlılık değeri (R^2) %90.59 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8.3. Numunelerin üst yüzeylerine ait $Ra1$ için varyans analizi

Kaynak	SD	Seq SS	Adj MS	F	P	PCR (%)	R^2 (%)
m	1	15.2086	15.2086	8.393	0.212	78.98	90.59
d	1	1.0201	1.0201	0.563	0.59	5.30	
s	1	0.5045	0.5045	0.278	0.691	2.62	
$m*d$	1	0.5016	0.5016	0.277	0.692	2.60	
$m*s$	1	0.005	0.005	0.003	0.967	0.03	
$d*s$	1	0.2049	0.2049	0.113	0.793	1.06	
Hata	1	1.812	1.812				
Toplam	7	19.2566					

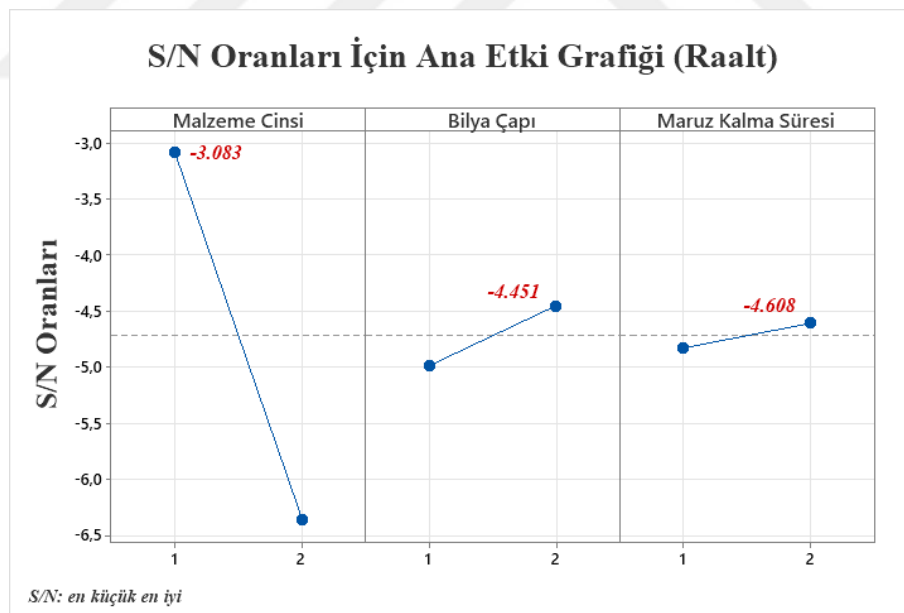
SD: serbestlik derecesi. Seq SS: Kareler toplamı. Adj MS: kareler ortalaması. F: F-test değeri. P: Hata varyans değeri. PCR: Etkinlik yüzdesi oranı

Numunelerin yüzeysel etkilerinin karşılaştırılmalı olarak incelenebilmesi açısından her iki yüzey aynı deneysel parametrelere tabi tutulmuştur. Tablo 8.4'te Numunelerin alt yüzeylerine ait S/N oranları verilmiştir. Numunelerin BP işlemi sonucu S/N oranları incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri 3 numaralı deneyde (AISI4140, S330, 30 sn) tespit edilmiştir.

Tablo 8.4. Numunelerin alt yüzeylerinin S/N oranları çıktıları

Deney No	m	d	s	Alt $Ra_1(\mu m)$	SNRA2
1	AISI4140	S170	30	1.7489	-4.8553
2	AISI4140	S170	60	1.4349	-3.136433
3	AISI4140	S330	30	1.212	-1.670052
4	AISI4140	S330	60	1.3601	-2.671417
5	A17075	S170	30	1.9919	-5.985351
6	A17075	S170	60	1.9867	-5.962646
7	A17075	S330	30	2.1885	-6.802931
8	A17075	S330	60	2.1528	-6.660074

Bilya püskürtme işlemi sonucu elde edilen numunelerin alt yüzeylerine ait *en küçük en iyi* fonksiyonu Taghuci metodu kullanılarak elde edilen ortalama S/N oranlarının grafikleştirilmiş biçimi Şekil 8.3'te verilmiştir. Şekilde yer alan kontrol faktörleri seviyelerinden en yüksek noktalar yüzey pürüzlülüğü üzerinde en iyi etkiyi gösterir. Grafikten yola çıkarak AISI4140 çelik, S330 bilya çapı ve maruz kalma süresi için ise 60 saniye ($m1d2s2$) en iyi sonucu vermiştir. Yine grafikteki eğimden yola çıkarak malzeme etkisinin bilya çapı ve maruz kalma süresine göre etkisinin çok büyük olduğu görülmektedir.

**Şekil 8. 3.** Numunelerin Alt yüzeyine ait $Ra_{(alt)}$ için S/N oranlarının tepki grafikleri

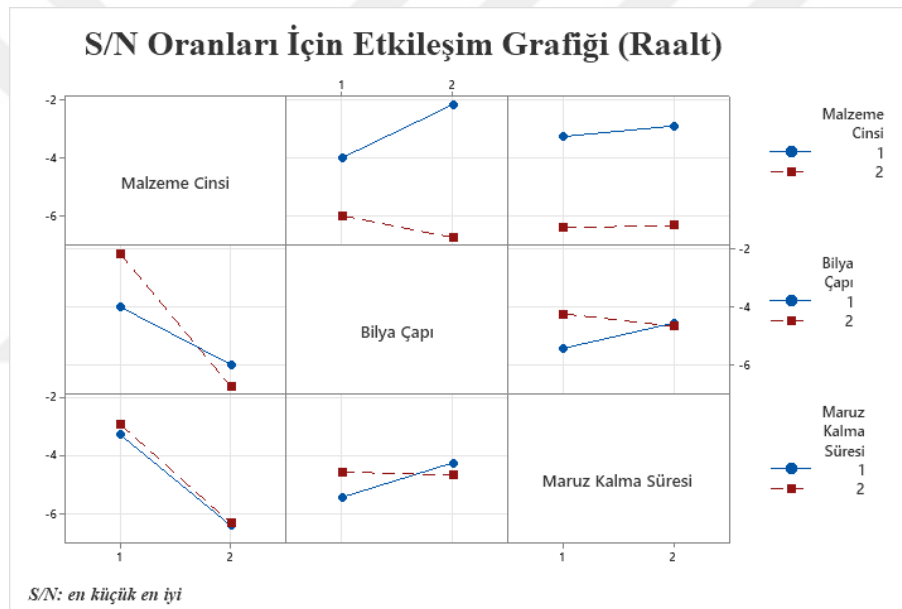
Tablo 8.5'te numunelerin alt yüzeylerine ait S/N tepki oranları incelendiğinde etkili kontrol faktörü seviyelerinin numunelerin üst yüzeylerinde olduğu gibi $m1d2s2$ olduğu görülmektedir.

Tablo 8.5. Alt yüzeylere ait Ra için S/N oranı cevapları

Seviye	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
1	-3.083*	-4.985	-4.828
2	-6.353	-4.451*	-4.608*
Delta	3.269	0.534	0.221
Rank	1	2	3

*Kalın yazılı ifadeler en yüksek etkiye sahip faktörler seviyelerini gösterir.

BP işlemi sonucu numunelerin alt yüzeylerine ait kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimi Şekil 8.4'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde, üst yüzeylerde gözlemlendiği gibi malzeme faktörüne bağlı etkileşim oranı daha yüksek olduğu görülmektedir. Numunelerin alt yüzeylerine ait etkileşimli veriler üst yüzeyler ile karşılaştırıldığında faktörlerin etkileşim oranlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

**Şekil 8.4.** BP işlemi parametrelerinin birbirleri ile etkileşim grafiği

Tablo 8.6'da Taghuci metodu varyans analizinde en yüksek etkiye sahip faktörün numunelerin üst yüzeylerinde gözlemlendiği gibi numunelerin alt yüzeylerinde de malzeme cinsi olduğu belirlenmiştir. Her bir faktörün *F* değerine bakıldığında *m* faktörünün 21.2 ile en yüksek etkiye sahip olduğu, ikinci etkili faktörün 3.31 ile *m*d* olduğu, *d*s*'nin 0.84, *d*'nin 0.57, *s*'nin 0.51 ve *m*s*'nin 0.04 ile çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Tablo incelendiğinde yüzdelik etki değerlerinin tek başına ve kendi aralarındaki etkileri *m* için %78.39, *d* için %2.09, *s* için %0.04, *m*d* için %12.23, *m*s* için %0.14 ve *d*s* için %3.1 olduğu hesaplanmıştır. Yapılan Taghuci metodu analizinde numunelerin alt yüzeyleri için anlamlılık değeri %96.30 olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 8.6. Numunelerin alt yüzeylerine ait S/N oranları

Kaynak	SD	Seq SS	Adj SS	F	P	PCR (%)	R^2 (%)
m	1	21.3786	21.3786	21.2	0.136	78.39	
d	1	0.5699	0.5699	0.57	0.59	2.09	
s	1	0.0975	0.0975	0.1	0.808	0.04	
$m*d$	1	3.335	3.335	3.31	0.32	12.23	
$m*s$	1	0.0381	0.0381	0.04	0.878	0.14	96.3
$d*s$	1	0.8451	0.8451	0.84	0.528	3.1	
Hata	1	1.0085	1.0085				
Toplam	7	27.2726					

Kısaltmalar için Tablo 8.3'e bakınız

Aynı işlemlere tabi tutulan numunelerin alt ve üst yüzeylerine ait deney sonuçları ve Taghuci yöntemine dayalı varyans analiz sonuçları incelendiğinde her iki deney tasarımı için de belirleyici ana faktörün malzeme cinsi olduğu daha sonra bilya çapı ve maruz kalma sürelerinin geldiği belirlenmiştir. Her iki deney tasarımının birbirlerine yakın sonuçlar vermesi deneysel sürecin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği anlamını taşımaktadır.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Elde edilen analiz sonuçlarına göre R^2 üst yüzeyler için % 90.59 alt yüzeyler için ise % 96.3 olarak bulunmuştur.

Taguchi yöntemi en küçük en iyi objektif fonksiyonuna dayalı optimizasyon analizinden elde edilen bulgulara göre, en büyük etkiye sahip parametrenin malzeme cinsi olduğu, bunu bilya çapı ve maruz kalma süresinin izlediği tespit edilmiştir.

Sertlik ve akma mukavemetleri belirgin bir şekilde birbirinden farklı olan AI7075 T6 malzemesi ve AISI4140 çelik malzemelerinin bilya püskürtme neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde malzeme faktörünün üst yüzeyler için %78.98 alt yüzeyler için %78.39 gibi bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan ANOVA analizine bağlı numunelerin üst yüzeylerine ait kontrol faktörlerinin birbirleri ile etkileşimli geçerlilik oranları sırası ile m için %78.98, d için %5.30, s için %2.62, $m*d$ için %2.60, $m*s$ için %0.03 ve $d*s$ için %1.06 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan ANOVA analizine bağlı numunelerin alt yüzeylerine ait kontrol faktörlerinin etkileşimli geçerlilik sırası ile m için %78.39, d için %2.09, s için %0.04, $m*d$ için %12.23, $m*s$ için %0.14 ve $d*s$ için %3.1 olarak hesaplanmıştır.

Numunelerin her iki yüzeylerine ait yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde yapılan BP işlemi neticesinde en iyi etkiyi üst yüzeyler için $1.4453 \mu\text{m}$, alt yüzeyler için $1.212 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülük değerine sahip olan $m1d2s1$ deney numunelerinde elde edilmiştir.

AISI4140 çelik numunelerde gerçekleştirilen bilyalı püskürtme (BP) işlemi sonucu bütün numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

AI7075 malzemesi için yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde BP işleminde kullanılan çelik bilya cinsi ve bilya püskürtme hızının olumsuz etkiler ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir.

BP işleminde 30 sn maruz kalma süresine kadar yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği 30 sn'den sonra ise yüzey pürüzlülüğünün sabit kaldığı gözlemlenmiştir.

9.2. Öneriler

BP işleminin kontrol faktörleri ve seviyeleri değiştirilerek daha fazla çalışma yapılabilir.

BP işleminin sonlu elemanlar ve muadili olan başka program aracılığı ile simüle edilerek malzeme yüzey pürüzlülük değerleri tahmin edilebilir.

Her malzemeye göre değişkenlik gösteren çarpışma katsayısından yola çıkılarak yapılacak işlemlerin yüzey pürüzlülük değerleri tahmin edilebilir.

BP işlemleri için belirlenecek parametrelerde malzeme cinsi ve malzemenin mekanik özellikleri (sertlik, akma mukavemeti vb.) dikkate alınarak seçilebilir.

Proseseye yönelik ön deneylerin gerçekleştirilmesi, optimum değerlerin elde edilmesi bakımından hem ekonomik hem de zaman açısından önemli bir katkı sağlayabilir.

BP işleminin kapsamında işlenecek malzemelerin mukavemeti arttıkça, yüksek püskürtme basınçlarının uygulanması, mukavemetin düşük olduğu durumlarda ise daha düşük püskürtme basınçlarının seçilmesi, işlem verimliliği açısından daha uygun olabilir.

Daha sonraki çalışmalarda işlenecek olan iş parçalarının özgül ağırlığı ve her malzemenin kendisine has olan çarpışma katsayısı dikkate alınarak parametre seçimi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A. A., Mhaede, M., Basha, M., Wollmann, M. ve Wagner, L., 2015, The effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 280, 347-358.
- Alajmi, A. F., 2021, Characterization and modeling of the leading edge erosion of wind turbine blades due to sand particles impingement, University of Washington, p.
- Alao, A.-R., 2024, Optimization of surface roughness, phase transformation and shear bond strength in sandblasting process of YTZP using statistical machine learning, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 150, 106245.
- Almen, J., 1943, Shot blasting to increase fatigue resistance, *SAE Transactions*, 248-268.
- Anonim, 2020, Çelik Granül Sanayii A.Ş., www.celikgranul.com.tr, https://www.celikgranul.com.tr/site_files/pdf/ceLIK-granul-katalog.pdf: [12 Temmuz 2024].
- Anonim, 2024a, Ürünler, www.endumak.com.tr, <https://www.endumak.com.tr/urunler>: [Ziyaret Tarihi: 30 Mayıs 2024].
- Anonim, 2024b, Kuşlama Makinesi Türleri, www.cetingil.com.tr, <https://www.cetingil.com.tr/tr/blog/kuşlama-makinesi-turleri-63.html>: [Ziyaret Tarihi: 10 Haziran 2024].
- Anonim, 2024c, Ürünler, www.siliskum.com.tr, <https://www.siliskum.com.tr/kategori.asp?katid=17>: [25 Haziran 2024].
- Anonymous, Products, www.airblast-abrasives.com, <https://www.airblast-abrasives.com/products/non-metallic-abrasives/ceramic-beads>: [26 Haziran 2024].
- Anonymous, 2024a, Shot blasting abrasive media, www.winoa.com, <https://www.winoa.com/abrasive-media-shot-blasting/>: [25 Haziran 2024].
- Anonymous, 2024b, Shot Blasting Machines Overview, sintoamerica.com, https://sintoamerica.com/product_category/surface-treatment/shot-blasting-overview/: [5 Haziran 2024].
- Antony, J., Perry, D., Wang, C. ve Kumar, M., 2006, An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process, *Assembly automation*, 26 (1), 18-24.
- Aparicio, C., Gil, F. J., Fonseca, C., Barbosa, M. ve Planell, J. A., 2003, Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications, *Biomaterials*, 24 (2), 263-273.
- Arifvianto, B., Mahardika, M. ve Salim, U. A., 2020, Comparison of Surface Characteristics of Medical-grade 316L Stainless Steel Processed by Sandblasting, Slag Ballblasting and Shot-blasting Tre, *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 52 (1).
- Asiltürk, I. ve Neşeli, S., 2012, Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis, *Measurement*, 45 (4), 785-794.
- Asiltürk, I., Neşeli, S. ve Ince, M. A., 2016, Optimisation of parameters affecting surface roughness of Co28Cr6Mo medical material during CNC lathe machining by using the Taguchi and RSM methods, *Measurement*, 78, 120-128.

- Azarhoushang, B., Marinescu, I. D., Rowe, W. B., Dimitrov, B. ve Ohmori, H., 2021, Tribology and fundamentals of abrasive machining processes, William Andrew, p.
- Bagheri, S. ve Guagliano, M., 2009, Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys, *Surface Engineering*, 25 (1), 3-14.
- Bandaru, R. K., 2004, Particle breakage in sand blasting due to impact on ductile materials, West Virginia University, p.
- Baran, R. ve Neşeli, S., 2024, TAMBURLU KUMLAMA MAKİNASINDA BİLYA PÜSKÜRTME SÜRESİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ, *3rd International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 535-540.
- Bechikh, A., Klinkova, O., Maalej, Y., Tawfiq, I. ve Nasri, R., 2020, Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102, 102653.
- Bennett, J. M., 1992, Recent developments in surface roughness characterization, *Measurement Science and Technology*, 3 (12), 1119.
- Binali, R., 2017, Sıcak iş takım çeliğinin (TOOLOX 44) işlenebilirliğinin incelenmesi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Binali, R., Yıldız, S. ve Neşeli, S., 2022, Investigation of power consumption in the machining of S960QL steel by finite elements method, *European Journal of Technique (EJT)*, 12 (1), 43-48.
- Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M. ve Sağlam, H., 2023, Machinability investigations based on tool wear, surface roughness, cutting temperature, chip morphology and material removal rate during dry and MQL-assisted milling of Nimax mold steel, *Lubricants*, 11 (3), 101.
- Binali, R., 2024, Experimental and machine learning comparison for measurement the machinability of nickel based alloy in pursuit of sustainability, *Measurement*, 236, 115142.
- Binali, R., Yıldız, S. ve Neşeli, S., 2024, Finite element analysis and statistical investigation of S960ql structure steel machinability with milling method, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46 (5), 260.
- Brezinová, J., Guzanová, A. ve Draganovská, D., 2015, Abrasive Blast Cleaning and Its Application, *Foundations of Materials Science and Engineering*, 83, I.
- Byrne, G. D., O'Neill, L., Twomey, B. ve Dowling, D. P., 2013, Comparison between shot peening and abrasive blasting processes as deposition methods for hydroxyapatite coatings onto a titanium alloy, *Surface and Coatings Technology*, 216, 224-231.
- Chander, G. S., Reddy, G. M. ve Rao, A. V., 2012, Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 19 (10), 64-73.
- de, A. G. f. t. O. m. h. w. a. c. i. a., 2014, Drum Blasting Machines Produce a Better Surface Quality: Blasting Processes for Mass-Produced Components, *IST International Surface Technology*, 7 (3), 52-53.
- Demir, H., Ulas, H. ve Binali, R., 2018, Investigation of the effects on surface roughness and tool wear in the toolox44 material, *Technol. Appl. Sci*, 13, 19-28.
- Dobes, J., Leal, J. E. S., Profeta, J., de Sousa, M. M., Neto, F. P. L., Piratelli-Filho, A. ve Arencibia, R. V., 2017, Effect of mechanical vibration on Ra, Rq, Rz, and Rt

- roughness parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 393-406.
- Durman, R., 1983, Observations on the use of hard-metal castings in the shot-blasting industry, *Journal of mechanical working technology*, 8 (2-3), 217-223.
- Ebrahimzadeh, P., Martínez, L. B. P., Pariente, I. F. ve Varela, F. J. B., 2024, Optimization of shot-peening parameters for steel AISI 316L via response surface methodology (RSM): introducing two novel mechanical aspects, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132 (1), 647-667.
- Fedoryszyn, A. ve Zyzak, P., 2010, 1. Characteristics of the shot blasting and shot peening processes, *ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS*, 55 (3).
- Finger, C., Stiesch, M., Eisenburger, M., Breidenstein, B., Busemann, S. ve Greuling, A., 2020, Effect of sandblasting on the surface roughness and residual stress of 3Y-TZP (zirconia), *SN Applied Sciences*, 2, 1-8.
- Guo, C. Y., Matinlinna, J. P., Tsoi, J. K.-H. ve Hong Tang, A. T., 2019, Residual contaminations of silicon-based glass, alumina and aluminum grits on a titanium surface after sandblasting, *Silicon*, 11, 2313-2320.
- Han, X., 2021, Microstructures, Compressive Residual Stress, and Tribological Performance of Heat-Treated Shot Peened AISI 5160 Steel, *Oakland University*.
- Hansel, D., 2000, Abrasive blasting systems, *Metal Finishing*, 98 (7), 23-37.
- Haq, A. N., Marimuthu, P. ve Jeyapaul, R., 2008, Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 250-255.
- Heaton, R. B., 1989, Shot peening, *Met. Finish.*, 87 (7), 25-26.
- Jamaluddin, H., Ghani, J. A., Deros, B. M., Ab Rahman, M. N. ve Ramli, R., 2016, Quality improvement using Taguchi method in shot blasting process, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10 (2), 2200-2213.
- Kadivar, M., Tormey, D. ve McGranaghan, G., 2021, A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories, *International Journal of Thermofluids*, 10, 100077.
- Karna, S. K. ve Sahai, R., 2012, An overview on Taguchi method, *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1 (1), 1-7.
- Kawagoishi, N., Nagano, T. ve Kobayashi, Y., 2013, Humid-Sensitivity of Fatigue Strength of Maraging Steel and Its Improvement by Shot Peening, *Proceedings of Shot Peening Performance*, 58-61.
- Kosmač, T., Oblak, C., Jevnikar, P., Funduk, N. ve Marion, L., 1999, The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic, *Dental materials*, 15 (6), 426-433.
- Kumar, H., Singh, S. ve Kumar, P., 2013, Modified shot peening processes—A review, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 5 (1), 12-19.
- Kuntoğlu, M. ve Sağlam, H., 2019, Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning, *Measurement*, 140, 427-436.
- Launhardt, M., Wörz, A., Loderer, A., Laumer, T., Drummer, D., Hausotte, T. ve Schmidt, M., 2016, Detecting surface roughness on SLS parts with various measuring techniques, *Polymer Testing*, 53, 217-226.

- Li, J., Du, A., Fan, Y., Zhao, X., Ma, R. ve Wu, J., 2019, Effect of shot-blasting pretreatment on microstructures of hot-dip galvanized coating, *Surface and Coatings Technology*, 364, 218-224.
- Liu, C., Wang, B., Lu, P., Xiang, Q. ve Jin, Q., 2024, Improving the wettability of oxide layers to enhance the bonding strength of shot-blasting steel substrates by using simple resin pre-coating method, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 131, 103661.
- Maleki, E., Unal, O. ve Reza Kashyzadeh, K., 2019, Efficiency analysis of shot peening parameters on variations of hardness, grain size and residual stress via Taguchi approach, *Metals and Materials International*, 25, 1436-1447.
- Malkin, S. ve Guo, C., 2008, Grinding technology: theory and application of machining with abrasives, Industrial Press Inc., p.
- Martín, V., Vázquez, J., Navarro, C. ve Domínguez, J., 2020, Effect of shot peening residual stresses and surface roughness on fretting fatigue strength of Al 7075-T651, *Tribology International*, 142, 106004.
- Minhas, N., Thakur, A., Mehlwal, S., Verma, R., Sharma, V. S. ve Sharma, V., 2021, Multi-variable optimization of the shot blasting of additively manufactured AlSi10Mg plates for surface roughness using response surface methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 11671-11685.
- Miturska-Barańska, I., Rudawska, A. ve Doluk, E., 2021, The influence of sandblasting process parameters of aerospace aluminium alloy sheets on adhesive joints strength, *Materials*, 14 (21), 6626.
- Mohamed, A.-M. O., Farhat, Z., Warkentin, A. ve Gillis, J., 2020, Effect of a moving automated shot peening and peening parameters on surface integrity of Low carbon steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 277, 116399.
- Mohammadi, Z., Ziaei-Moayyed, A. ve Mesgar, A. S.-M., 2007, Grit blasting of Ti-6Al-4V alloy: Optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings, *Journal of Materials Processing Technology*, 194 (1-3), 15-23.
- Mohan, K., Suresh, J., Ramu, P. ve Jayaganthan, R., 2016, Microstructure and mechanical behavior of Al 7075-T6 subjected to shallow cryogenic treatment, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 2185-2194.
- Naidu, N. R. ve Raman, S. G. S., 2005, Effect of shot blasting on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6061, *International Journal of Fatigue*, 27 (3), 323-331.
- Nam, Y.-S., Jeon, U., Yoon, H.-K., Shin, B.-C. ve Byun, J.-H., 2016, Use of response surface methodology for shot peening process optimization of an aircraft structural part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 2967-2981.
- Narkhede, R., Jadhav, G. ve Rane, J., Design and Development of Portable Blasting Machine.
- Neşeli, S., Asiltürk, İ. ve Celik, L., 2012, Determining the optimum process parameter for grinding operations using robust process, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26, 3587-3595.
- Ngalula, L. T., 2020, Characterization of Locally Produced Abrasives and Their Influence on Grade 304L Stainless Steel, University of Johannesburg (South Africa), p.
- Normandin, K. C. ve Slaton, D., 2006, Cleaning techniques, *Marble, stone conservation/principles and practice*. Donhead Publishing Ltd, United Kingdom, 127-157.

- Olugbade, T. O. ve Lu, J., 2020, Literature review on the mechanical properties of materials after surface mechanical attrition treatment (SMAT), *Nano Materials Science*, 2 (1), 3-31.
- Omari, M. A., Mousa, H. M., AL-Oqla, F. M. ve Aljarrah, M., 2019, Enhancing the surface hardness and roughness of engine blades using the shot peening process, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26, 999-1004.
- PATEL, P. A., 2012, NEW DEVELOPMENT IN SHOT BLASTING MACHINE, www.pshotblast.com, <https://www.pshotblast.com/new-development-in-shot-blasting-machines-page-1.php>: [15 Haziran 2024].
- Pathak, C. ve Dodkar, P., 2020, Effect of shot blasting and shot peening parameters on residual stresses induced in connecting rod, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73 (3), 571-576.
- Petit-Renaud, F., 2003, Optimization of the shot peening parameters, *Shot peening*, 119-129.
- Poon, C. Y. ve Bhushan, B., 1995, Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler, *Wear*, 190 (1), 76-88.
- Praveen, M., Murthy, N. V. ve Krishna, N. N., 2023, Surface cleaning of IS-2062 E350 grade steel plates by shot blasting method, *Materials Today: Proceedings*.
- Pritima, D., Dhinakaran, V., Stalin, B., Ravichandran, M., Balasubramanian, M. ve Chairman, C. A., 2020, Surface roughness prediction and parametric optimization of shot blasting of Al7068 using RSM, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012100.
- Rao, C. M., Venkatasubbaiah, K. ve Rao, K. J., 2016, Experimental investigation of surface roughness characteristics Ra, Rq and Rz, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 9 (7), 373-388.
- Reddy, P. S., Kumar, P. R., Prasad, D., Rani, B. S., Gupta, C. L. N., Das, A. D. ve Subbiah, R., 2023, Effect of parameters and surface analysis on eglin steel by shot blasting method, *Materials Today: Proceedings*, 72, 2833-2836.
- Rodriguez, E., Flores, M., Pérez, A., Mercado-Solis, R., González, R., Rodriguez, J. ve Valtierra, S., 2009, Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels, *Wear*, 267 (11), 2109-2115.
- Rosentritt, M., Schneider-Feyrer, S. ve Kurzendorfer, L., 2024, Comparison of surface roughness parameters Ra/Sa and Rz/Sz with different measuring devices, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 150, 106349.
- Rudawska, A., 2023, Mechanical Surface Treatment of Adherends for Adhesive Bonding, *Progress in Adhesion and Adhesives*, 7, 113-169.
- Safari, A. ve Farahani, M., 2018, Comparison of the Effects of Shot Blasting and Sandblasting Processes on the Strength of the Aluminum Adhesive Bonded Joints, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50 (5), 1015-1022.
- Slătineanu, L., Potârniche, Ş., Coteaţă, M., Grigoraş, I., Gherman, L. ve Negoescu, F., 2011, Surface roughness at aluminium parts sand blasting, *Proceedings in Manufacturing Systems*, 6 (2), 69-74.
- Stefanescu, D., 2017, Cleaning and Coating of Cast Irons.
- Unal, O., 2016, Optimization of shot peening parameters by response surface methodology, *Surface and Coatings Technology*, 305, 99-109.
- Uzan, N. E., Ramati, S., Shneck, R., Frage, N. ve Yeheskel, O., 2018, On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM), *Additive Manufacturing*, 21, 458-464.

- Wang, C., Li, W., Jiang, J., Chao, X., Zeng, W. ve Yang, J., 2021, A new methodology to establish the relationship between equivalent shot velocity and air pressure by surface roughness for shot peening, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2233-2247.
- Wang, C. ve Kim, T., 2024, Optimization of parameters for the best shot peening effect based on surface response and neural network model, *Materials Research Express*, 11 (1), 016509.
- Wang, X., Wang, Z., Wu, G., Gan, J., Yang, Y., Huang, H., He, J. ve Zhong, H., 2019, Combining the finite element method and response surface methodology for optimization of shot peening parameters, *International Journal of Fatigue*, 129, 105231.
- Wrona, R., Zyzak, P., Ziólkowski, E. ve Brzeziński, M., 2012, Methodology of testing shot blasting machines in industrial conditions, *Archives of Foundry Engineering*, 12 (2), 97-104.
- Yang, F., Liu, Y. ve Gao, Y., 2019, Numerical simulation of derusting treatment of steel parts by shot blast, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 120 (1), 157-175.
- Zulkarnain, I., Mohamad Kassim, N. A., Syakir, M., Abdul Rahman, A., Md Yusuff, M. S., Mohd Yusop, R. ve Keat, N. O., 2021, Sustainability-based characteristics of abrasives in blasting industry, *Sustainability*, 13 (15), 8130.