

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT PROGRAMI**

**AISI 316L PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN DELİNMESİNDE
ÇOKLU İŞLENEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Gülşah BOZKURT

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Elif MALYER

MANİSA – 2025

**GÜLŞAH
BOZKURT**

**AIŞI 316L PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN DELİNMEİNDE ÇOKLU
İŞLENİBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği/ Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Gülşah BOZKURT



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Gülşah BOZKURT

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Elif MALYER

AISI 316L paslanmaz çeliği, özellikle havacılık, sağlık, biyomedikal cihazlar ve gıda işleme gibi sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, düşük işlenebilirlik özellikleri nedeniyle kesme işlemleri sırasında zorluklar yaşanmakta ve bu da düşük kaliteli delik yüzeylerine yol açmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, ortopedik implant sektöründe de yaygın olarak kullanılan bu çelik malzeme üzerine delik delme işlemi öncesinde farklı ezerek parlatma işlemleri uygulanarak artan yüzey sertliği ve mikroyapının, çapak oluşumu, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklere etkilerinin incelenmesidir.

Çalışmada öncelikle yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla Krom Karbo-Nitrür Kaplamalı (CrCN) sinterlenmiş karbür küresel takım ile 2 ve 3 paso ezerek parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında çap 9,8 kaplamalı HSS matkap ile farklı delik delme yöntemleri ile yöntemleri ile 30mm derinliğinde kör delikler delinmiştir. Ezerek parlatma işleminin malzemenin mikrosertlik değerlerini ve sertlik derinliğini arttığı, delik delme yönteminin ve ezerek parlatma koşullarının kesme kuvvetlerini etkilediği, 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde, sabit adımla gagalayarak delik delme yönteminde en düşük Fz değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Sertliğin artmasıyla çapak genişliği, çapak kök genişliği ve çapak yüksekliğinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca ezerek parlatma işleminin delik iç yüzeylerinin yüzey pürüzlülük değerlerini de iyileştirdiği ve en iyi sonuçların 2 paso ezerek parlatma yapılan koşullarda elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AISI 316L Paslanmaz Çelik, Delik Delme, Gagalama, Giriş Çapağı, Yüzey Kalitesi

2025,105 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Gülşah BOZKURT

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering
Supervisor:
Dr. Lecturer Elif MALYER**

AISI 316L stainless steel is widely used in industries such as aerospace, healthcare, biomedical devices, and food processing. However, due to its low machinability characteristics, cutting processes face challenges, leading to the formation of poor-quality hole surfaces. In this context, the primary aim of this study is to investigate the effects of increased surface hardness and microstructure, achieved through different burnishing processes applied prior to drilling, on properties such as burr formation, cutting forces, and surface roughness for this steel, which is also widely used in the orthopedic implant sector.

In this study, burnishing processes with 2 and 3 passes were first performed using a Chromium Carbonitride (CrCN) coated sintered carbide spherical tool to improve surface quality. Then, blind holes of 30 mm depth were drilled with a coated HSS drill bit (9.8 mm diameter) using different drilling methods. The results showed that the burnishing process increased the material's microhardness values and hardness depth. It was also observed that the drilling method and burnishing conditions influenced the cutting forces. The lowest F_z values were obtained under the fixed-step reaming method with the samples subjected to 2-pass burnishing. Additionally, as hardness increased, burr width, burr root width, and burr height decreased. Furthermore, the burnishing process improved the surface roughness values of the hole inner surfaces, with the best results achieved under the 2-pass burnishing conditions.

Keywords: AISI 316L Stainless Steel, Deep Hole Drilling, Peck Drilling, Entire Burr Surface Roughness

2025, 105 pages

ÖNSÖZ

“AISI 316L Paslanmaz Çelik Malzemelerin Delinmesinde Çoklu İşlenebilirlik Parametrelerinin Araştırılması” isimli bu tez Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine ve İmalat Mühendisliği/ Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu tezin ortaya çıkmasında ve lisansüstü öğrenim hayatım boyunca öncelikle bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, araştırmalarımı öncülük eden danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Elif MALYER’e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ezerek parlatma işlemlerinde bana yardımcı olan Aymas Makine San. Ve Tic. A.Ş. firmasına, Ramazan ÖZTÜRK ve ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında beni motive eden, bana her daim destek veren, maddi ve manevi olarak güç kaynağım olan sevgili eşim Serkan BOZKURT’a ve değerli annem Hayat AKALAN’a ayrıca tez sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen meslektaşım Makine Mühendisi Berk YAYLALI’ya inançları ve destekleriyle yanımda oldukları için yürekten teşekkür ederim.

Gülşah BOZKURT

Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2R	Matkap Çapını
A_{ch}	Uç Ağzının Anlık İz Alanı
α_f	Efektif Talaş Açısı
ap	Kesme Derinliği
BUE	Kesici Takıma Yapışan Talaşlar
CNC	Bilgisayar Sayımlı Yönetim
D	Takım Çapı
DE	Kaldırılan Malzeme Uzunluğunu
dev/dak	Devir/Dakika
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
G73	Talaş Kırmalı Delik Delme Çevrimi
G81	Doğrudan Delik Delme Çevrimi
G83	Talaş Boşaltmalı Delik Delme Çevrimi
γ	Helis Açısı
H_B	Malzemenin Brinell Sertliğini
HV	Vickers Sertlik Değeri
IGC	Taneler Arası Korozyon
μm	Mikrometre
$\mu\Omega\text{cm}$	Elektriksel Direnç Değeri
MPa	Mega Paskal
mm	Milimetre
N.m	Newton Metre
OCP	Açık Devre Potansiyeli
SCC	Stres Korozyon Çatlaması
SEM	Scanning Elektron Mikroskop
SiC	Silisyum Karbür
Vf	İlerleme Hızı
w	Radyal Kesici Ağzı
Ψ_c	Radyal Ağız Açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Dört farklı paslanmaz çelik türünün gerilme-gerinim eğrileri	13
Şekil 2.2. %13 Cr içeren Fe–Cr–C faz diyagramının dikey kesiti	13
Şekil 2.3. Kaplama katmanlarının ve alt tabakanın mikro yapıları	16
Şekil 3.1. Delik delme işlemi	20
Şekil 3.2. Delik çapı ve boyu ilişkisi	21
Şekil 3.3. Delme işlemleri	21
Şekil 3.4. Matkap şekli a) Matkapların ana kısımları	22
Şekil 3.5. Matkap şekli b) Matkapların kesici kısımları	23
Şekil 3.6. Kesici ucu etkileyen kuvvetlerin gösterimi	23
Şekil 3.7. Burgulu matkabin mekanik modeli	25
Şekil 3.8. Burgulu matkabin kesici ağız ve radyal ağız bölgesinin üst görünüşü	26
Şekil 3.9. Delme kuvvetlerinin yönü	30
Şekil 3.10. Helisel matkapların aşınma mekanizmaları	31
Şekil 3.11. İlerleme hızı ve kesme hızı	34
Şekil 3.12. a) talaş kesit alanı, b) kesici kenar başına ilerleme	35
Şekil 3.13. Yaygın kullanılan bazı delik uygulamaları	36
Şekil 3.14. Delik delme çevrimlerinin şematik gösterimi	37
Şekil 3.15. Delik dairesellik görüntüsü	38
Şekil 3.16. Yüzey pürüzlülük profili analiz grafiği	39
Şekil 3.17. Farklı kesme hızları altında delik delme işlemindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme beslemesinin etkisi	40
Şekil 3.18. Farklı kesme beslemeleri altında delinen deliğin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının etkisi	41
Şekil 3.19. Deney seti tasarımı	42
Şekil 3.20. Kesme uzunluğu ve kesme hızına göre çaptan sapma grafiği	42
Şekil 3.21. Kesme hızı ve Kesme uzunluğuna göre dairesellikten sapma grafiği	43
Şekil 3.22. Çapak form görüntüleri	44
Şekil 3.23. Çapak oluşumu	45
Şekil 3.24. Çapak türleri ve geometrik özellikleri	45
Şekil 3.25. Çapak oluşumunun sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonu	47
Şekil 3.26. Çapak Çeşitleri	49
Şekil 3.27. Matkap başlığı ile (a) başlıksız (b) uniform çapak	50
Şekil 3.28. Geçici (a) ve taç (b) çapak	50
Şekil 4.1. Ezerek parlatma işleminin şematik görseli	52
Şekil 4.2. Paso sayısının yüzey durumuyla ilişkisi	55
Şekil 4.3. Takım ve numunenin hareket şekli	57
Şekil 4.4. İşlem sonrası yüzey görünümü	57
Şekil 4.5. Derin ezme yöntemi	59
Şekil 4.6. Makara ile perdahlama işlemi	59
Şekil 4.7. Bilyeli perdahlama	60
Şekil 6.1. Hartford CNC Tezgâhı ve freze ucu	75
Şekil 6.2. Krom Karbo-Nitrür Kaplama (CrCN)	75
Şekil 6.3. CNC 4 Eksen dik işleme merkezi	76
Şekil 6.4. Kistler Tip 9257B marka 3 Eksen Dinamometre	77
Şekil 6.5. Delik delme deneyleri	79
Şekil 6.6. Delik delme deneyleri	79
Şekil 6.7. Numune kesme işlemi ve Struers-Labotom-3 marka kesme makinesi	80
Şekil 6.8. Struers-Labotom-3 kesme makinesi ile kesilmiş numuneler	80

Şekil 6.9. Struers CitoPress-1 sıcak bakalite alma cihazı ve numuneler	81
Şekil 6.10. Struers LaboPol-5 marka zımparalama ve parlatma cihazı	81
Şekil 6.11. NIKON Eclipse LV100 Metal Mikroskobu	82
Şekil 6.12. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı	83
Şekil 6.13. Mitutoyo SJ 301 marka yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı	83
Şekil 6.14. Çapak geometrisi	84
Şekil 7.1. Numunelere ait mikrosertlik grafiği	86
Şekil 7.2. Ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapı gör.	86
Şekil 7.3. 1. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	88
Şekil 7.4. 2. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	88
Şekil 7.5. 3. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	89
Şekil 7.6. 4. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	89
Şekil 7.7. 5. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	90
Şekil 7.8. 6. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	90
Şekil 7.9. 7. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	91
Şekil 7.10. 8. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	91
Şekil 7.11. 9. Koşula ait Fz-Zaman grafiği	92
Şekil 7.12. 9. Ortalama İtme Kuvveti-Zaman grafiği	92
Şekil 7.13. Çapak kök genişlikleri	94
Şekil 7.14. Çapak yükseklikleri	94
Şekil 7.15. Deney koşullarının çapak oluşumuna etkisi	95
Şekil 7.16. Delik iç yüzeylerinden ölçülen Ra (μm) Yüzey pürüzlülük değerleri	96

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri	4
Tablo 2.2. Bazı Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Bileşimleri ve Tipik Uygulama Alanları	6
Tablo 2.3. AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Kimyasal Bileşimi	8
Tablo 2.4. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Bileşimi	14
Tablo 2.5. Dupleks Paslanmaz Çeliklerde Fazların Hacimsel Oranı (%)	14
Tablo 2.6. Paslanmaz Çelik Gruplarına Ait Fiziksel Özellikler	18
Tablo 2.7. Farklı Çelik Kalitelerinin Mekanik Özellikleri	19
Tablo 3.1. Çapak Oluşumunu Etkileyen Parametreler	47
Tablo 6.1. Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri	74
Tablo 6.2. Deney Numunelerinin Kimyasal Özellikleri	74
Tablo 6.3. Krom Karbo-Nitrür Kaplama Özellikleri	76
Tablo 6.4. Matkap Özellikleri	77
Tablo 6.5. Delme İşlemlerine Ait Parametreler	78
Tablo 6.6. Delme İşlemleri Yapılırken Kullanılan G-kodları	78

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
2.PASLANMAZ ÇELİKLER.....	2
2.1.Paslanmaz Çelik Türleri	3
2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler	4
2.1.2. 316L Östenitik Paslanmaz Çelikler	6
2.1.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler	9
2.1.4. Martensitik Paslanmaz Çelikler	10
2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler	12
2.1.6. Çökelme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler	14
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Davranışı	16
2.3. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri	16
2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	18
3. DELİK DELME	19
3.1. Delik Delme İşlemleri	19
3.2. Delme Takımları	20
3.2.1. Delme İşleminin Mekanik Özellikleri	22
3.2.2. Takım Ömrü ve Takım Aşınması	29
3.2.3. Delik Delmede Kullanılan Kesme Parametreleri.....	31
3.3. Delik Tipleri	34
3.4. Delik Delme Çevrimleri	35
3.5. Delik Kalitesini Etkileyen Faktörler	36
3.5.1. Delik Çapı	37
3.5.2. Dairesellik	37
3.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....	37
3.5.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi	40
3.5. Delme İşleminde Çapak Oluşumu	42
3.5.1. Delik Delme Esnasında Oluşan Çapak Formları.....	47
3.5.2. Delik Yüzeylerinin Kalitesi	49

4. EZEREK PARLATMA.....	51
4.1. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri	52
4.1.1. Kesme Hızı.....	53
4.1.2. İlerleme Hızı	53
4.1.3. Paso Sayısı	54
4.2. Mekanik Yüzey İyileştirme Yöntemleri.....	55
4.2.1. Bilyeli Parlatma.....	55
4.2.2. Lazerli Şok Darbesi (LSP)	57
4.2.3. Derin Ezme	57
4.2.4. Makara ile Perdahlama Yöntemi	58
4.2.5. Bilyeli Perdahlama Yöntemi	59
4.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçme Yöntemleri.....	59
4.3.1. Mekanik Çalışma Yöntemi.....	60
4.3.2. Hidrolik Yöntem	60
4.3.3. Yüzey Dinamometresi Yöntemi	60
4.3.4. X Işını Yöntemi	60
4.3.5. Elektron Mikroskobu Yöntemi.....	61
4.3.6. Optik Mikroskop Yöntemi	62
5. LİTERATÜR	64
6. TEST VE ÖLÇÜM.....	73
6.1. Materyal	73
6.2. Numunelerin Ezerek Parlatma İşlemlerinin Yapılması	73
6.3. Delik Delme İşlemleri	75
6.4. Metalografik Analiz.....	78
6.5. Mikrosertlik Testi	81
6.6. Yüzey Pürüzlülük Testi	81
6.7. Çapak Boyutlarının Ölçümü	82
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	84
7.1. Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları	84
7.2. Mikroyapı İncelemeleri.....	84
7.3. Delme Esnasında Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	85
7.4. Çapak Analizi.....	92
7.5. Yüzey Pürüzlülük Analiz Sonuçları.....	94
7.6. Sonuç ve Öneriler	96

1.GİRİŞ

Çoğunlukla talaş kaldırma yöntemlerinin sonuncusu olan delik delme işlemi, imalat prosesleri arasında en fazla kullanılmakta olan işlemlerden biri olmakla birlikte mekanik üretimde ekonomiklik açısından önemli bir yere sahiptir. II. Dünya Savaşı sonrası, özellikle havacılık ve otomotiv sanayilerinde yüksek hassasiyet gerektiren delik delme teknikleri 1950'lerden itibaren CNC makinelerinin gelişmesiyle, delik delme işlemleri tamamen otomatikleşmiş ve yüksek doğruluk elde etmiştir. Günümüzde, delik delme işlemi yüksek hassasiyetli takımlar sayesinde daha verimli ve kaliteli hale gelmiştir.

Endüstride en yaygın kullanılan derin delik delme yöntemleri arasında gagalama ve talaş boşaltma prosesleri yer almaktadır. Bu yöntemler, malzeme ve matkap ömrünü uzatmayı, işlemin verimliliğini arttırmayı ve delik kalitesini iyileştirmeyi amaçlar. Derin delik delme ile normal delik delme işlemleri arasında çap ve derinlik farkının yanında talaş boşaltma, yüzey kalitesi ve talaş boyutu gibi parametreler de belirleyici faktörlerdir.

Gagalama işlemi, deliklerin çapını büyütmek ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla farklı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Seçilecek yöntem, iş parçasının malzeme türü, delik derinliği ve işlem gereksinimlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları bulunmakta olup, doğru yöntemin seçimi, yüksek verimlilik ve hassasiyetin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, yüzey sertliğinin giriş çapağı oluşumuna etkilerini inceleyebilmek için ezerek parlatma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelere çapı 9,8mm ve uç açısı 135° olan kaplamalı HSS matkaplarla kesme hızı 100 m/dak, ilerleme hızı 0,1 mm/devir seçilerek farklı delik delme yöntemleri (sabit ve değişken adımlı gagalama ile sabit adımlı talaş kırma) uygulanmış ve kesme kuvvetleri deneysel olarak ölçülmüştür. Deney sonuçları doğrultusunda, ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunelerin ortalama mikrosertlik değerleri ölçüm noktalarına göre incelenmiş ve genel olarak paso sayısının artması yüzey sertliğini de arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme sağlandığı ve çapak oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir.

2.PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çeliğin "paslanmaz" olmasını sağlayan temel alaşım elementi kromdur. Krom, çeliğin korozyon direncini artıran ve ona parlak, gümüşümsü bir görünüm kazandıran koruyucu bir oksit tabakasının oluşumuna olanak tanımaktadır. Bu koruyucu krom oksit tabakasının meydana gelmesi için çelikte %10,5'ten fazla krom bulunması gerekmektedir. Bu krom seviyesinde, pasif tabaka ya da pasif film olarak bilinen krom zenginleştirilmiş yüzey oksidi, çelik yüzeyinde oluşmakta ve paslanmaz çeliğin koruyucu özelliğini sağlamaktadır (Gunawan & Arifin, 2021).

Paslanmaz çelikler, üstün korozyon dirençleri, kolay işlenebilirlikleri, yüksek sıcaklık dayanımları ve görünümleri sayesinde kimya endüstrisinden mutfak ekipmanlarının üretimine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yapısal ve işlevsel özelliklerine bağlı olarak beş ana kategoriye ayrılmaktadır: **ferritik**, **östenitik**, **martenzitik**, **dubleks** ve **çökelme sertleşmeli** paslanmaz çelikler. Her kategori, belirli bir mikroyapıya ve bu mikroyapının sunduğu mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir; bu da onları farklı mühendislik uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Paslanmaz çeliklerin seçim kriterleri, kullanım koşullarına ve istenen performans özelliklerine göre belirlenmektedir (E. Çelik vd., 2021).

Paslanmaz çelikler, içerdikleri sabit krom miktarı sayesinde yüksek korozyon direncine sahip olmakla birlikte, özellikleri genellikle ek alaşım elementleriyle daha da geliştirilir. Paslanmaz çeliklerin diğer metallerden ayıran belirgin bir özelliği, mikroyapılarının (ya da kristal yapıların) temel alınarak sınıflandırılmasıdır. Mikroyapı, çeliğin tanelerindeki atomların düzenini ifade eder ve bu, çeliğin mekanik ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Paslanmaz çelikler genel olarak, kimyasal bileşimlerinde bulunan krom ve krom-nikel bileşenlerine göre iki ana gruba ayrılırlar. Mikroyapı, duplex (östenitik-ferritik), martensitik, ferritik ve östenitik gibi önemli çökelme sertleşmesi malzeme gruplarını ayırt etmede temel bir faktördür. Paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri örneğin uzama, akma dayanımı, elastik modül ve çekme mukavemeti hem alaşım kimyası hem de mikroyapı tarafından şekillendirilir. Tablo 2.1'de bu etkileşim ayrıntılı bir şekilde sunulmaktadır. Bununla birlikte, "Young modülü" gibi özel bir mekanik özellik, paslanmaz çelik alaşımlarının karmaşık mikroyapıları ve kimyasal bileşimlerinden doğrudan etkilenen bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Abushaala, 2024).

Tablo 2.1. Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri (Abushaala, 2024)

AISI Paslanmaz Çelik	Mikroyapı Özellikleri	Mekanik Özellikler	Fiziksel Özellikler
Östenitik	Östenit	Elastik gerilme: 480-870 MPa	Akma gerilmesi: 200-580 MPa
Ferritik	Ferrit	Elastik gerilme: 410-640 MPa	Akma gerilmesi: 280-575 MPa
Martensitik	Martensit	Elastik gerilme: 485-999 MPa	Akma gerilmesi: 277-870 MPa
Dubleks	Östenit & Ferrit	Elastik gerilme: 688-910 MPa	Akma gerilmesi: 409-912 MPa
Precipitation Hardenable	Östenit & Martensit	Elastik gerilme: 890-995 MPa	Akma gerilmesi: 271-992 MPa

2.1. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelikler, östenitik, martenzitik, ferritik, dubleks ve çökeltmeyle sertleşen paslanmaz çelikler olmak üzere beş ana gruba ayrılır. Her grup, korozyon direnci ve mekanik özellikler açısından farklılık göstermektedir.

- 200 Serisi: Manyetik olmayan, östenitik yapıda ve ekonomik bir seçenektir; ancak klorür içeren ortamlarda korozyona karşı hassastır.
- 300 Serisi: Manyetik olmayan ve daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Ancak, klorürlü ortamlarda yarık ve oyuklanma korozyonuna maruz kalabilmektedir.
- 400 Serisi: Manyetik ve martenzitik yapıda olup ısıl işlemle sertleştirilebilir; ancak düşük korozyon direnci nedeniyle klorürlü ortamlarda dayanıklı değildir.
- 600 Serisi: Çökeltmeyle sertleşen çeliklerdir ve yüksek mukavemet sağlamaktadır ancak klorürlü ortamlarda korozyon ve çatlamalara karşı hassastır.

Paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, kromun oluşturduğu pasif oksit tabakasına bağlıdır. Bu tabaka, düşük oksijenli veya klorürlü ortamlarda hızla tahrip

olabilmektedir bu nedenle malzeme seçimi ortam koşullarına uygun yapılmalıdır (F. Y. Ma, 2012).

2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, soğuma sırasında östenitin ferrite dönüşmemesi nedeniyle su verme yöntemiyle sertleştirilemezler. Manyetik özellik taşımayan bu çelikler, TS 2535, EU 95, EU 88 ve DIN 17440 standartlarına göre yüksek alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılır ve AISI 3XX serisinde yer almaktadırlar. TS 2535 standardına göre, östenitik paslanmaz çelikler, korozyon direncini sağlayan östenitik yapıya sahip, krom ve nikel içeren ve oda sıcaklığında manyetik özellik göstermeyen çelikler olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, soğuk şekillendirmeye uygun olmalarına rağmen, ısıtılma işlemiyle sertleştirilememektedirler. Östenitik krom-nikel paslanmaz çelikler, martensitik ve ferritik krom paslanmaz çeliklere göre daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Ferritik paslanmaz çeliklerde görülen geçiş sıcaklığındaki sertleşme ve iç yapının östenitik doğası, östenitik paslanmaz çeliklerde gözlemlenmemektedir. Bu çeliklerin sıfırın altındaki sıcaklıklardan (-270°C'ye kadar) yüksek sıcaklıklara kadar üstün korozyon direnci ve mekanik özellikleri, onları birçok alanda benzersiz bir yapısal çelik olarak kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır (Mohamed, 2018).

Standart Östenitik paslanmaz CrNi (Mo) çelikler, yüksek korozyon direnci ve süneklikleri nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Düşük interstisyel (boşluk bulunan) içerikleri, kaynak yapılabilirliğini artırırken akma mukavemetini azaltmaktadır. Ancak döküm ve dövme parçalar, kaynak yapılabilirlikten çok mukavemetten fayda sağlamakta olup, bu tür malzemelerde karbon ve azot gibi interstisyel atomlarla katı çözeltili sertleşmesi, mukavemeti artırmanın etkili bir yolu olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, interstisyel elementlerin çözünürlüğü, krom, nikel, manganez ve molibden gibi yer değiştiren elementlerin miktarına bağlıdır. Bu elementlerin doğru dengesinin sağlanması, interstisyel içeriklerin artırılması ve dolayısıyla çeliklerin mukavemetinin yükseltilmesi için önemlidir (Berns vd., 2013).

Östenitik paslanmaz çelikler, ferritik ve martensitik paslanmaz çeliklerden daha karmaşık bileşimlere sahip olup, genellikle demir (Fe), karbon (C), krom (Cr) ile birlikte nikel (Ni) ve bazı türlerinde az miktarda azot (N) içermektedirler. Bu çeliklerin

bileşimi, %16-20 krom (Cr), %10-24 nikel (Ni) ve manganez (Mn) oranları ile, %0,40'a kadar karbon (C) ve düşük miktarlarda molibden (Mo), titanyum (Ti), niyobyum (Nb) ve tantalum (Ta) gibi alaşım elementlerinden oluşmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler, geniş bir sıcaklık aralığında yüksek tokluk, yüksek dayanım ve oksidasyona karşı direnç gibi üstün özelliklere sahip olup, özellikle 540°C'ye kadar oksidasyona karşı dayanıklıdır. Tablo 2.2'de gösterilen bu grup çeliklerin başlıca örnekleri arasında 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 türleri yer almaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler için kullanılan dolgu malzemeleri genellikle ana malzemenin yapısal özelliklerine benzerlik göstermektedir. Ancak, sıcak çatlak oluşumunu önlemek amacıyla, belirli alaşımlarda düşük miktarda ferrit içeren mikro yapılar oluşturabilen dolgu malzemeleri tercih edilmektedir. 302 tipi çeliklerin kaynak işlemleri için genellikle 308 tipi dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. 321 tipi çeliklerin kaynak işlemlerinde 304 ve 347 tipi dolgu malzemeleri yaygın olarak tercih edilirken, diğer paslanmaz çelik türleri ise yapısal olarak uygun dolgu malzemeleriyle kaynaklanabilmektedir. Ayrıca, 347 tipi paslanmaz çeliklerin kaynak işlemlerinde 308H tipi dolgu malzemeleri de kullanılabilir. Söz konusu dolgu malzemeleri, örtülü elektrot dolgu telleri veya özlü teller formunda temin edilebilmektedir (Korg, 2007).

Tablo 2.2. Bazı Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Bileşimleri ve Tipik Uygulama Alanları (Korg, 2007)

AISI Tipi	Cr %	Ni %	C(max.) %	Mn %	Diğerler %	Tipik Uygulamalar
301	17	7	0.15	-	-	Yüksek hızda aşındırma, üstün dayanıklılık ve süneklik gerektiren uygulamalar; demir yolcu araçları, uçak parçaları, sıkma ekipmanları, otomobil jantları ve süslemeler.
304	19	9	0.08	-	-	Kaynak sırasında düşük karbonlu 302 alaşımına benzer özellikler sunarak karbür çökelmesini engeller; gıda işleme makineleri, soğuk kaplama sistemleri, sac işleme gibi uygulamalar.
304L	19	10	0.03	-	-	304'ün daha düşük karbonlu versiyonu; kaynak sırasında karbür çökelmesini azaltır, sıvı gübreleme tankları ve kimyasal taşıma sistemleri.
309	23	13.5	0.20	-	-	Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitlenme karşısında direnç gerektiren uygulamalar;

AISI Tipi	Cr %	Ni %	C(max.) %	Mn %	Diğerler %	Tipik Uygulamalar
						uçak motorları, ısıtıl işlem ekipmanları ve endüstriyel kaplama sistemleri.
310	25	20.5	0.25	-	-	309'dan daha yüksek oksitlenme ve sıcaklık dayanımı sağlar; ısı değiştirici uygulamaları, gaz türbin bıçakları ve diğer kaynak dolgulu metaller.
316	12	8	0.08	2.5	-	Kimyasal ortamlar ve yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalar; kimyasal taşıma ekipmanları, maya tüpleri ve asidik ortamlarda çalışan makineler.
316L	12	8	0.03	2.5	-	Karbür çökmesi ve taneler arası bozulma riski düşük olup, ağır kaynak gereksinimleri için uygundur; zorlu ortamlar için kaynak yapılan yapılar ve yoğun kaynak gerektiren parçalar.
321	18	10.5	0.08	-	Ti5XC C	Şiddetli korozyon ortamlarına dayanıklı bağlantı noktaları, yüksek sıcaklıkta çalışan kazanlar ve ısıtıcı sistemler.
347	18	11	0.08	-	Nb 10XC	Yüksek sürünme dayanımı ve 321 tipi çeliklerin benzer özelliklerine sahip olup, uçak egzoz sistemleri, motor parçaları ve kimyasal taşıma tankerleri.

Östenitik paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci ve yüksek süneklik özellikleri sayesinde kolay şekillendirilebilme avantajı sunmaktadır. Bu çelikler arasında, 304 ve 316 kalite paslanmaz çelikler en yaygın kullanılan türlerdir (Akın, 2014).

2.1.2. 316L Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci, yüksek sıcaklık performansı ve üretim kolaylığı nedeniyle geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Düşük karbon içeriği ile 316L östenitik paslanmaz çelik, yüksek kaynaklanabilirlik sunmaktadır. Ancak, kaynak metalinde %5-10 aralığında delta ferrit bulunmasının termal çatlaklar ve mikro çatlamları azaltmasına karşın, bu fazın fazlalığı kaynak metalinin gevrekleşmesine ve korozyon direncinin zayıflamasına yol

açabilmektedir. Ayrıca, belirli korozif ortamlarda ferritin seçici çözünmesi, yapısal arızalara neden olabilmektedir (de Souza Silva vd., 2021).

AISI 316L paslanmaz çelik, üstün korozyon direnci ve yüksek sıcaklık performansı ile tanınmaktadır. Krom ve nikel içeriği, bu özellikleri sağlarken, molibden (Mo) katkısı özellikle klorür içeren ortamlarda korozyon direncini artırmaktadır. Bu özellikleri, 316L'in zorlu ortamlarda tercih edilmesini arttırmaktadır. Tablo 2.3'te AISI 316L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi gösterilmiştir (de Souza Silva vd., 2021).

Tablo 2.3. AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Kimyasal Bileşimi (de Souza Silva vd., 2021)

Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
Bileşim Aralığı (%)	≤ 0.03	≤ 2.00	≤ 1.00	≤ 0.045	≤ 0.03	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00	≤ 0.10	Denge (kalan kısım)

2.1.2.1. 316L Paslanmaz Çeliklerin İçerisindeki Elementlerin Etkileri

316L paslanmaz çelik, üstün korozyon direnci, yüksek mukavemet, biyoyoumluluk ve uygun mukavemet-süneklik uyumu nedeniyle tercih edilen bir malzemedir. Bu özellikler, içerdiği alaşım elementlerinin katkılarından kaynaklanmaktadır.

- Krom (Cr): 316L paslanmaz çeliğin korozyon direncinin temel kaynağıdır. Çelik yüzeyinde oluşan krom oksit tabakası, paslanmayı engelleyerek malzemenin dayanıklılığını artırmaktadır.
- Nikel (Ni): Nikel, 316L çeliğin sünekliğini ve tokluğunu artırarak, korozyon direncine de katkıda bulunmaktadır.
- Molibden (Mo): Molibden, özellikle klorür içeren ortamlarda çeliğin çukur korozyonuna karşı direncini güçlendirmektedir.

- Karbon (C): 316L çeliğin düşük karbon içeriği (bu çeliğin "L" ifadesiyle belirtilir), kaynak sonrası korozyonun önlenmesine yardımcı olmaktadır. Kaynak sırasında yüksek sıcaklıklar, karbonun kromla birleşerek karbür oluşturmaya ve bu durum da çeliğin korozyon direncinin zayıflamasına yol açabilmektedir.
- Mangan (Mn), Silisyum (Si) ve Azot (N): Bu elementler, çeliğin mukavemetini, işlenebilirliğini ve genel mekanik özelliklerini iyileştirmektedir.

316L paslanmaz çeliğin özellikleri, sadece kimyasal bileşimiyle değil, aynı zamanda üretim süreçleri ve ısıtma işlemleriyle de şekillenmektedir. Örneğin, Lazer Toz Yatak Füzyonu (L-PBF) gibi eklemeli üretim yöntemleri, çeliğin mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. 316L paslanmaz çeliğin içerdiği her element, malzemenin nihai özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunarak bu elementlerin etkileşimi, 316L çeliğini çok çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun hale getiren benzersiz bir özellik kombinasyonu yaratmaktadır (Afkhami vd., 2021).

2.1.2.2. AISI 316L İşlenmesinde En Etkili Parametreler

AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde, kesme hızı ve ilerleme miktarı, işleme performansını belirleyen en önemli işlem parametreleridir:

2.1.2.2.1. Kesme Hızı: Kesme hızındaki artış, kesme bölgesindeki sıcaklığın yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum, takım-talaş temas alanını küçültür ve ikinci deformasyon bölgesindeki kayma dayanımını düşürür ve kesme kuvvetlerini azaltır. Ayrıca, sıcaklık artışı takım-talaş temasındaki sürtünme katsayısını düşürerek kesme işlemini kolaylaştırır. Kesme hızının artışı, yüzey kalitesini iyileştirme eğilimindedir. Bunun temel nedeni, sıcaklığın artmasıyla talaş akışının ve deformasyonunun kolaylaşması, mikro çatlak oluşumu ve yırtılma eğiliminin azalmasıdır.

2.1.2.2.2. İlerleme Miktarı: İlerleme miktarının düşürülmesi, kesme bölgesindeki talaş yükünü ve basıncı azaltarak kesme kuvvetlerini düşürmektedir. Ancak, ilerleme miktarı ile yüzey pürüzlülüğü doğru orantılıdır. İlerleme miktarının artması, yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve dolayısıyla yüzey kalitesinin düşmesine

yol açar. Bu nedenle, optimum bir ilerleme miktarı seçimi, hem kesme kuvvetlerini kontrol altında tutmak hem de yüzey kalitesini iyileştirmek açısından çok önemlidir. Kesme hızı ve ilerleme miktarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, AISI 316L'nin işlenebilirliğini artırmak için önemli olduğunu göstermektedir. Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin %69,35 etki oranıyla ilerleme miktarı olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde, yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametrenin ise %69,53 etki oranıyla kesme hızı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, işlem parametrelerinin işleme performansı üzerindeki belirleyiciliğini vurgulamaktadır (Aydın vd., 2021).

2.1.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik çelik, oda sıcaklığında ferritik kristal yapıya sahip bir paslanmaz çelik türüdür. Bu yapıda, demir atomları gövde merkezli kübik (BCC) bir kafes oluşturur ve karbon atomları bu kafesin interstisyel boşluklarında bulunur. Ferritik çelikler genellikle %0.15'ten az karbon, %12 ile %30 arasında krom ve değişken miktarlarda molibden, nikel, titanyum ve niyobyum gibi diğer elementler içerir. Ferritik çelikler, düşük maliyetleri, iyi korozyon dirençleri ve işlenebilirlikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, atmosferik korozyona, birçok asit türüne ve deniz suyuna karşı dirençleri, onları otomotiv, inşaat, kimya ve gıda işleme gibi sektörler için cazip hale getirmektedir. Ferritik çeliklerin korozyon direnci, öncelikle yüksek krom içeriğinden kaynaklanmaktadır. Krom, çeliğin yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak paslanmayı önler. Molibden ilavesi, çukurlaşma korozyonuna karşı direnci artırırken, nikel genel korozyon direncini iyileştirir, ancak maliyeti de artırmaktadır.

Ferritik çeliklerin önemli bir dezavantajı, stres korozyon çatlamasına (SCC) karşı hassasiyetleridir. SCC, gerilim altındaki çeliğin belirli ortamlarda çatlamasına neden olan bir korozyon türüdür. Ferritik çelikler, klorür içeren ortamlarda SCC'ye karşı özellikle hassastır. Ferritik çelikler, SCC direncini artırmak ve diğer mekanik özellikleri iyileştirmek için titanyum ve niyobyum gibi elementlerle stabilize edilmiştir. Bu elementler, çeliğin karbon ve nitrojen içeriğini kontrol ederek, taneler arası korozyona (IGC) neden olan karbür ve nitrür oluşumunu engeller. IGC, taneler

arasındaki sınırların seçici olarak korozyona uğradığı bir korozyon türüdür ve çeliğin tokluğunu ve mukavemetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Özetle, ferritik çelik, düşük maliyetli, korozyona dayanıklı ve işlenmesi kolay bir malzemedir. Gelişmiş korozyon direncine sahip yeni ferritik çelik alaşımları, paslanmaz çeliklerin kullanımını sınırlayan SCC ve IGC gibi sorunları ele almayı amaçlayan gelişmeler, ferritik çeliklerin gelecekte daha geniş bir uygulama yelpazesinde paslanmaz çeliklere uygun bir alternatif olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır (Steigerwald vd., 1977).

Özellikle niyobyum (Nb) ve titanyum (Ti), yüksek sıcaklıkta ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu elementler, interstisyel karbon ve nitrojeni bağlayarak yüksek sıcaklıklarda kararlı olan karbürler ve nitrürler oluştururlar. Bu çöktirler, dislokasyon hareketini, tane sınırı kaymasını ve tane büyümesini engelleyerek yüksek sıcaklıklarda mukavemeti korur. Yapılan çalışma, güçlendirilmiş ferritik paslanmaz çeliklerin (örneğin, 1.4509, 1.4521 ve 1.4621 gibi), güçlendirilmemiş çeliklere (1.4003 ve 1.4016 gibi) kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi mukavemet gösterdiğini ortaya koymuştur (Amuda & Mridha, 2011).

Ferritik paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda tane büyümesi ve yumuşama eğilimindedir. Ancak, daha ince tane boyutlarına sahip çeliklerin, yüksek sıcaklıkta daha iyi mukavemet gösterdiği gözlemlenmiştir. Laves faz parçacıkları gibi ikinci faz çöktirlerinin, tane büyümesini engelleyerek ve yüksek sıcaklık mukavemetini artırarak olumlu bir etki sağladığını ortaya koymaktadır. Yüksek sıcaklıklar, ferritik paslanmaz çeliklerde de diğer çelik türlerinde olduğu gibi mukavemet ve sertlik kaybına yol açmaktadır. Bu mukavemet kaybı, artan sıcaklıklarda difüzyon oranlarının yükselmesi ve dislokasyon hareketliliğinin artması nedeniyle meydana gelmektedir (Manninen & Säynäjäkangas J, 2012).

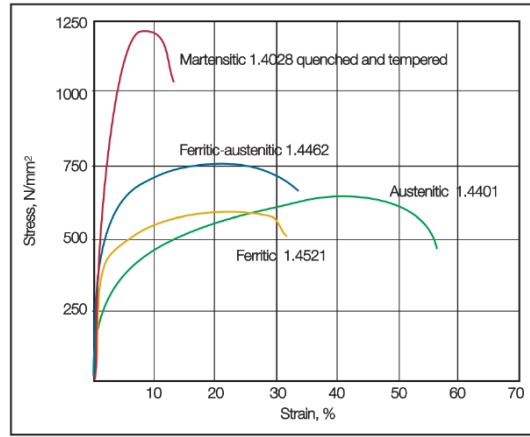
2.1.4. Martensitik Paslanmaz Çelikler

Martensitik paslanmaz çelikler, %11,5–18 ağırlıkça krom ve %0,1–1,2 ağırlıkça karbon içeren demir bazlı alaşımlardır; bu özellikleriyle diğer paslanmaz çelik türlerinden daha yüksek karbon içeriğine sahip olmaktadır. Mukavemetleri ve korozyon direnci sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde

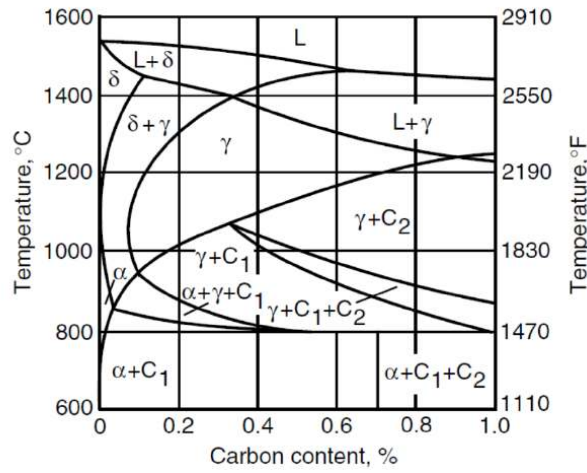
kullanılmaktadırlar. Yüksek mukavemet, özellikle çatal bıçak takımları ve cerrahi aletler gibi uygulamalarda önemli bir gereksinimken, tokluk ve esneklik bu tür uygulamalar için genellikle ikinci planda kalmaktadır. Bu çeliklerin gerilme mukavemetini sürdürebilmesi amacıyla, malzeme genellikle daha düşük sıcaklıklarda temperlenmektedir (Gunawan & Arifin, 2021).

Martensitik paslanmaz çelikler, yüksek mukavemetleri ve korozyon dirençleri ile bilinirler ancak kırılganlık ve taneler arası korozyon eğilimi gibi zorluklar da barındırmaktadırlar (Gunawan & Arifin, 2021). Lazer toz yatak füzyonu (L-PBF), çökelti sertleştirmeli martensitik paslanmaz çeliklerden yapılan karmaşık parçaların işlenebilirlik sorunlarını çözmeye umut verici bir üretim tekniği olarak öne çıkmaktadır (Zai vd., 2020). Isıl işlem, bu çeliklerin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, söndürme ve temperleme işlemleri, rafine mikro yapılar ve bazı durumlarda metalik bileşiklerin çökmesine yol açarak, üstün mekanik özelliklerle sonuçlanabilmektedir (Constantin Berbecaru vd., 2019). Karşılaştırmalı çalışmalar, 420 gibi ısıtılmış martensitik paslanmaz çeliklerin, asidik ortamlarda 316 gibi östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha yüksek korozyon direnci sunduğunu göstermektedir. Bu iyileşmiş korozyon direnci, mikro yapıda martensit oluşumu ve tutulan ostenit fazına bağlanmaktadır (Loto vd., 2016).

Martensitik paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Ticari olarak üretilen, %13 Cr ve %0,08'den fazla karbon içeren çelik, en yaygın kullanılan martensitik paslanmaz çelik türüdür. Şekil 2.1, martensitik paslanmaz çeliğin diğer paslanmaz çelik türlerine kıyasla daha yüksek bir mukavemet sergilediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, martensitik paslanmaz çelik, kırılganlık eğiliminde olup, farklı paslanmaz çelik türlerine kıyasla daha düşük bir tokluk değerine sahiptir. Şekil 2.2, %13 Cr içeriğine sahip Fe–Cr–C faz diyagramının dikey kesitini göstermektedir (Gunawan & Arifin, 2021).



Şekil 2.1. Dört farklı paslanmaz çelik türünün gerilme-gerinim eğrileri (Gunawan & Arifin, 2021)



Şekil 2.2 %13 Cr içeren Fe–Cr–C faz diyagramının dikey kesiti (Gunawan & Arifin, 2021)

2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, tipik olarak %20-30 oranında krom (Cr) ve %5-10 oranında nikel (Ni) içeren alaşımlardır. Bu çelikler, mikroyapılarındaki ferrit ve östenit fazlarının bir arada bulunması nedeniyle "ferritik-östenitik paslanmaz çelikler" olarak da adlandırılmaktadır. Ferritik yapı, malzemeye yüksek mukavemet sağlarken, östenitik yapı ise üstün tokluk ve korozyon direnci kazandırmaktadır. Bu özellikler, dupleks paslanmaz çeliklerin mekanik ve kimyasal dayanım açısından geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır. Son yıllarda, bu çelikler, pompa milleri, gıda

sanayi, makine bileşenleri, elektrik üretim tesisleri ve petrol rafinerileri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (E. Çelik vd., 2021).

Dubleks paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği, sahip oldukları avantajlarla orantılı olarak bazı dezavantajları beraberinde getirmektedir. Özellikle düşük ısı iletkenlik, yüksek kırılma tokluğu ve kesici takım kenarında talaş birikintisi (BUE) oluşumu gibi sorunlar, bu malzemelerin işlenmesini zorlaştırmaktadır. Talaşlı imalat sırasında, kesici takıma yapışan talaşlar (BUE), zamanla kesici takım yüzeyinden ayrılarak takım aşınmasının hızlanmasına yol açabilmektedir. Bu durum, işleme sürecinde verimliliği olumsuz yönde etkileyebilir ve takım ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle, dubleks paslanmaz çeliklerin işlenmesi sırasında uygun kesme parametrelerinin seçilmesi ve doğru işleme tekniklerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır (E. Çelik vd., 2021).

Dubleks paslanmaz çelikler, yaklaşık olarak eşit miktarda ferrit ve ostenit fazlarını içeren bir mikro yapıya sahiptir. Bu alaşımlar, üstün korozyon direnci, yüksek mekanik özellikler ve iyi kaynaklanabilirlik sunarak geniş bir endüstriyel uygulama alanında tercih edilmektedir. Dubleks paslanmaz çeliklerin mikro yapısı, katılaşma ve ısı ısıtma süreçlerinde başlangıçta tamamen ferritik bir yapı gösterirken, zamanla çift fazlı ferrit-ostenit mikro yapısına dönüşür ve gelişir (Olaseinde vd., 2014).

Tablo 2.4. Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Bileşimi (Olaseinde vd., 2014)

Alloy	Element (wt%)				
	Cr	Ni	Mn	N	Mo
2101	21.5 ± 0.7	1.5 ± 0.3	4.8 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.5 ± 0.5
2205	22.5 ± 0.7	5.5 ± 1.4	2.0 ± 0.0	0.2 ± 0.0	3.3 ± 0.4
2507	25.0 ± 1.4	7.0 ± 1.4	1.2 ± 0.0	0.3 ± 0.1	4.0 ± 1.4

Tablo 2.5. Dubleks Paslanmaz Çeliklerde Fazların Hacimsel Oranı (%) (Olaseinde vd., 2014)

Alloys	2101	2507	2205
Ferrite (α)	51.2 ± 5.9	49.3 ± 4.6	31.2 ± 5.2
Austenite (γ)	48.8 ± 5.9	50.7 ± 4.6	68.8 ± 5.2

2.1.6. Çökelme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

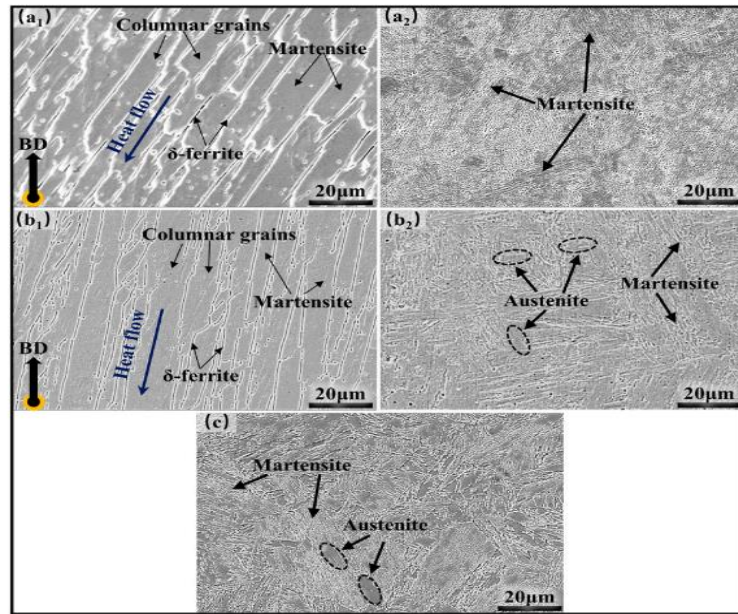
Çökelme sertleşmesi, çelikler, alüminyum ve nikel alaşımları gibi belirli alaşımların dayanıklılığını ve sertliğini, tokluktan ödün vermeden artırmak için kullanılan bir metalurjik işlemdir. Geleneksel olarak, çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin (PH SS) mikro yapısı, kontrollü miktarlarda ferrit ve östenit fazları içeren bir martensitik matristen oluşmaktadır. Ferrit fazı, tokluk ve süneklik iyileşmesine katkı sağlarken, aynı zamanda elde edilebilecek maksimum mukavemet seviyelerini sınırlamaktadır. PH SS'nin mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla, araştırmacılar mikro yapıyı özelleştirmek için yenilikçi yöntemler geliştirmiştir. Bu yaklaşımlardan biri, döküm ve sonraki ısıtma işlem süreçleri sırasında malzemenin davranışını önemli ölçüde etkileyebilen bakır (Cu) ve niyobyum (Nb) gibi elementlerin alaşım modifikasyonu ile kullanılmasıdır (Sabzi vd., 2024).

Maraging paslanmaz çelikler, martensitik yapıda intermetalik bileşiklerin çökelme sertleşmesiyle yüksek mukavemet sağlamak amacıyla özel olarak geliştirilmiş çeliklerdir. Bu çeliklerde, mukavemetin artırılması için çökelme-formlama elementleri eklenmekte ve bu elementler, yaşlandırma işlemi sırasında çözünerek dağılmaktadır. Ancak, bu tür çeliklerde mukavemet ve korozyon direnci genellikle birbiriyle çelişir. Örneğin, yüksek kobalt (Co) içeriği, çeliğin mukavemetini artırırken, korozyon direncini olumsuz yönde etkileyebilir. Co'nun etkisi, maraging paslanmaz çeliklerde dislokasyon iyileşmesi ve katı çözünürlük teorileri açısından incelenerek önceki çalışmaların, Co'nun krom (Cr) ayrılmasını teşvik ederek çeliğin korozyon direncini zayıflattığını göstermektedir (Tian vd., 2023).

Martensitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, ultra-düşük karbon martensit latlarında dağılmış nanoskopik fazların basit ısıtma işlemleriyle çökeltilmesiyle yüksek mukavemet ve plastisite kombinasyonu sunmaktadır. Ayrıca, yüksek kalitede kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci ile bu çelikler, nükleer tesisler, tıbbi cihazlar, türbin kanatları ve uçaklar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer kaplama teknolojisiyle ilgili araştırmalar 17-4 PH ve 15-5 PH alaşımlarına odaklanmakta, lazer gücünün 400 W ile 9000 W arasında, toz besleme hızının ise 6 g/dak ile 30 g/dak arasında olduğu görülmektedir. Ancak, düşük lazer gücü ve toz besleme hızları üretim hızını sınırlamakta (36–154 mm³/s) ve mevcut çalışmalar daha çok ısıtma işleminin mikro yapı ve çökelme sertleşmesine etkilerine yoğunlaşmaktadır.

Bununla birlikte, lazer kaplama katmanlarının gerilim ve stres korozyon direnci gibi performans kriterleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması, bu alandaki önemli bir araştırma eksikliğine işaret etmektedir (X. Liu vd., 2024).

Şekil 2.3 (a1) -(a2) ve (b1)-(b2)'de sırasıyla 0Cr12Ni9A ve 0Cr17Ni4Cu4Nb kaplama katmanlarının ısıtılma işlem öncesi ve sonrası SEM mikro yapı morfolojileri gösterilmektedir. Mikro yapılarda birleşme eksikliği, gözenek veya çatlak gibi kusurlar bulunmamakta, bu da HPLC yöntemiyle yoğun martensitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik kaplama katmanlarının elde edilebileceğini göstermektedir. Isıl işlem öncesi AD 0Cr12Ni9A ve AD 0Cr17Ni4Cu4Nb kaplama katmanları, ısı akışı yönüne paralel kolonlu taneler içermekte ve matriste sınırlı miktarda δ ferrit yapıları bulunmaktadır. Bu durum, lazer kaplama sürecindeki yüksek soğuma hızından kaynaklanmaktadır. Isıl işlem sonrasında, bu kolonlu yapı ve δ ferrit kaybolarak, ince martensit lamlardan oluşan yoğun bir mikro yapı ortaya çıkmaktadır. HT 0Cr17Ni4Cu4Nb yapısında, HT 0Cr12Ni9A'ya kıyasla daha fazla austenit blokları bulunmaktadır. Şekil 2.3 (c) ayrıca, dövülmüş 0Cr13Ni5Mo alt tabakasında düzenli martensit lamların yanı sıra az miktarda austenit bloklarının bulunduğunu göstermektedir (X. Liu vd., 2024).



Şekil 2.3. Kplama katmanlarının ve alt tabakanın mikro yapıları: (a1-a2) sırasıyla AD 0Cr12Ni9A ve HT 0Cr12Ni9A kaplama katmanları; (b1-b2) sırasıyla AD 0Cr17Ni4Cu4Nb ve HT 0Cr17Ni4Cu4Nb kaplama katmanları; (c) 0Cr13Ni5Mo alt tabakası (X. Liu vd., 2024)

2.2. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Davranışı

Çevresel koşullardaki değişiklikler, birçok metalik malzemenin zamanla korozyon etkilerine karşı direnç göstermesini beklerken, bu direnç malzeme türüne göre farklılık göstermektedir. Korozyon, bir malzemenin direnç sınırı aşıldığında başlamaktadır. Bu nedenle, malzeme bilimciler ve korozyon uzmanları, malzeme yüzeyini bozulma ve korozyondan korumak için yüzey işleme yöntemleri, kaplamalar ve diğer teknikler üzerinde yoğun çalışmalar yapmaktadır. Korozyon davranışı, malzemenin sadece agresif bir ortama maruz kaldığında (polarizasyon) veya hem çekme gerilmesi hem de korozyon reaksiyonunun etkisiyle (gerilim korozyon çatlaması-SCC) incelenebilir. Metal malzemelerin korozyon direnci, çeşitli elektrokimyasal testler aracılığıyla değerlendirilebilir. Bu testler arasında açık devre potansiyeli (OCP) çalışmaları, potansiyodinamik ve potansiyostatik polarizasyon analizleri, akım-zaman geçiş (CTT) çalışmaları ve çift logaritmik grafiklerin yer aldığı incelemeler, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizi, Nyquist grafikleri, Bode empedansı ve faz açısı ölçümleri bulunmaktadır. Ayrıca, pasif filmin yarı iletken özelliklerini belirlemek amacıyla Mott-Schottky analizi de korozyon direncinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Korozyon davranışı, bir malzemenin agresif bir korozyon ortamında maruz kaldığında (polarizasyon) veya hem çekme gerilmesi hem de korozyon reaksiyonunun etkisi altında (gerilim korozyon çatlaması-SCC) incelenebilir. Bu yöntemler, malzemenin korozyon direncini derinlemesine anlamak ve geliştirmek önemlidir (Olugbade, 2022).

2.3. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel Özellikleri

Paslanmaz çelikler, türlerine bağlı olarak farklı fiziksel özellikler sergilemektedirler. Tablo 2.6'da farklı paslanmaz çelik türlerine ait bazı fiziksel özellikleri karşılaştırılmaktadır. Özellikle östenitik, martensitik ferritik ve çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çeliklerin elastisite modülü, ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, ısı genleşme katsayısı, manyetik geçirgenlik ve ergime aralığı gibi özellikleri gösterilmiştir. Elastisite modülü, östenitik paslanmaz çeliklerde 195 GPa, ferritik paslanmaz çeliklerde 200 GPa, martensitik paslanmaz çeliklerde ise 200 GPa olarak ölçülmüştür. Yoğunluk değeri, tüm paslanmaz çelik türlerinde benzer olup, 7.8

g/cm^3 ile 8.0 g/cm^3 arasında değişmektedir. Isıl genleşme katsayısı, östenitik paslanmaz çeliklerde $16.6 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$, ferritik paslanmaz çeliklerde $10.4 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ ve martensitik paslanmaz çeliklerde $10.3 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir (Türkyilmazoğlu, 2006).

Isıl iletkenlik, ferritik paslanmaz çeliklerde en yüksek değer olan 25.1 W/mk ile öne çıkarken, martensitik paslanmaz çeliklerde bu değer 24.2 W/mk ve östenitik paslanmaz çeliklerde 15.7 W/mk olarak ölçülmüştür. Özgül ısı kapasitesi, östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerde $460 \text{ J/k}^\circ\text{C}$ olarak belirlenmişken, martensitik ve çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çeliklerde de aynı değeri, yani $460 \text{ J/k}^\circ\text{C}$ 'yi göstermektedir. Elektriksel direnç değeri, ferritik paslanmaz çeliklerde $61 \mu\Omega\text{cm}$, martensitik paslanmaz çeliklerde $80 \mu\Omega\text{cm}$, östenitik paslanmaz çeliklerde ise $74 \mu\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Manyetik geçirgenlik, östenitik paslanmaz çeliklerde 1.02, ferritik paslanmaz çeliklerde 600-1100, martensitik paslanmaz çeliklerde 700-1000 ve çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çeliklerde ise 95 olarak belirlenmiştir. Ergime aralığı östenitik paslanmaz çeliklerde $1375\text{-}1450^\circ\text{C}$, ferritik ve martensitik paslanmaz çeliklerde $1425\text{-}1530^\circ\text{C}$, çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çeliklerde ise $1400\text{-}1440^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Bu özellikler, her bir çelik türünün farklı uygulamalardaki performansını belirleyen temel parametrelerdir (Türkyilmazoğlu, 2006).

Tablo 2.6. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler (Türkyilmazoğlu, 2006)

Fiziksel Özellikler	Östenitik Paslanmaz Çelikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Martensitik Paslanmaz Çelikler	Çökelme ile Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm^3)	8.0	7.8	7.8	7.8
Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$)	16.6	10.4	10.3	10.8
Isıl İletkenlik (W/mk)	15.7	25.1	24.2	22.3
Özgül Isı Kapasitesi ($\text{J/k}^\circ\text{C}$)	50	460	460	460
Elektriksel Direnç ($\mu\Omega\text{cm}$)	74	61	80	80
Manyetik Geçirgenlik	1.02	600–1100	700–1000	95
Ergime Aralığı ($^\circ\text{C}$)	1375–1450	1425–1530	1425–1530	1400–1440

2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Östenitik paslanmaz çelikler, üretim yöntemleri ve çevresel koşullara bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermektedir. UNS S17400 paslanmaz çeliğinin eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmesi, geleneksel yöntemlere kıyasla anizotropik özellikler ve daha düşük tekrarlanabilirlik sunarken, gerilim giderme amaçlı uygulanan ısıtılı işlem, malzemenin çekme dayanımını ve akma davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Luecke & Slotwinski, 2014). Yüksek sıcaklıklara maruz kalma durumu, S304 paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerini kayda değer biçimde değiştirdiği, özellikle 1000 °C'ye kadar ısıtılıp suyla soğutulan numunelerde akma geriliminde %29'a varan azalmaların olduğu belirtilmiştir (Ganem vd., 2023). X6CrNiTi18-10 türü ostenitik paslanmaz çelik, belirli akma dayanımı eşiklerinin altındaki gerilim koşullarında 600 °C'ye kadar sürünme direnci göstermiştir. Bu çeliğin yorulma dayanımı üzerine yapılan testler sonucunda, 434,33 MPa olarak belirlenen bir yorulma sınırı elde edilmiştir (Brnic vd., 2016). Tablo 2.7'de farklı kalitedeki çelik türlerinin mekanik özellikleri gösterilmiştir (Shareef vd., 2024).

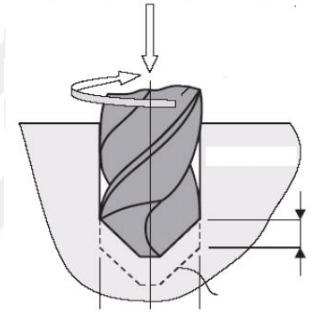
Tablo 2.7. Farklı Çelik Kalitelerinin Mekanik Özellikleri (Shareef vd., 2024)

Paslanmaz Çelik Türü	A36	303	304	316	416
Mekanik Özellikler					
Yoğunluk (kg/m ³)	7.850	8.030	8.000	8.000	7.800
Akma Gücü (MPa)	250	415	215	2.15	275
Çekme Dayanımı (MPa)	550	750	505	505	515
Kesme Modülü (MPa)	79.300	77.200	86.000	86.000	83.000
Elastisite Modülü (MPa)	200.000	193.000	200.000	200.000	200.000
Poisson Oranı	0,26	0,25	0,29	0,29	0,2
Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	343	1455	870	760	650

3. DELİK DELME

3.1. Delik Delme İşlemleri

Delik delme işlemi, talaşlı imalatta talaş kaldırma işlemleri arasında delme ve yüzey işleme yöntemleri en yaygın uygulama alanlarına sahiptir. Şekil 3.1’de gösterilmiş olan kesici takımın hem kendi eksenini etrafında dönerek hem de eksen doğrultusunda ilerleyerek talaş kaldırması esasına dayanmaktadır. Günümüzde delik delme işlemi, talaşlı imalat süreçlerinde önemli bir yere sahip olup, bu yöntemle yapılan işlemler, toplam talaşlı imalat uygulamalarının yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır. Matkapla delik delme sırasında talaşın uzaklaştırılması, derinlik artışıyla oluşabilecek hız kayıpları, homojen ısı dağılımı ve kesici kenarın aşınması gibi unsurlar dikkate alınmalıdır (Ekmen, 2021).

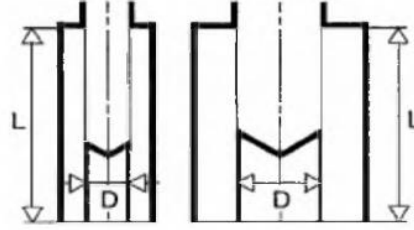


Şekil 3.1. Delik delme işlemi (Demirbaş, 2023)

Tek ağızlı takımlarla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri (örneğin, planlamaya ve tornalama) ile matkapla talaş kaldırma işlemleri arasında temel prensipler açısından bir fark bulunmamaktadır. Ancak, delik delme süreci incelendiğinde, kesme sıvısının uygulanmasının ve talaşın uzaklaştırılmasının daha zor olduğu, matkapla işlenen yüzeyler ile talaş ve helis kanalları arasında daha yüksek düzeyde sürtünme meydana geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca, matkap kesici kenarı boyunca talaş açısının değişkenlik göstermesi, farklı kesme koşullarına yol açmaktadır. Bu faktörler dikkate alındığında, matkapla talaş kaldırma işleminin, tek ağızlı takımlarla gerçekleştirilen işlemlere kıyasla çok daha karmaşık ve zorlu koşullarda gerçekleştiği sonucuna varılabilir (Ekmen, 2021).

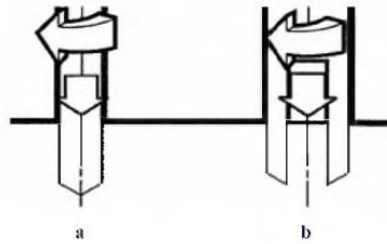
Delik delme işleminin kontrolü ve talaşın uzaklaştırılması, delik derinliği arttıkça daha zor hale gelmektedir. Derin delik delme işlemlerinde delik ve iç yüzey kalitesi ön planda iken, normal deliklerde ekonomik bir işlem elde etmek amacıyla

yüksek talaş debilerinde çalışma önem kazanır. Derin ve normal delik delme işlemleri arasındaki fark yalnızca çap ve derinlik ilişkisiyle sınırlı değildir; bu iki işlem kalite, talaş debisi ve talaşın tahliyesi gibi parametreler açısından da farklılık göstermektedir (Ekmen, 2021).



Şekil 3.2. Delik çapı ve boyu ilişkisi (Ekmen, 2021)

En fazla kullanılan delik delme yöntemi, belirli bir çapta yekpare bir kesici takım kullanarak malzemenin tek seferlik operasyonda delinmesidir (Şekil 3.3.a). Büyük çaplı deliklerde ise, çevreden kesme yöntemi kullanılır; bu yöntem, daha az güç gerektirir ve genellikle ön delik delme işleminden sonra uygulanır (Şekil 3.3.b). Ayrıca, delik toleransı ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla delik delme işlemi sonrasında delik büyütme işlemi yapılabilir. Bu işlem, hassasiyet gerektiren bir yöntem olup, asimetrik takımların kullanılması durumunda, önceden delinmiş deliklerin takımın eğilmesine ve düzensiz deliklerin oluşmasına sebep olacaktır (Ekmen, 2021).



Şekil 3.3. Delme işlemleri, a) tek seferde delme işlemi, b) ön delikten sonra yapılan delme işlemi (Ekmen, 2021)

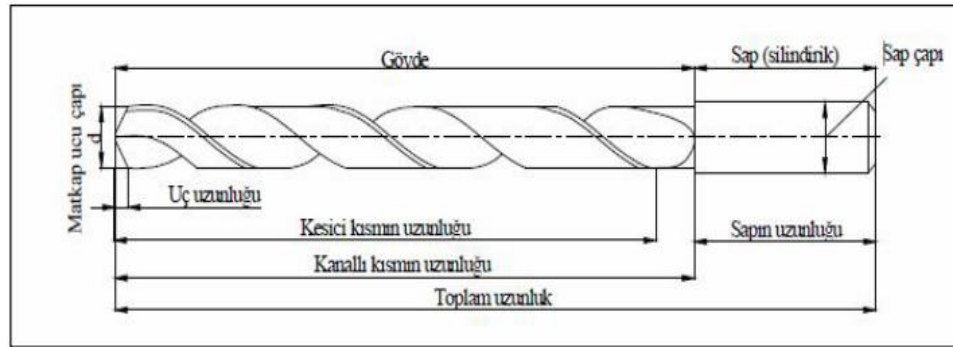
3.2. Delme Takımları

Talaşlı imalat süreçlerinde delik delme işlemleri için kullanılan kesici takımlar "matkap" olarak adlandırılmakta olup, talaşlı imalat uygulamalarında en yaygın kullanılan kesici takımlar arasında yer almaktadır. Metal işleme uygulamaları için

farklı tiplerde matkaplar geliştirilmiş olup, her bir matkap türü belirli bir işlem ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır.

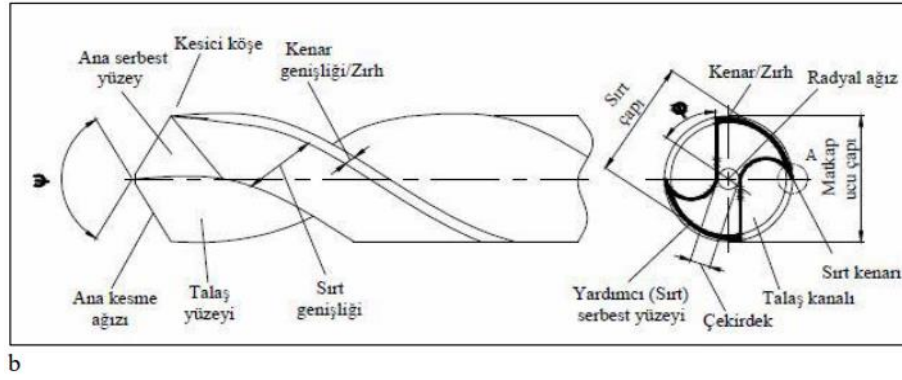
Matkaplar, genel olarak sap ve gövde olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır (Şekil 3.4- Şekil 3.5). Sap bölümü, matkabın tutucuya bağlandığı kısmı temsil etmekte ve konik ya da silindirik bir forma sahip olabilmektedir. Talaş kanallarının yer aldığı gövde kısmı, sapla kaynaklı ya da tek parça halinde üretilmektedir. Bazı matkap tasarımlarında, sap ile gövde arasında "boyun" olarak adlandırılan bir bağlantı bölgesi de bulunmaktadır.

Delme işlemi sırasında kesme işlemi, matkap ucunda gerçekleşmektedir. Bu uç, genellikle iki veya üç kesici ağız içermekte olup, her bir ağız kendine özgü bir talaş yüzeyi ve serbest yüzey ile tasarlanmıştır. Kesici ağızların oluşturduğu konik yapı, tamamen sivri bir forma sahip değildir; bu yapının merkezinde, "çekirdek" olarak adlandırılan yassı bir alan bulunmaktadır. Çekirdeğin uç genişliği, enlemesine kesici kenarı oluştururken, uç kısmındaki konik yüzey serbest yüzey olarak işlev görmektedir. İki talaş kanalı arasında kalan yüzeyler "sırt" olarak adlandırılırken, sırt boyunca uzanan helisel yüzey "zırh" olarak tanımlanır. Zırhın talaş kanalına bakan kısmı ise yardımcı kesici kenar olarak görev yapmaktadır (Üstün, 2019).



a

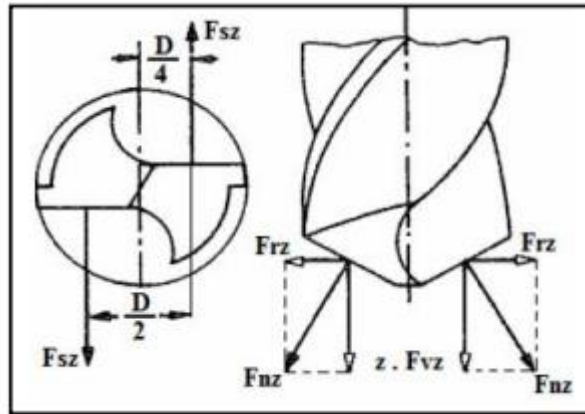
Şekil 3.4. Matkap şekli a) Matkapların ana kısımları (Üstün, 2019)



Şekil 3.5. Matkap şekli b) Matkapların kesici kısımları (Üstün, 2019)

3.2.1. Delme İşleminin Mekanik Özellikleri

Kesme kuvveti, bir malzemenin işlenebilirliğini belirleyen önemli parametrelerden biridir. İşleme sürecinde, genellikle düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Kesme kuvvetleri, işlenmiş yüzeyin kalitesini etkileyebilmekle birlikte, aynı zamanda kesici takımın ömrü üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Kesme momentindeki artış, kesici takım ile malzeme arasındaki etkileşim sonucunda meydana gelen ısının yükselmesine yol açmaktadır. Kesici matkabın bir kesici ağzında, bu bölgede ilerleme kuvveti (F_{vz}), radyal kuvvet (F_{rz}) ve kesme kuvveti (F_{sz}) ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.6) (Bayraktar vd., 2017).



Şekil 3.6. Kesici ucu etkileyen kuvvetlerin gösterimi (Bayraktar vd., 2017)

Kesici uç, konumu itibarıyla her bir ağızda oluşan radyal kuvvetleri dengelemektedir. Bu nedenle, delme işlemi sırasında esas olarak F_{sz} ve F_{vz} kuvvetleri etkili olmaktadır (Bayraktar vd., 2017) .

İki ağızlı bir matkap için meydana gelen kesme kuvveti şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_s = zF_{sz} = 2F_{sz} = ds_z k_s = \frac{ds}{2} k_s \text{ (Nm)} \quad (3.1)$$

Burada k_s , kesme işleminde malzemenin kesilmesine karşı gösterdiği direnç olan özgül kesme kuvvetini ifade etmektedir. İki ağızlı matkapta oluşan toplam kesme momenti şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_s = 2F_{sz} \quad \text{(Nm)} \quad (3.2)$$

$$M_s = zF_{sz} \frac{d}{4} = 2F_{sz} \frac{d}{4} = F_s \frac{d}{4} \quad \text{veya} \quad (3.3)$$

$$M_s = \frac{d^2 s k_s}{8 \cdot 10^3} \quad \text{(Nm)} \quad (3.4)$$

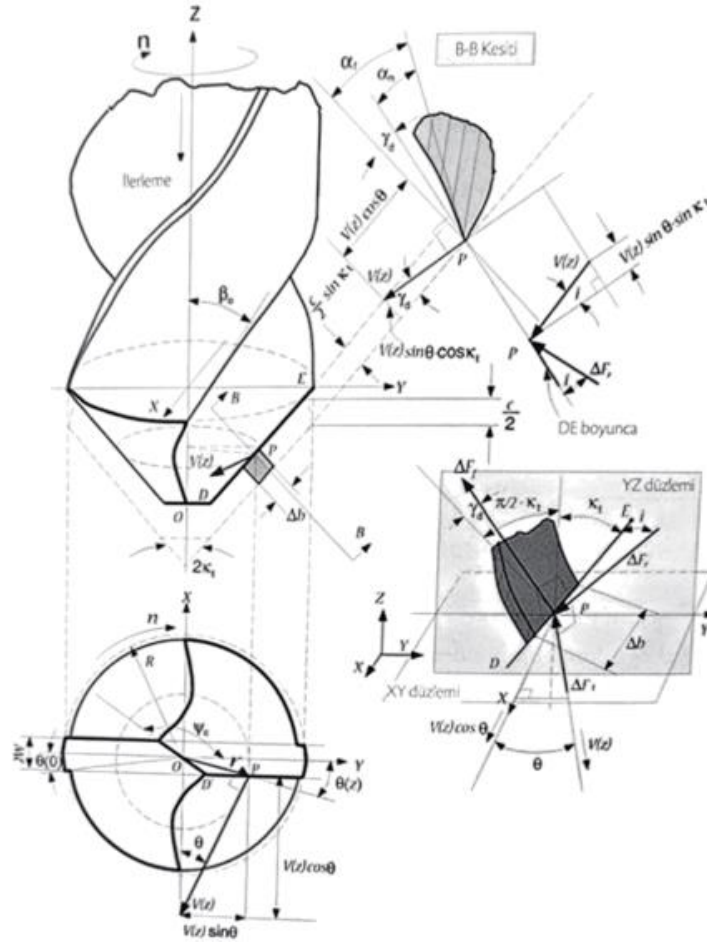
Matkabı iş parçasına daldırmak için gereken itme kuvveti, matkaba ve iş miline uygulanan torku belirlemek amacıyla delme mekaniği çerçevesinde incelenmelidir. Delme mekaniği, uç ağız ve kesici ağızlar için benzer şekilde ele alınmalıdır. Radyal ağız, malzemeyi kesme işlemi gerçekleştirmez; bunun yerine batma (indentation) mekanizması aracılığıyla malzemeyi kenarlara yönlendirir. Bu durumda, kesme yasaları yerine batma mekaniği dikkate alınmalıdır. Eğer işlem, sertlik testi olarak basitleştirilirse, radyal ağza etki eden itme kuvveti şu şekilde ifade edilebilir (Altıntaş, t.y.).

$$\text{Itme Kuvveti } i = F_{z,i} = A_{ch} H_B \quad (3.5)$$

Burada, H_B malzemenin Brinell sertliğini, A_{ch} ise uç ağzın anlık iz alanını temsil eder. A_{ch} uç ağız uzunluğunun $(2\omega/\sin(\theta-\Psi))$ ve yayılan malzemenin kesici ağızla temas uzunluğunun $(c/2\cos\gamma)$ çarpımıyla hesaplanır. Radyal ağzların her iki yanının temasta olduğu kabul edilerek, indentasyon temas alanı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

$$A_{ch} = \frac{2-\omega c}{\sin(\Pi-\psi)} \cos K_t \quad (3.6)$$

Radyal ağız kuvvetinin indentasyon metodu ile belirlenmesi, hassas analizler için güvenilir bir sonuç vermez. Radyal ağız geometrisi ve indentasyon mekaniği karmaşık olup, doğru sonuçlar elde edebilmek için detaylı geometrik modelleme ve ampirik faktörlerin deneysel kalibrasyonu gerekmektedir. Son yıllarda, takım üreticileri radyal ağız geometrisini, dalma esnasında iş yüzeyinde kayma meydana gelmeyecek şekilde geliştirmiştir. Pratik bir yaklaşım olarak, radyal ağız kuvveti, kesici ağız kuvvetlerinin %10-15'i kadar kabul edilmekte ve tork, uç ağız genişliği (2ω) kısa olduğundan dolayı ihmal edilebilmektedir (Altıntaş, t.y.).



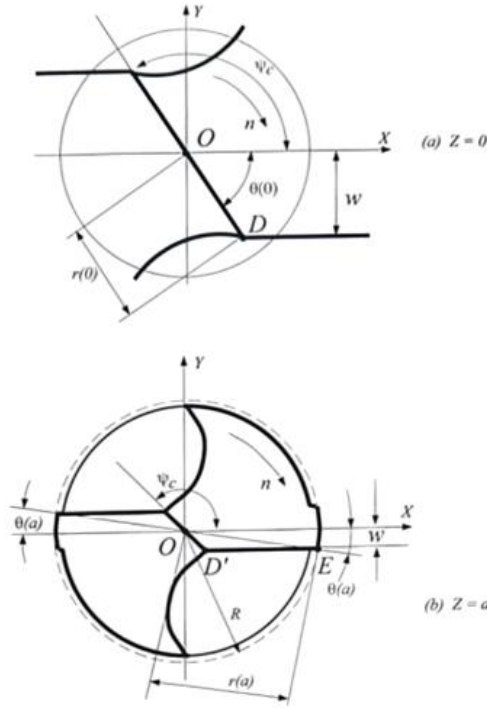
Şekil 3.7. Burgulu matkabın mekanik modeli (Altıntaş, t.y.)

Matkabın kesici ağız geometrisi oldukça karmaşıktır. Dik kesmeden eğik kesmeye dönüşüm yapabilmek için, kesici ağız boyunca helis açısı, normal talaş açısı ve eğik (oblik) açılarının belirlenmesi gerekmektedir. Radyal ağızdan kaynaklanan ötelenme ve değişen çap nedeniyle, radyal ağız-kesici ağız ile kesici ağız-kanal kesişim bölgeleri arasındaki alanda helis, normal talaş ve eğik açıları değişkenlik gösterir. Eğik kesme modelini açıklamak amacıyla Şekil 3.7’de gösterilen matkap

geometrik modeli kullanılmıştır. Matkap eksenine, z eksenine hizalanmıştır. X eksenine paralel olan kesme ağızları, uç ağızdan ötürü matkap ekseninden ötelenmiş ve kesici ağza dik olan eksen merkez noktası O , matkap ucunda yer alan Kartezyen koordinat sisteminde y eksenine paralel hizalanmıştır. İlk olarak, kesici ağızların radyal ağızla birleştiği alt kısmı (yani $z=0$ düzlemi) ele alınır. Radyal ağızdan kaynaklanan ötelenme, ω ve uç ağız açısı Ψ_c ile temsil edilmektedir (Şekil 3.8’de detaylar gösterilmiştir). Matkap merkezi ile radyal ağız ve kesici ağızların birleştiği nokta arasındaki mesafe ise belirli bir değeri ifade eder (Altıntaş, t.y.).

$$r(0) = \frac{\omega}{\sin(\pi - \psi_c)} \text{ ve koordinatları } x(0) = r(0) \cos(\pi - \psi_c), y(0) = w, z=0.$$

(3.7)



Şekil 3.8. Burgulu matkabın kesici ağız ve radyal ağız bölgesinin üst görünüşü (Altıntaş, t.y.)

Kesici ağız ve helisel ağız, $z=\alpha$ yüksekliğinde matkap çapı R değerinde kesişmektedir (Şekil 3.8). Kesici ağzın dış ucu ile matkap merkezi arasındaki radyal mesafe $r(a)=R$ olarak ifade edilmekte olup, bu noktaya ait koordinatlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Burada R , matkap çapını temsil etmektedir (Altıntaş, t.y.).

$$x(a) = R \cos \theta(a), \quad \theta(a) = \sin^{-1}(w/R) \quad (3.8)$$

$$y(a) = \omega, \quad z = a,$$

Kesici ağzın $z=a$ yüksekliğinde xy düzlemine olan izdüşüm uzunluğu şu şekilde ifade edilir:

$$\overline{D'E} = \overline{DE} \sin Kt = b \sin Kt, \quad (3.9)$$

Burada $b=\overline{DE}$, kesici ağız tarafından iş parçasından kaldırılan malzeme uzunluğunu ifade etmektedir. Helisel açının kesici ağız boyunca değişiklik göstermesine rağmen, matkap nominal helisel açısı (β_a), silindirik bölgedeki ($r(a)=R$) kanallardan şu şekilde belirlenmektedir:

$$\tan \beta_0 = \frac{2\pi R}{L_p} \quad (3.10)$$

Burada, L_p helisin sabit adım uzunluğudur.

Kesme ağzındaki $P(x,y,z)$ noktası, Şekil 3.6 gösterilmiştir. Kesici ağzın z yüksekliğindeki xy düzlemine izdüşümü, $\overline{D^1P} = z \tan k_t$ ile ifade edilmektedir. Matkap merkezi ile P noktası arasındaki radyal uzaklık şu şekilde hesaplanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

$$r(z) = \sqrt{y(0)^2 + [x(0) + \overline{D^1P}]^2} = \sqrt{w^2 + [w \cot(\pi - \psi_c) + z \tan \kappa_t]^2} \quad (3.11)$$

Bu noktadaki koordinatlar, aşağıdaki ifadelerle temsil edilir:

$$x(z) = r(z) \cos(\theta(z)), \quad y(z) = r(z) \sin(\theta(z)). \quad (3.12)$$

Kesici ağzın herhangi bir P noktasındaki bölgesel helis açısı $\beta(z)$ ise:

$$\beta(z) = \frac{2\pi r(z)}{L_p}. \quad (3.13)$$

Her z yüksekliği için helis açısı farklı bir değere sahip olmaktadır. Kesme hızı (V), matkap çapına $r(z)$ dik olarak xy düzlemindeki bileşenlere ayrıştırılır. Bu bileşenler aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Altıntaş, t.y.).

$$V_x(z) = V \cdot \cos \theta(z), \quad V_y(z) = V \cdot \sin \theta(z). \quad (3.14)$$

Kesme hızının, koniklik açısı (κ_t) olan kesme ağzına izdüşümü aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

$$V_t = V_y \sin \kappa_t = V \sin \theta(z) \sin \kappa_t \quad (3.15)$$

Kesme hızının eğik açısı (i), kesme hızı ile kesme ağzına dik hız arasındaki ilişkiyle belirlenir (Altıntaş, t.y.).

$$\sin i = \frac{V_t}{V} = \sin \theta(z) \sin \kappa_t \quad (3.16)$$

Kesme mekaniği, kesme ağzına dik olan düzlemde tanımlanmaktadır. Kesme ağzına dik düzlemde, P noktası dikkate alındığında, kesme hızı (V), konik kesme ağzına dik bileşene $v_y(z) \cdot \cos \kappa_t$ ve V_y 'ye paralel bileşene ayrılır. Bu iki hız bileşeni arasındaki açı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

$$\tan \gamma = \frac{V_y \cos \kappa_t}{V_x} = \tan \theta(z) \cos \kappa_t \quad (3.17)$$

Efektif talaş açısı (α_f), kesici ağız üzerinde bulunan ve kesme hızı yönündeki bir noktanın diferansiyel izdüşümü ile aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

$$\tan \alpha_f = \frac{\tan \beta(z) \cos \theta(z)}{\sin \kappa_t - \tan \beta(z) \sin \theta(z) \cos \kappa_t} \quad (3.18)$$

Normal talaş açısı (α_n), geometrik bir bağıntıyla şu şekilde elde edilir:

$$\alpha_n = \alpha_f - \gamma_d \quad (3.19)$$

Matkap geometrisinin karmaşık yapısına rağmen, tanımlanan geometrik bağıntılar yardımıyla kesici ağızda oluşan kesme kuvvetleri hesaplanabilmektedir. Kesici ağzın dz yüksekliğindeki ve db genişliğindeki diferansiyel elemanlara ayrılması durumunda, her bir diferansiyel kesici ağız tarafından kaldırılan talaş miktarı aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Altıntaş, t.y.).

$$dA(z) = \Delta b \cdot h. \quad (3.20)$$

Bu ifade içerisinde, talaş kalınlığı (h) ve talaş genişliği (Δb) sırasıyla şu denklemlerle tanımlanmıştır (Altıntaş, t.y.).

$$h = \frac{c}{2} \sin \kappa_t, \quad \Delta b = \frac{dz}{\cos \kappa_t} \quad (3.21)$$

Kesme hızına paralel doğrultudaki teğetsel talaş akışı ve radyal yönlerdeki kesme kuvvetleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Altıntaş, t.y.).

$$dF_t(z) = K_{tc}(z) dA + K_{te}\Delta b \quad (3.22)$$

$$dF_f(z) = K_{fc}(z) dA + K_{fe}\Delta b \quad (3.23)$$

$$dF_r(z) = K_{rc}(z) dA + K_{re}\Delta b \quad (3.24)$$

Değişken helis, talaş kalınlığı ve eğik açı gibi faktörler, kesme kuvveti katsayılarının, z yüksekliğindeki her bir eleman için farklı olmasına neden olmaktadır. Kenar katsayıları κ_{tc}, κ_{fc} ve κ_{re} , deneysel olarak belirlenmektedir. Ayrıca kesme kuvveti katsayıları κ_{tc}, κ_{fc} ve κ_{re} tanımlanan eğik dönüşüm aracılığıyla hesaplanmaktadır (Altıntaş, t.y.).

Kesme kuvveti bileşenleri (dF_t, dF_f, dF_r), Şekil 3.9'da tanımlanan x, y, z yönlerinde şu şekilde ifade edilmektedir (Altıntaş, t.y.).

$$\begin{aligned} dF_x(z) &= dF_t \sin \gamma_d - dF_t \cos \theta - dF_r \sin i, \\ dF_y(z) &= dF_r (\sin i \sin \gamma_d \cos \kappa_t) - dF_t (\cos \gamma_d \cos \kappa_t) - dF_r (\sin \theta), \\ dF_z(z) &= dF_t (\cos \gamma_d \sin \kappa_t) - dF_r [\cos i \cos \kappa_t - \sin i \cdot \sin \gamma_d \sin \kappa_t]. \end{aligned} \quad (3.25)$$

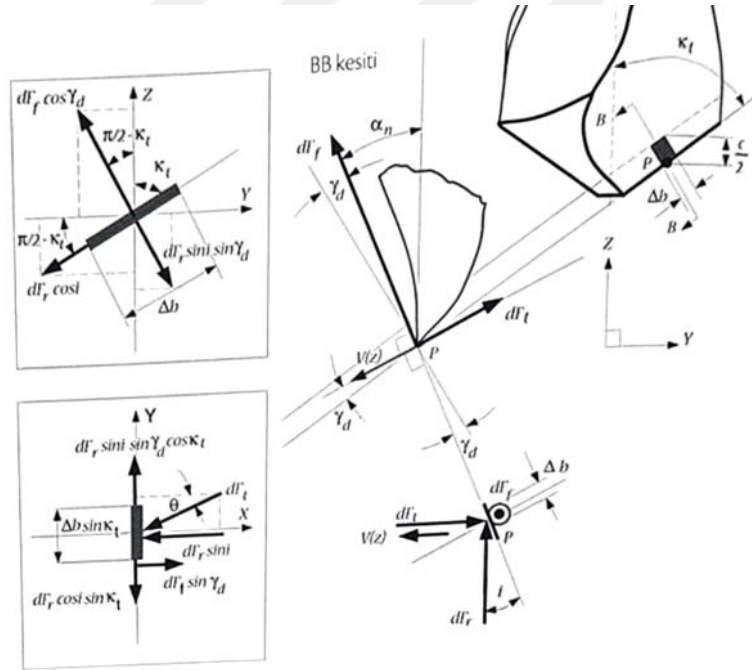
Matkaba uygulanan toplam itme kuvveti ve tork, tüm $M=b/\Delta b=b \cos k/dz$ kesici ağız elemanlarının toplam etkileri dikkate alınarak hesaplanmaktadır. İki kesici ağızda oluşan itme kuvveti ve tork şu şekilde belirlenebilir (Altıntaş, t.y.).

$$\begin{aligned} \dot{I} \text{ TME KUVVET}_{ii} &= 2 \sum_{m=1}^M dF_z(z), \\ \text{TORK}_{ii} &= 2 \sum_{m=1}^M dF_t(z) \cdot r(z). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Toplam itme kuvveti, radyal ağız ve kesici ağızların etkilerinin toplamı olarak hesaplanır (Altıntaş, t.y.).

$$\dot{I} \text{ TME KUVVET} = \dot{I} \text{ TME KUVVET}_i + \dot{I} \text{ TME KUVVET}_{ii} \quad (3.27)$$

Radyal ağzın ürettiği tork, genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Delme mekaniğini karmaşıklaştıran temel faktör, helisel matkap geometrisinin modellenmesindeki zorluklardır. Helisel matkapların taşlanması, uç ağzı ve kesici ağız geometrisinin hassas bir şekilde modellenmesi önemlidir. Ayrıca, talaş helisi ve serbest yüzey açıları da doğru şekilde modellenmelidir. Çünkü bu parametreler, kesme sürecinin dinamiklerini, titreşimleri ve takım aşınma oranlarını doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir (Altıntaş, t.y.).



Şekil 3.9. Delme kuvvetlerinin yönü (Altıntaş, t.y.)

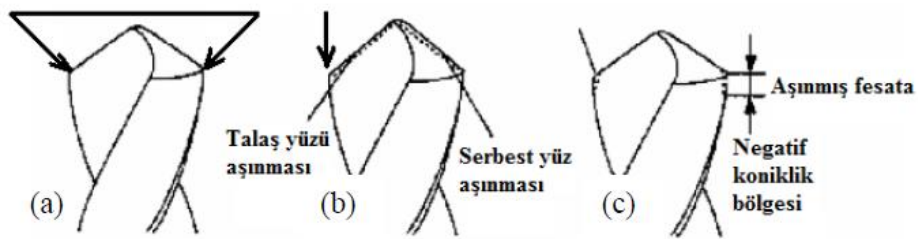
3.2.2. Takım Ömrü ve Takım Aşınması

Tüm kesici takımlar, talaş kaldırma işlemleri sırasında aşınır ve bu aşınma, takım ömrü sona erene kadar devam etmektedir. Takım aşınması, kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin etkisiyle meydana gelerek kesici takım geometrisinin bozulması, üretilen parçanın istenen yüzey kalitesini sağlayamaması ve yeni takıma

göre artan kesme gücü ihtiyacı, takımın aşındığını göstermektedir. Kesici kenar ömrü, mekanik, termal, kimyasal ve aşındırıcı yüklerin etkisiyle şekillenen bir parametredir. Talaş kaldırma işlemleri sırasında, kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin etkisiyle farklı aşınma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Bu mekanizmalar;

- Aşındırıcı (abraziv) aşınma
- Difüzyon kaynaklı aşınma
- Oksidasyon sonucu oluşan aşınma
- Yorulma kaynaklı aşınma (statik ve dinamik)
- Yapışma (adeziv) yoluyla aşınma

Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin en uygun hale getirilmesi, takım ömrü ve işleme verimliliği açısından önemlidir. Kesme parametrelerindeki değişiklikler, takım performansını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, ilerleme hızının artırılması helis açısında bir artışa neden olurken, boşluk açısını azaltmaktadır. Boşluk açısındaki bu azalma, takımın ana serbest yüzeyi ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi artırarak serbest yüzey aşınmasının hızlanmasına yol açmaktadır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi matkap takımlarında meydana gelen aşınma, çeşitli şekillerde gözlemlenmektedir. Bunlar arasında köşe yuvarlanması, serbest yüzey aşınması, krater aşınması, kesici kenar ile zırhın birleşim noktasındaki aşınma ve radyal ağız aşınması yer almaktadır (Çobanoğlu, 2021).



Şekil 3.10. Helisel matkapların aşınma mekanizmaları a) Köşelerin yuvarlanması, b) Serbest yüzey aşınması, c) Zırh aşınması (Çobanoğlu, 2021)

Yapılan araştırmalar, takım aşınmasının üretim maliyetleri, verimlilik ve ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Takım aşınmasını etkileyen başlıca faktörler arasında matkap çapı, kesme parametreleri ve iş parçası malzemesi yer almaktadır. Örneğin, GGG40 dökme demir, GG25'e kıyasla daha fazla

aşınmaya yol açmakta ve daha büyük matkap çapları aşınma oranını artırmaktadır (Ertuğrul vd., 2020). Isıl sürtünmeli delme işlemlerinde ise takım koni açısı, matkap çapı ve malzeme kalınlığı, çapak duvar kalınlığı, çapak yüksekliği ve mikro önemli etkiler yaratmaktadır (Özek & Bal, 2020). CFRP/Al-7075 kompozit malzeme delme işlemlerinde, 130° uç açılı karbür matkap, itme kuvveti, tork, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon gibi parametreler açısından daha iyi performans göstermiştir (Aydın & Nalbant, 2020). Molibden ve alaşımlarının frezelenmesi sırasında ise, hızlı takım aşınması gözlemlenmiş, saf molibden yan aşınma gösterirken, TZM ve MHC alaşımları önemli derecede krater aşınması görülmüştür (Gökçe & Çiftçi, 2023).

3.2.3. Delik Delmede Kullanılan Kesme Parametreleri

Kesme kuvvetleri, talaşlı imalat sırasında oluşan değişkenlerden doğrudan etkilenen ve süreçle ilgili önemli bilgiler sağlayan temel parametrelerdendir. Bu kuvvetler, ilerleme hızı, talaş derinliği (radyal ve eksenel), kesme hızı, takım ve talaş geometrisi, iş malzemesi özellikleri, takım-tezgâh dinamikleri, bağlama sistemi, takım aşınması, sıcaklık ve titreşim gibi birçok faktörden etkilenir. Kesme kuvvetleri, takıma etki eden mekanik yükler hakkında önemli bilgiler sunarak işlenebilirliğin değerlendirilmesinde, takım aşınması ve kırılma mekanizmalarının analizinde önemli bir rol oynamakta ve bu kuvvetlerin analizi, talaşlı imalat süreçlerinin optimize edilmesine ve takım ömrünün artırılmasına olanak tanımaktadır (Gök, 2006).

Delik delmede kullanılan başlıca kesme parametreleri;

Kesme Hızı (V): Matkabın iş parçasına göre dönme hızıdır. Genellikle metre/dakika (m/dak) cinsinden ölçülür. Kesme hızı, talaş oluşumunu, iş parçası sıcaklığını ve matkap aşınmasını doğrudan etkilemektedir. Kesme hızı tork üzerinde en etkili faktördür. Kesme hızı arttıkça tork da artmaktadır (Neşeli, 2014). Kesme hızının, belirli bir işleme kurulumunda optimum bir değere sahip olduğu ve bu değer, malzemenin bileşimi, sertliği, ısıl iletkenliği, delik derinliği, kullanılan kesme sıvısının türü, tezgâhın durumu, iş parçası ile takım tutucusunun sertliği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Patel vd., 2014).

İlerleme Hızı (f): Matkabın her devirde iş parçasına doğru besleme miktarıdır. Genellikle milimetre/devir (mm/dev) cinsinden ölçülür. İlerleme hızı, talaş kalınlığını,

itme kuvvetini ve torku etkiler. İlerleme hızı itme kuvveti üzerinde en önemli etkiye sahip faktördür. İlerleme hızı arttıkça, itme kuvveti de artar (Neseli, 2014). İlerleme hızının, istenen yüzey kalitesi, mevcut güç, tezgâhın durumu ve tahriki gibi faktörlere bağlı olarak seçilmesi gerekmektedir (Patel vd., 2014).

Kesme Derinliği (ap): Matkabın her geçişte iş parçasına girme miktarıdır. Genellikle milimetre (mm) cinsinden ölçülmektedir. Kesme derinliği, talaş kaldırma miktarını, itme kuvvetini ve torku etkilemektedir. Kesme derinliğinin önemli bir delme işleme parametresi olduğu ve delme işleminde kesme derinliğinin matkap çapının yarısına eşit olduğu belirtilmektedir (Jangid vd., 2022). Kesme derinliği, dönme hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametreler, yüzey pürüzlülüğü, diklik, silindiriklik ve dairesellik gibi optimum yanıt parametrelerini elde etmek için kullanılabilir (Neseli, 2014).

Helis Açısı (γ): Matkabın talaş oluklarının eksenine göre yaptığı açıdır. Genellikle derece ($^{\circ}$) cinsinden ölçülmektedir. Helis açısı, talaş tahliyesini ve dolayısıyla itme kuvvetini ve torku etkilemektedir. Daha yüksek helis açılarının talaş tahliyesini iyileştirerek itme kuvvetini ve torku azaltmaktadır (Neseli, 2014).

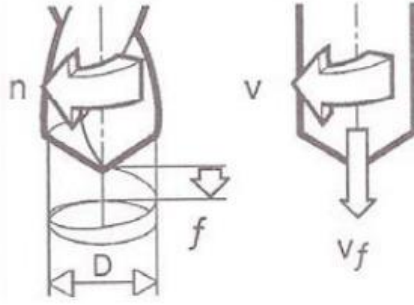
Soğutma Sıvısı: Delme işlemi sırasında ısıyı azaltmak ve talaşları uzaklaştırmak için kullanılan sıvıdır. Soğutma sıvısı, matkap ömrünü uzatır, yüzey kalitesini iyileştirir ve itme kuvvetini ve torku azaltmaktadır. Yüksek besleme hızlarında burcun uzunluğunda bozulma olduğu ve bunun soğutma sıvısı kullanımı ile önlenebileceği belirtilmiştir (Neseli, 2014). İçten soğutmalı takımlar kullanılarak dubleks paslanmaz çeliklerin delinmesi sırasında oluşan takım aşınmaları gözlemlenmiştir (Mavi, 2020).

Delme işlemi, takım veya iş parçası tarafından gerçekleştirilen dönme hareketine dayanan bir ana hareket ile gerçekleştirilir. Bu hareketin bir parçası olan ana mil hızı (n), dakikada yapılan dönüş sayısı olarak tanımlanır. Delme işlemi sırasında kesme hızı (V), çevresel hız esas alınarak belirlenir ve dakikadaki dönüş sayısı bilindiğinde kolaylıkla hesaplanabilir. Takım çapı D olarak alındığında, matkap bir dönüş sırasında çevresi $\pi \times D$ olan bir daire çizmektedir (Şekil 3.10). Eğer çap mm cinsinden ifade ediliyorsa, kesme hızının m/dakika cinsinden hesaplanabilmesi için elde edilen değerin 1000'e bölünmesi gerekmektedir (Kara, 2015).

$$V = \pi \times D \times n / 1000 \text{ (m/dak)} \quad (3.28)$$

İlerleme hızı veya parçaya nüfuziyet hızı (V_f - mm/dak), birim zamanda alınan mesafe olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına veya iş parçasının takıma göre ilerleme hareketini ifade etmektedir (Eşitlik 3.29). Bu hız, tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da adlandırılmaktadır. Devir başına ilerleme (f - mm/dev), ilerleme hız değerini hesaplamak için kullanılan bir parametre olup, takımın veya iş parçasının bir devirde aldığı mesafeyi belirtir (Kara, 2015).

$$V_f = f \times n \text{ (mm/dak)} \quad (3.29)$$



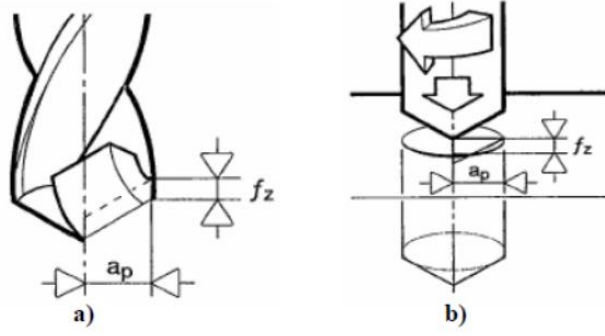
Şekil 3.11. İlerleme hızı ve kesme hızı (Kara, 2015)

Talaş genişliği veya radyal talaş derinliği (a_p - mm), takımın temasta bulunduğu iş parçası yüzeyini ifade eder ve tornalama işlemi gibi, bu değer genellikle yarıçap cinsinden belirlenir (Eşitlik 3.30).

$$a_p = (D-d)/2 \text{ (mm)} \quad (3.30)$$

Birden fazla kesici kenarın bulunduğu durumlarda (z kesici kenar sayısı), talaş kesit alanı (A , mm²), kenar başına ilerleme (f_z , mm/z) dikkate alınarak tanımlanır. Talaş kesit alanı, kesici kenarın kaldırdığı malzeme miktarını ifade eder ve bu değer, radyal talaş derinliği ile kenar başına ilerlemenin çarpımı şeklinde hesaplanır (Şekil 3.12). Bu parametreler temel alınarak talaş debisi (V , mm³/dak) yani birim zamanda kaldırılan talaş hacmi belirlenebilir. Talaş debisi, kesme hızının talaş kesit alanıyla çarpılması sonucu elde edilir (Eşitlik 3.31). Kesme hızının m/dak biriminde hesaplanması durumunda, talaş debisinin mm³/dak biriminde ifade edilebilmesi için hesaplanan değer 1000 ile çarpılmalıdır (Kara, 2015).

$$V = A \cdot V_c \cdot 1000 \text{ (mm}^3 \text{ /dak)} \quad (3.31)$$



Şekil 3.12. a) talaş kesit alanı, b) kesici kenar başına ilerleme (Kara, 2015)

İlerleme uzunluğunun ($L + h$ mm) ilerleme hızına bölünmesiyle efektif işleme süresi (T - dak) elde edilir (Eşitlik 3.33). Takımın ilerlediği toplam uzunluk, delinmiş delik derinliği ile matkap ucu yüksekliğinin toplamına eşdeğerdir (Kara, 2015).

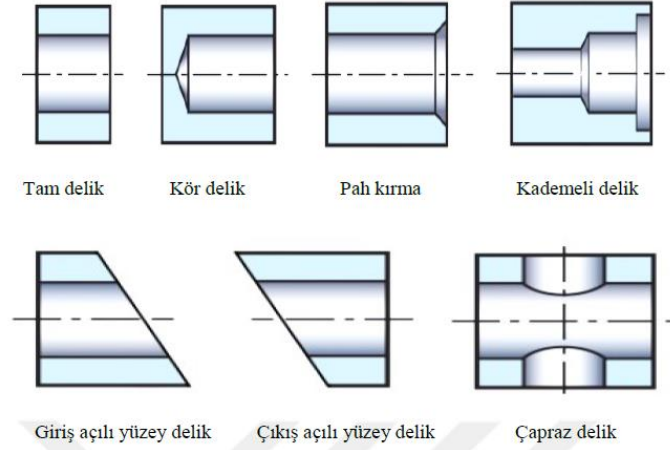
$$h = (D/2) * \cot(\phi/2) \text{ (mm)} \quad (3.32)$$

$$T = (L+h)/V_f \text{ (dak)} \quad (3.33)$$

Bahsedilen kesme parametrelerinin yanı sıra, matkabın uç açısı, kesici kenar geometrisi ve talaş oluşu tasarımı gibi faktörler de delik delme işleminin performansını etkilemektedir. Bu parametrelerin optimum değerleri, iş parçası malzemesi, delik çapı ve istenen yüzey kalitesi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Taguchi yöntemi ve ANOVA gibi istatistiksel analiz teknikleri, optimum kesme parametrelerini belirlemek ve delik delme işlemini optimize etmek için kullanılabilmektedir (Mavi, 2020)(Jangid vd., 2022)(Neseli, 2014)(Patel vd., 2014).

3.3. Delik Tipleri

Delik delme işlemleri, kör delik, tam delik, pah kırma, matkap giriş yüzeyinde açılı delik, matkap çıkış yüzeyinde açılı delik, kademeli delik ve çapraz delik gibi çeşitli türleri içermektedir. Şekil 3.13'te, endüstride yaygın olarak kullanılan bazı delik uygulamaları gösterilmiştir. Ayrıca, özel tasarım gereksinimleri ve hizmet koşullarına göre farklı delik delme uygulamaları da bulunmaktadır. Bu tür uygulamalar arasında büyük çaplı delik delme, derin delik delme ve mikro delik delme gibi işlemler bulunmaktadır (Batman, 2019).



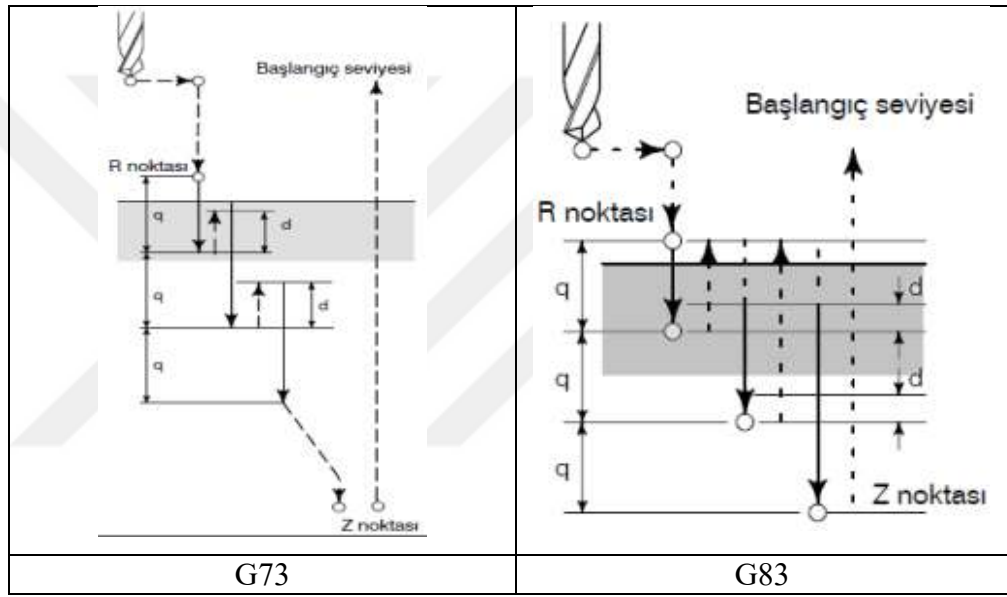
Şekil 3.13. Yaygın kullanılan bazı delik uygulamaları (Batman, 2019)

3.4. Delik Delme Çevrimleri

Delik delme işleminde, en önemli problemlerden biri talaş tahliyesinin zor olmasıdır. Bunun başlıca nedeni, delik delme sırasında üretilen talaşların, tornalama ve frezeleme gibi daha açık alanlarda gerçekleştirilen işlemlere kıyasla, matkap kanalları ve delik duvarı tarafından sınırlandırılıyor olmasıdır. Delik açma işlemi ilerledikçe, matkap kanallarında ve delik duvarında biriken talaşların oluşturduğu basınç ve sürtünme etkisiyle delme kuvveti, delme derinliği ile doğru orantılı olarak hızla artmaktadır. (Han vd., 2018).

Talaşların delikten akıcı bir şekilde çıkmasını sağlamak için genellikle gagalama yöntemi (G83) tercih edilmektedir. Bu yöntemde matkap her seferinde toplan delik derinliğinin bir kısmını kesecek şekilde malzemeye gönderilir. Bu oran işlem verimliliği ve matkap güvenliği açısından kritik bir faktördür. Bu değer çok büyük seçildiğinde, büyük talaş tahliye kuvvetleri nedeniyle matkap kırılabilir; çok küçük seçildiğinde ise gagalama delme sürecinde gereğinden fazla geri çekme hareketi yapılması gerektiğinden, işleme verimliliği düşmektedir. Bu sorunları aşabilmek için, her bir delme adımında delme derinliğini optimize eden, verimliliği maksimize eden ve matkap kırılmasını önleyen etkili bir yöntem geliştirilmesi gerekmektedir (Han vd., 2018). Pratik şartlarda matkap çapının 3 ila 5 katı kadardır. İşlem verimliliğini sağlayabilmek adına yine bu değer matkap çapından daha az değerde olması tercih edilmez. Her kesme seviyesinin sonunda matkap tamamen parçanın dışına çıkartılır.

Matkabın parçanın üst yüzeyinden yaklaşık 1-3mm yukarıya (minimum güvenlik mesafesi çıkarılması tercih edilir. Bu işlem, özellikle delik doğruluğu ve düzgünlüğü önemli olduğunda zorluklar çıkarabilmektedir. Diğer bir yöntem ise talaş kırma delik delme yöntemidir (G73). Gagalama yönteminden farkı ise matkabın her delme seviyesinin sonunda son bulunduğu noktadan bir miktar (yaklaşık 1-2mm kadar) geri çekiliyor olmasıdır. Bu şartlarda işlem süresi kısalmır ve matkabın delik için yüzeyine sürtünme miktarı ve dolayısıyla oluşan ısının azalacaktır. Şekil 3.14'te G73 ve G83 çevrimleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14. (G73) Talaş Kırmalı ve (G83) Talaş Boşaltmalı Delik Delme çevrimlerinin şematik gösterimi

3.5. Delik Kalitesini Etkileyen Faktörler

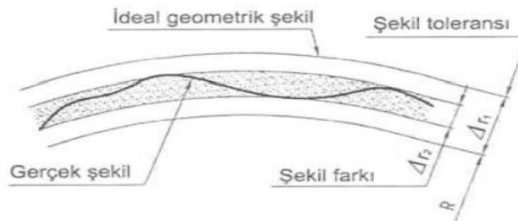
Delik delme işlemlerinde delik kalitesi; delik yüzeyinin hassasiyeti, delik çapının doğruluğu, geometrik doğruluk, işlem süresi ve matkap ömrü gibi parametreler dikkate alınarak, tasarım toleransları doğrultusunda değerlendirilmektedir. Bu süreçte, performansı etkileyen faktörler öncelikli olarak ele alınmakta ve bu faktörlerin seçimi büyük bir titizlikle gerçekleştirilmektedir (Teke, 2024).

3.5.1. Delik Çapı

Delik delme işleminde kullanılan matkap uçları, delinmek istenen çaptan mikron düzeyinde daha küçük toleranslarla ve belirli hassasiyetlerle üretilmektedir. Delik delme sırasında, matkabin titreşimleri, tezgâh dengelemesi, iş mili rijitliği gibi parametreler dikkate alınarak, hedeflenen nominal uç çapına ulaşılması amaçlanır. İşleme maliyetlerini düşürmek, işlenebilirliği artırmak ve ekipman kullanımını en aza indirmek için, deliklerin tek seferde istenen çapta açılması önemlidir. Bu bağlamda, matkap ucu çapının doğru ölçülerde olması büyük önem taşır (Teke, 2024).

3.5.2. Dairesellik

Delik delme işleminde kullanılan matkap ucunun belirli bir çapı ve çap geometrisi vardır. Ancak, genellikle tam daire olarak kabul edilen bu geometrik değerler, aslında belirli hata ve gözle görülemeyen bozukluklar içerir. Bu bozukluklar, delik delme sürecinde delinen delikte dairesellik açısından geometrik bozukluklara neden olur. Şekil farkı toleransı, ideal geometrik şekil toleransından daha küçükse, deliğin geometrik üretim toleransı istenen düzeyde kabul edilebilir. Şekil 3.15'te, gerçek delik ile ideal delik eğrilerinin karşılaştırması gösterilmiştir (Teke, 2024).

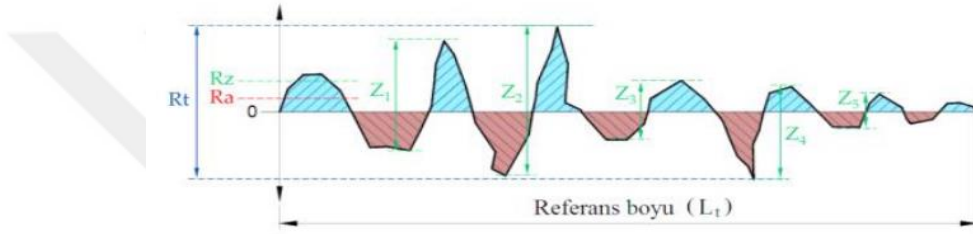


Şekil 3.15. Delik dairesellik görüntüsü (Teke, 2024)

3.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Makine imalatı sırasında, talaşlı ve talaşsız işlemlerle şekillendirilen yüzeylerde mutlaka pürüzler oluşur. Hiçbir imalat yönteminde tamamen pürüzsüz bir yüzey elde etmek mümkün değildir. İki pürüzsüz yüzeyin birbirinden ayrılması için yüksek kuvvet gerekmesi, yüzey gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Pürüzlülükler,

tasarım gereksinimlerine uygun olarak, istenen geometrik yapıda malzeme üzerinde gözlemlenebilir, hissedilebilir ve hassas ölçüm cihazlarıyla belirli toleranslarda ölçülebilir. Makinelerin çalışma esnasında aşınmaların en aza indirgenmesi için yüzey pürüzlülüklerinin belirli standartları sağlaması gereklidir. Yüzey kalitesi, tasarım aşamasında belirlenir ve parçanın imalat resmi üzerinde gösterilir. Ayrıca, parçanın işleme yönüne bağlı olarak dikey ve eksenel yöndeki profillerde farklılıklar gözlemlenebilir. Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi, standart metotlarla yapılır, Şekil 3.16.'da dalgalılık profili (Waviness), ana profil (Primary) ve pürüzlülük profili (Roughness) gibi parametrelerle tanımlanır. Bu değerlendirmeler, parçaların doğru şekilde tasarlanması ve işlenmesi için kritik öneme sahiptir (Teke, 2024).

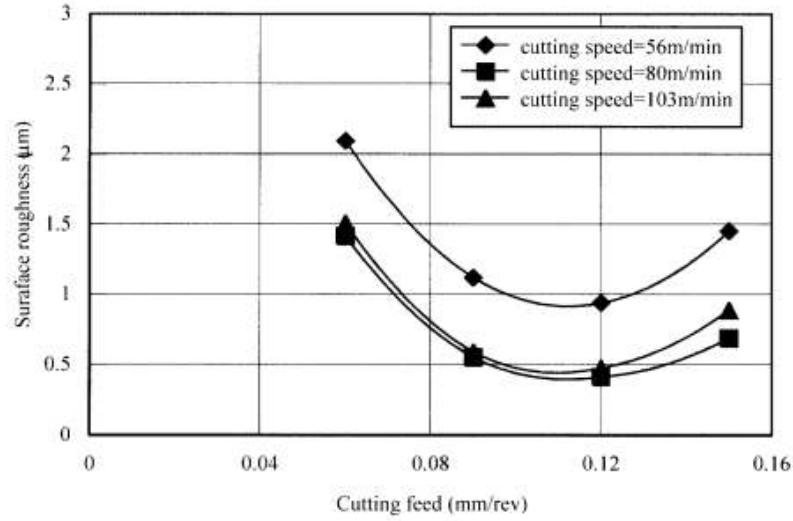


Şekil 3.16. Yüzey pürüzlülük profili analiz grafiği (Teke, 2024)

Kesme hızı ve ilerleme hızındaki artışlar genel olarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme eğilimindedir. Ancak, yüzey pürüzlülüğünün optimum bir seviyeye ulaştığı belirli bir kesme hızı ve ilerleme hızı aralığı bulunmaktadır. Yüksek kesme hızlarında ise, işleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar iş parçası malzemesinin yırtılmasına yol açabilir ve bu durum yüzey kalitesinde bozulmaya neden olabilir. Delik delme işlemlerinde, kılavuz pedi etkisiyle yüzeyde parlatma oluşabilir. Bu bağlamda, kesme beslemesindeki artışın yüzey kalitesinde iyileşme sağladığı gözlemlenebilir. Bununla birlikte, delik boyunca ilerleyen takım aşınması nedeniyle yüzey pürüzlülüğünde kademeli bir bozulma meydana gelmesi beklenmektedir (Hayajneh, 2001).

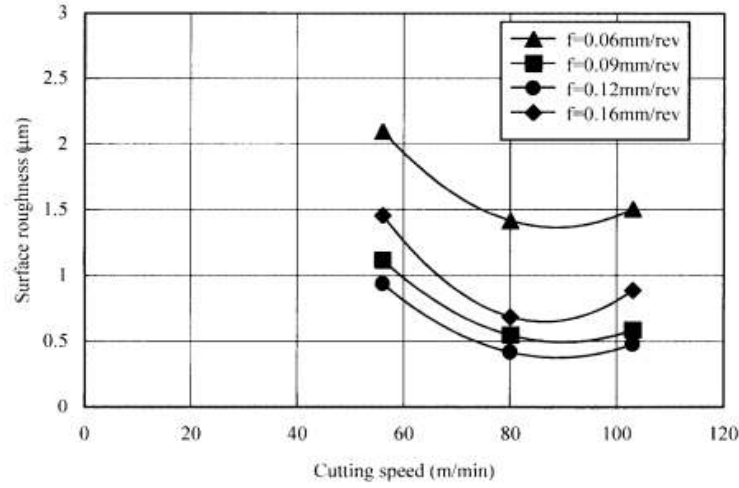
Şekil 3.17, farklı kesme hızları altında delik delme işlemi sırasında kesme beslemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir. Genel olarak, kesme beslemesi belirli bir seviyeye kadar arttığında, delik kalitesinde bir iyileşme gözlemlenmektedir; bu noktada yüzey pürüzlülüğü optimum bir değere ulaşır. Geleneksel delik delme ve tornalama işlemlerinde, kesme beslemesindeki herhangi bir artış, üretilen yüzeylerin kalitesinin bozulmasına neden olur. Ancak, delik delme uygulamalarında kılavuzun yanma etkisi, kesme beslemesindeki artışla birlikte

yüzey finisajında bir iyileşme sağlayabilir. Bu, kılavuz yanma etkisiyle, plastik deformasyona uğramış bir yüzey tabakasının oluşmasıyla açıklanabilir. Kesme beslemesi daha da arttığında ise, kılavuz üzerindeki yük artar ve bu durum, yüzey kalitesinin bozulmasına yol açar (Hayajneh, 2001)



Şekil 3.17. Farklı kesme hızları altında delik delme işlemindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme beslemesinin etkisi (Hayajneh, 2001)

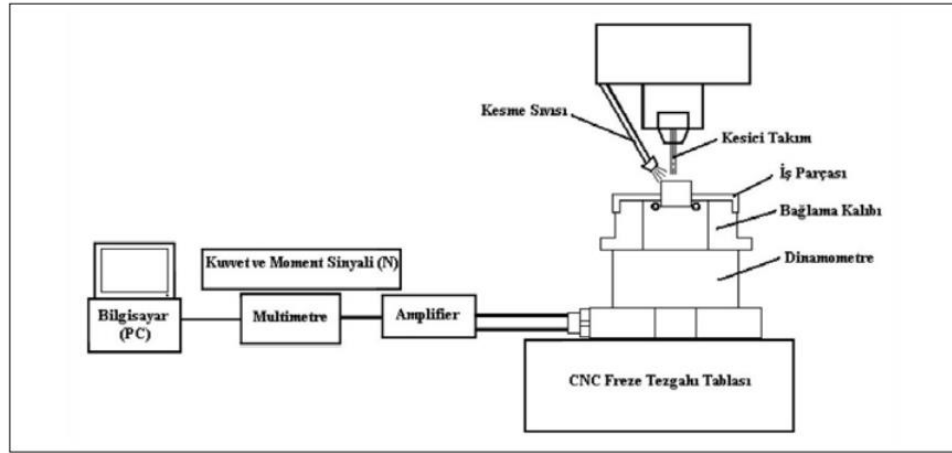
Şekil 3.18, farklı kesme beslemeleri altında delinen deliğin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının etkisini ortaya koymaktadır. Genel olarak, kesme hızı belirli bir seviyeye kadar arttıkça delik kalitesinde bir iyileşme gözlemlenmekte ve yüzey pürüzlülüğü bu noktada optimum değere ulaşmaktadır. Bu iyileşme, kesme hızının artışıyla birlikte birikmiş kenar oluşumunun sürekli olarak azalmasına bağlı olarak açıklanabilir. Ancak, yüksek kesme hızlarında, yüksek sıcaklıklar nedeniyle iş parçası malzemesinde kopmalar meydana gelmekte ve bu durum yüzey finisajının kalitesinde bozulmalara yol açmaktadır.



Şekil 3.18. Farklı kesme beslemeleri altında delinen deliğin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının etkisi (Hayajneh, 2001)

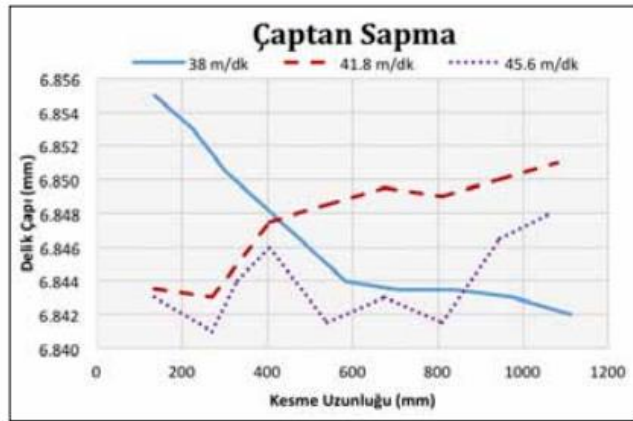
3.5.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Delik delme işlemi sırasında, delik ölçülerinin geometrik toleransları büyük bir öneme sahiptir. Özellikle uzay ve savunma sanayi gibi hassasiyet gerektiren alanlarda kullanılan ürünler için deliklerin ölçü doğruluğu kritik bir faktördür. Delik çaplarının, belirlenen toleranslar içinde, anma çapına mümkün olduğunca yakın değerlerde olması beklenir. Hassas üretim gereksinimlerinin karşılanabilmesi için, dairesellik, ovallik gibi geometrik faktörlerin dikkatlice incelenmesi gereklidir. Kesme kuvvetleri ve momentin deneysel olarak belirlenmesi için, üç kesme kuvveti bileşeni (F_x , F_y , F_z) ve momentini (M_z) aynı anda ölçebilen KISTLER 9272 A tipi dinamometre, KISTLER 5070-A çok kanallı amplifikatör ve verilerin işlenip grafiklerin oluşturulması amacıyla Windows işletim sistemiyle uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı kullanılmıştır. Kesme deneylerinin en verimli şekilde yapılabilmesi için dinamometreye bir bağlama kalıbı ile iş parçası yerleştirilmiştir (Şekil 3.19). Tasarlanan sistemde, kuvvet verileri iş parçası ile dinamometre arasında doğrudan temas sağlanarak elde edilmiştir (Uzun vd., 2017).



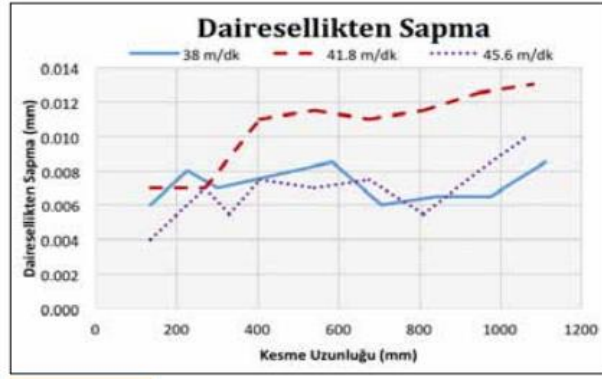
Şekil 3.19. Deney seti tasarımı (Uzun vd., 2017)

Delme deneyleri sonucunda elde edilen Şekil 3.20'deki grafiklere göre, kesme hızı arttıkça çapsal hatanın da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, takım aşınması ve artan kesme hızından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kesme hızı arttıkça, kesme uzunluğunun da artmasıyla birlikte, 41.8 ve 45.6 m/dak kesme hızlarında çapsal hata 0.005 mm ile 0.007 mm arasında bir artış göstermiştir. Ancak, en düşük kesme hızında bu durumun tam tersi olduğu ve 38 m/dak kesme hızında çapsal hatanın 0.013 mm azaldığı gözlemlenmiştir (Uzun vd., 2017).



Şekil 3.20. Kesme uzunluğu ve kesme hızına göre çaptan sapma grafiği (Uzun vd., 2017)

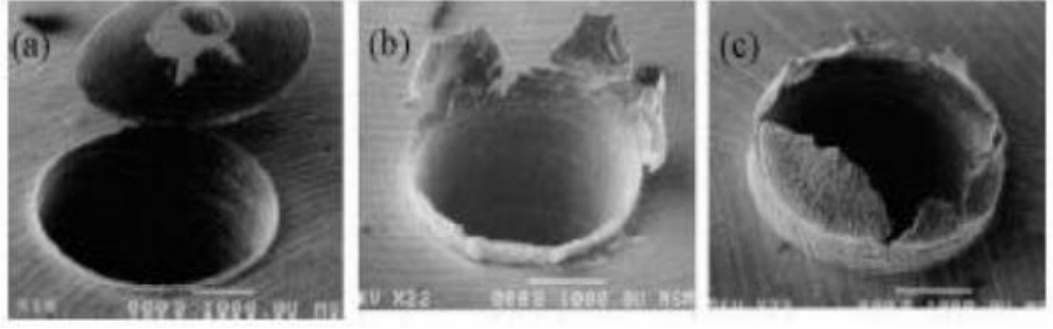
Şekil 3.21 incelendiğinde, dairesellik sapmasının en yüksek değeri 0.013 mm olarak 41.8 m/dak kesme hızında gözlemlenmektedir. En düşük sapma ise 45.6 m/dak kesme hızında, 135 mm kesme mesafesinde 0.004 mm olarak ölçülmüştür. Kesme mesafesinin artmasıyla birlikte, en düşük kesme hızı olan 38 m/dak ile daha düşük dairesellik sapma değerleri elde edilmiştir (Uzun vd., 2017).



Şekil 3.21. Kesme hızı ve Kesme uzunluğuna göre dairesellikten sapma grafiği

3.5. Delme İşleminde Çapak Oluşumu

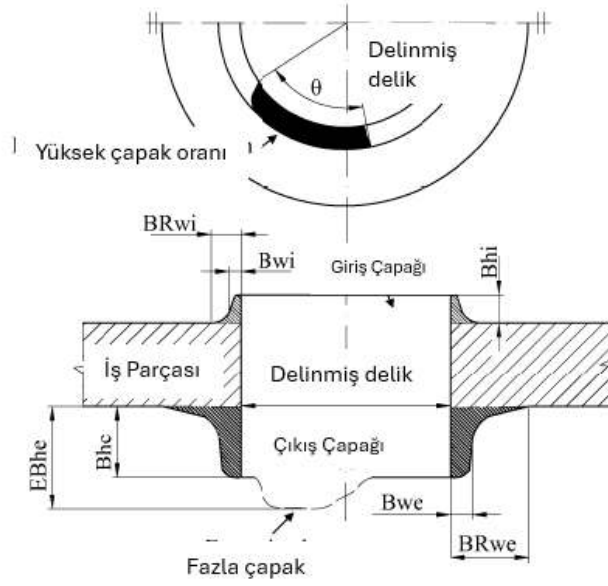
Delme işlemi, talaşlı imalat süreçlerinin en temel ve yaygın uygulamalarından biridir. Kinematik ve dinamik açıdan incelendiğinde, tornalama ve frezeleme gibi diğer talaş kaldırma yöntemleriyle belirgin benzerlikler taşımaktadır. Özellikle talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımı açısından dikkate değer benzerlikler bulunmaktadır. Bununla birlikte, delme işlemi kendine özgü zorluklar ve sınırlamalar da içermektedir. Talaş oluşumu genellikle kapalı bir alanda gerçekleştiğinden dolayı, sürecin doğrudan gözlemlenmesi ve kontrol edilmesi güçleşir. Bu durum, özellikle verimliliği azaltabilecek veya yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilecek çapak oluşumu gibi istenmeyen problemlere yol açabilmektedir. (Şekil 3.22) Dolayısıyla, delme işleminin etkinliğini artırmak için talaş kontrolü ve kesme sıcaklığının optimize edilmesi gibi parametrelerin dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir. Delme işlemi sırasında işleme koşulları, çapak oluşumu, kesici takım geometrisi ve malzeme özellikleri gibi çeşitli parametrelerden etkilenen karmaşık bir süreçtir. İstenilen yüzey kalitesine ulaşılabilmesi için, kullanılan işleme parametrelerinin işlenebilirliği ve malzeme türü ile uyumlu olarak belirlenmesi büyük bir önem arz etmektedir (Kaplan vd., 2011).



Şekil 3.22. Çapak form görüntüleri a) Düzenli b) Süreksiz c) Taç (Kaplan vd., 2011)

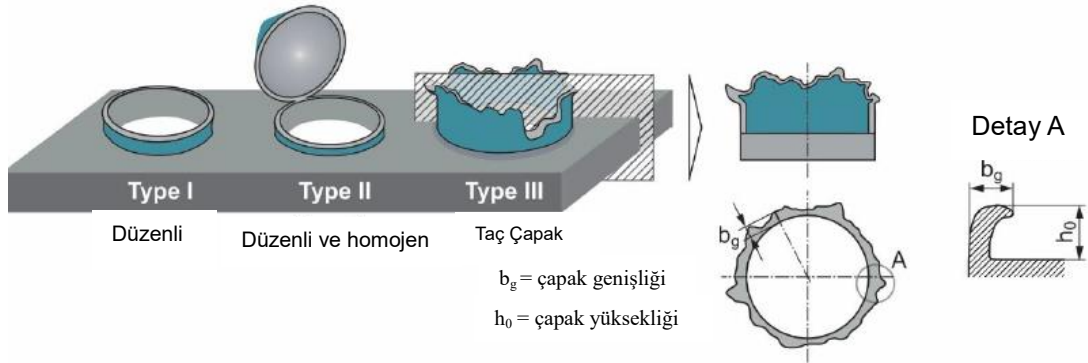
Çapaklar, kesme ve şekillendirme işlemleri sırasında, malzemenin plastik deformasyonu ile iş parçasının köşe ve kenarlarında oluşan istenmeyen çıkıntılardır. Genellikle kesici takımların giriş ve çıkış noktalarında meydana gelmektedirler. Bu çapaklar, parçaların fonksiyonel özelliklerini olumsuz etkileyerek performans kayıplarına yol açar, güvenilirliği azaltır, montaj sürecini zorlaştırır ve otomasyonu engellemektedir. Çapak giderme işlemleri zaman alıcı, zahmetli ve maliyetlidir, ayrıca boyutsal hatalar ve tutarsız sonuçlar doğurabilir. Manuel işlemler operatör güvenliği açısından risk taşıırken, otomasyona entegrasyon zorlukları da üretim verimliliğini kısıtlamaktadır. Bu sebeple, çapak oluşumunun minimize edilmesi, özellikle yüksek verimli ve otomatik üretim süreçleri için büyük önem taşımaktadır (Jin vd., 2020).

Yapılan araştırmalar, çapak kalınlığının çapak yüksekliğinden daha fazla çapak alma maliyetine katkı sağladığını ortaya koymuştur. Şu ana kadar yapılan birçok çalışmada temel çapak parametrelerini tanımlamak amacıyla rasgele kesitler kullanılmıştır. Ayrıca, bu ayrıntılı çapak özelliklerinin ölçülmesi son derece zaman alıcı olmaktadır ve tüm ölçüm yöntemleri bu özelliklerin değerlendirilmesine uygun olmamaktadır. Bu sebeple, en yaygın ve kolay ölçülen çapak özellikleri genellikle çapak yüksekliği ve kalınlığı (genişliği) olarak belirlenmiştir. Ölçülen çapak taban genişliği delinen delik çevresinden, çapak içerisinde plastik deforme olmuş malzemenin başladığı kavis noktasına kadar olan mesafeyi ifade etmektedir. Delik kapakçığının ayrılması sonucu ortaya çıkan küçük oranlı fazla çapak yüksekliği durumunda ise, yükseklik (EBhe) ve açısal oran (θ) olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.23'te gösterilmiştir (Pilný vd., 2011).



Şekil 3.23. Çapak oluşumu (Pilný vd., 2011)

Simülasyon ve deneysel çalışmalarda tespit edilen ana çapak türleri ve çapak genişliği ile yüksekliği gibi karakterizasyon için kullanılan geometrik özellikler Şekil 3.24'te b_g = çapak genişliği [mm], h_0 = çapak yüksekliği [mm] olarak sunulmuştur (Efsthathiou vd., 2016).



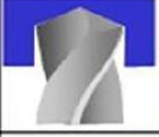
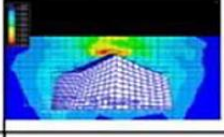
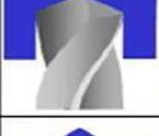
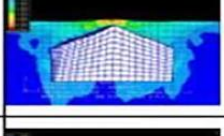
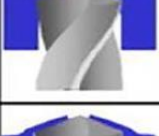
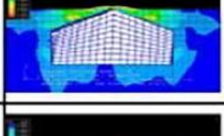
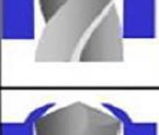
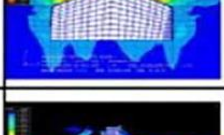
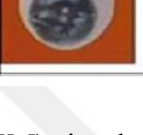
Şekil 3.24. Çapak türleri ve geometrik özellikleri (Efsthathiou vd., 2016)

Çapak oluşumu üzerine yapılan araştırmalar, kesme sıvıları, işleme parametreleri (spindel hızı, besleme hızı) ve takım geometrisinin etkileşimlerini incelemektedir. Ayrıca, sonlu elemanlar analizi (FEA) ve Taguchi optimizasyon teknikleri gibi mühendislik araçları kullanılarak çapak oluşumunun modellenmesi

yapılmıştır. Çapak oluşumunun minimize edilmesi, üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak daha yüksek kalite ve düşük maliyetli üretim sağlayabilir. Farklı talaşlı imalat işlemleri, örneğin frezeleme, tornalama, taşlama ve delme, genellikle işlem koşullarına bağlı olarak farklı türde çapakların oluşumuna neden olmaktadır (Jin vd., 2020).

Delme işlemi, talaşlı imalatın en yaygın kullanılan yöntemlerinden biri olup, çapak oluşumu üzerine yapılan çok sayıda araştırmanın konusu olmuştur. Çapaklar genellikle iş parçasının matkapın giriş yaptığı nokta, delik iç yüzeyi ve çıkış noktasında oluşmaktadır. Çeşitli çapak temizleme yöntemleri uygulanabilse de geçiş delikleri ve boşluklardaki çapakların temizlenmesi üreticiler için ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Bu tür çapakların giderilmesi için özel aletlerin eksikliği, delme mekanizmasının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini ve çapak oluşumunu en aza indirecek stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir (Jin vd., 2020).

Delme işlemi sırasında çapak oluşum mekanizması, taşlama ve frezeleme işlemlerinden farklılık gösterse de genellikle dört temel aşamada incelenmektedir: **başlama, gelişim, dönme ve çapak oluşumu**. Şekil 3.25'te 304 L paslanmaz çeliğin üç boyutlu simülasyonu temelinde bu aşamaları detaylı olarak gösterilmektedir. İlk aşamada, matkap iş parçasına temas ettiğinde, temas noktasında sıkışma ve gerilme oluşur, bu durum plastik akışı başlatmaktadır. İkinci aşamada, matkap derinleştikçe sıkışma artar ve deliğin tabanında deformasyona uğrayan malzeme birikimi gözlemlenir. Bu birikim, malzemenin kaçabileceği alanın sınırlılığı ve matkap ucunun altındaki ince tabakanın desteğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Üçüncü aşamada, matkap çıkışa yaklaştıkça, plastik deformasyon bölgesi ortadan matkap kenarına doğru genişler. Dördüncü ve son aşamada, iş parçası dayanım sınırına ulaşır; çatlama deliğin merkezinde başlar ve matkap ilerlerken büyük deformasyon meydana gelir. İnce malzeme tabakasının yüksek esnekliği kesmeyi engeller; bu tabaka matkap tarafından dışarı itilir ve çapak oluşumu gerçekleşmektedir (Jin vd., 2020).

Burr formation mechnism	Proposed burr formation mechnism	FEM simulation	High-speed camera image
(a) Steady-state			
(b) Initiation			
(c) Develop-ment			
(d) Initial fracture			
(e) Final burr			

Şekil 3.25. Çapak oluşumunun sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonu (Jin vd., 2020)

Çapak oluşumuna etki eden parametreler Tablo 3.1'de belirtilmiştir. Bu parametrelerin etkisinin, işleme yöntemine bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir (Jin vd., 2020).

Tablo 3.1. Çapak Oluşumunu Etkileyen Parametreler (Jin vd., 2020)

İş Parçası	Kesici Takım	Kinematik	Tezgah
• Geometri	• Taşlama taşı topografyası	• İşleme operasyonu	• Montaj
• Fiziksel özellikler	• Fiziksel özellikler	• Kesme parametreleri	• Statik ve dinamik rijitlik

Çapak oluşumunu daha belirgin şekilde etkileyen parametreler arasında iş parçası ve takım malzemesi, takım aşınması, takım geometrisi, delme yolu ve genel işleme koşulları yer almaktadır. Ayrıca, çapak oluşumunu etkileyen parametreler, aralarındaki etkileşimler nedeniyle yalnızca doğrudan ve dolaylı faktörler olarak basit

bir şekilde sınıflandırılmamaktadır. Çapaklar, farklı sertlik, dayanım ve süneklik özelliklerine sahip her türlü işlenmiş malzemede oluşabilmektedir (Jin vd., 2020).

Delme işlemi sırasında iş parçası üzerinde oluşan çapak, endüstride sık karşılaşılan bir sorun olup hem işleme kalitesini hem de üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Çapak, kesicinin ilerlemesi sırasında deliğin merkezinde yüksek basınç etkisiyle meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşur. İstenen yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için kesme parametrelerinin malzeme türü ve işleme koşullarına uygun şekilde belirlenmesi gereklidir. Çapak oluşumu, deliğin hem giriş hem de çıkış bölgelerinde gözlemlenir; ancak çıkış bölgesindeki çapak boyutu genellikle daha büyüktür. Bu durum, çapakla ilgili sorunların daha çok delik çıkışında yoğunlaştığını gösterir. Çapak oluşumunun minimize edilmesi, üretim kalitesini artırırken ek işlem maliyetleri ve zaman açısından önemli olmaktadır (Siyambaş & Turgut, 2020).

Çapak yüksekliği ve çap değişimi ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. HSLA çeliklerinin delinebilirliği üzerine sınırlı, ancak farklı işlemlerle ilgili kapsamlı çalışmalar bulunduğu görülmüştür. Tornalamada kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri, frezelemede kaplamalı kesiciler ve soğutma sistemlerinin yüzey kalitesine etkileri incelenmiştir. HSLA çeliğinin delinmesinde çap değişimi ve çapak yüksekliğine kesme parametreleri ve matkap türlerinin etkisi gri ilişkisel analiz yöntemiyle değerlendirilerek optimum koşulların belirlenmesi hedeflenmiştir (Siyambaş & Turgut, 2020).

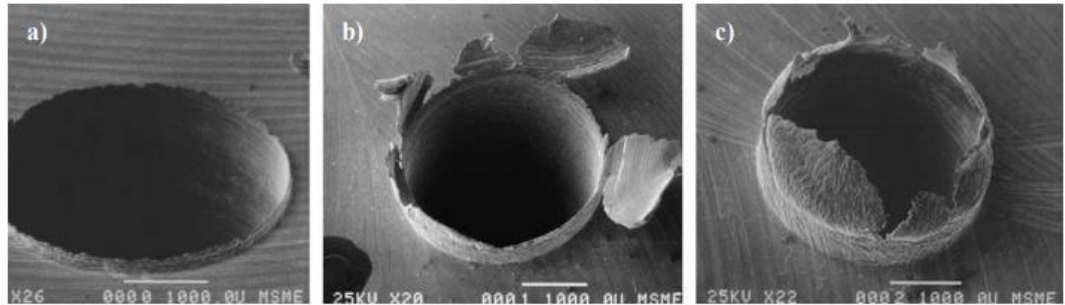
Delme işleminde, çapak oluşumunun önceden tahmin edilmesi ve talaş kaldırma sırasında meydana gelecek kuvvetlerin modellenmesi önemlidir. Çapak miktarı, delik kalitesinin düşmesine, kesme kuvvetlerinin artmasına, kesici uçta istenmeyen sıcaklıkların oluşmasına ve kesicinin deformasyonuna yol açabilir. Bu nedenle, çapak oluşumu bu etkiler göz önünde bulundurularak dikkate alınmalıdır (Teke, 2024).

3.5.1. Delik Delme Esnasında Oluşan Çapak Formları

Çapaklar, plastik deformasyon ve kırılma sonucu oluşan istenmeyen yapısal oluşumlardır. Çapaklar, genellikle işlenmiş yüzeyin kenarlarında yer alır ve parçanın kullanılmadan önce kontrol edilmesi ya da temizlenmesi gereken pürüzlü şeritler

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çapaklar, delme işlemlerinde, takım ve iş parçası arasındaki boşluktan kaynaklanan şekil değişikliği nedeniyle, takımın iş parçasından ayrılmasıyla birlikte iş parçasının kenarına tutunarak şekillenir. Çapak yüksekliği, malzemenin süneklik özelliklerine bağlı olarak plastik deformasyonun derecesi ile belirlenir. İşleme sırasında çapak oluşumu, kırılma süreçlerinin ve temelde plastik deformasyonun bir sonucu olarak meydana gelmektedir (Özcan, 2023).

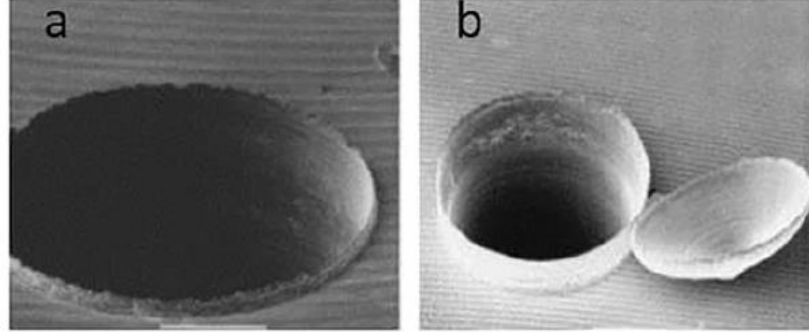
Delik giriş ve çıkış bölgelerinde, genellikle düzgün, küçük veya değişken çapak yükseklikleri oluşabilmektedir. Matkap çıkış yüzeyine yaklaşırken, kesici kenarın altındaki malzeme deforme olmaya başlar. Delme işlemi sırasında plastik deformasyonun başladığı nokta, ilerleme kuvvetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Matkap ilerledikçe, plastik deformasyon bölgesi matkabın merkezinden kenarına doğru genişler (Şekil 326). Çapaktaki ilk patlama, kesici kenarın ucunda gerçekleşir. Yüksek ilerleme kuvvetlerinin, yüksek ilerleme hızlarının oluşmasına neden olur ve bu da süresiz çapakların meydana gelmesine yol açar (Şekil 3.26) (Perçin,2015).



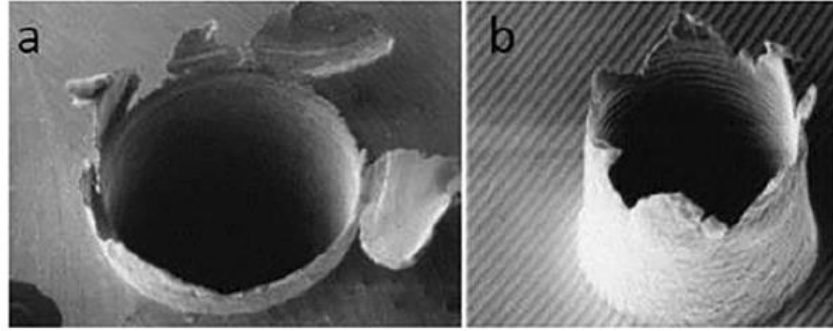
Şekil 3.26 Çapak Çeşitleri a) Üniform b) Süresiz c) Taç çapak(Perçin, 2015)

Delme işlemi sırasında oluşan çapaklar, genellikle uniform, geçici ve taç çapakları olarak sınıflandırılabilir. Uniform çapaklar, iki ana türe ayrılır: matkap başlığına sahip ve başlıksız. Bu tür çapaklar, deliğin kenarında, genellikle yüksekliği açısından homojen bir şekilde oluşmaktadır ve Şekil 3.27'de gösterilmektedir. Matkap başlığı, delme işleminin son aşamasında oluşan, başlık benzeri dairesel bir talaş tabakası olup, genellikle savrulmaktadır. Uniform çapaklar, iş parçasının deliğinin kenarındaki ilk kırılmalar sonucu meydana gelir ve genellikle düzgünlükleri ve küçük boyutları sayesinde daha kolay temizlenmektedir. Geçici ve taç çapakları ise, boyutları açısından düzensiz olup, genellikle daha büyük yüksekliklere sahiptir. Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Geçici çapaklar, uniform çapaklardan taç çapaklarına geçiş aşamasında

oluşmaktadır. Taç çapakları ise, genellikle deliklerin merkezine yakın bölgelerde meydana gelen ilk kırılmalar sonucu oluşur ve bu durumda malzeme, işleme yerine dışarıya itilir (Jin vd., 2020).



Şekil 3.27. Matkap başlığı ile (a) başlıksız (b) uniform çapak (Jin vd., 2020)



Şekil 3.28. Geçici (a) ve taç (b) çapak (Jin vd., 2020)

Talaş akışının verimli olduğu ve talaşın kolayca uzaklaştırılabildiği durumlarda, iş parçası ile talaş arasındaki sürtünme azalır ve delik yüzey kalitesi iyileşir. Ancak, ilerleme hızının artmasıyla daha fazla talaş kaldırılması, takım ile talaş arasındaki sürtünmeyi artırarak yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyebilir. Yine de kesme hızının artırılmasıyla delik yüzeylerinin kalitesi geliştirilebilir (Perçin, 2015).

3.5.2. Delik Yüzeylerinin Kalitesi

Delme işlemlerinde, çapak oluşumu ve delik kalitesi, ürünün genel kalitesini belirleyen önemli unsurlardır. Çapaklar, parçaların sıkışmasına yol açabilir ve montajı zorlaştırabilir. Sert yapıya sahip çapaklar kırılkan olup, iş parçasından ayrıldığında

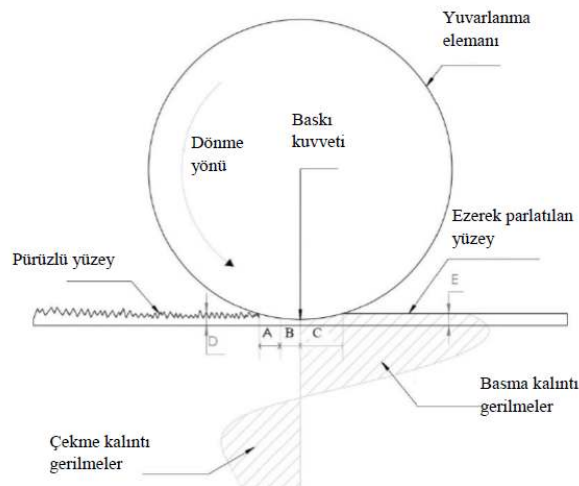
mikro çatlaklar oluşturabilir, bu da iş parçasının yorulma ömrünü olumsuz etkiler. Ayrıca, çapaklar, hareketli parçalarda ciddi hasarlara yol açabilir. Çapak temizliği ek bir işlem gerektirir, bu da üretim maliyetini artırır. Çapakların boyutu ve şekli, kesme parametreleri değiştirilerek kontrol edilebilir ve daha küçük çapakların tercih edilmesi, zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır (Perçin, 2015).



4. EZEREK PARLATMA

Parlatma işlemi, metaller, alaşımlar, sinterler ve plastiklerin yüzey iyileştirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem, sert ve pürüzsüz bir takımın (örneğin bilye, disk veya makara) yüzeyle kinematik hareket ve kuvvet etkisi altında etkileşimi sonucunda, yüzey tabakasında plastik deformasyon oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Parlatma işleminin yüzey kalitesi, kalıntı gerilmeler, mikro yapı, mikro sertlik, yorulma dayanımı ve aşınma performansı gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Kulakowska & Bohdal, 2024).

Ezerek parlatma, son yıllarda düşük maliyetli ve etkili bir yüzey iyileştirme yöntemi olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemde, yuvarlak bir eleman iş parçasına belirli bir kuvvetle bastırılarak yüzeydeki düzensizlikler soğuk deformasyon ile düzeltilmektedir. Ezerek parlatma, termo-mekanik, termal, mekanik ve kimyasal iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve uygulanması kolaydır. Yöntemde, sertleştirilmiş çelik veya seramik bir yuvarlanma elemanı yüzeye bastırılarak, iş parçası veya yuvarlanma elemanının hareketiyle yüzeydeki mikro pürüzler, plastik deformasyonla düzeltilir (Şekil 4.1). Ezerek parlatma, genellikle taşlanmış ve tornalanmış metal parçaların iç ve dış yüzeylerinde uygulanır ve yüzey sertliğini artırırken pürüzlülüğü önemli ölçüde azaltır. Geleneksel hassas tornalama, taşlama ve honlamaya göre yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir ve mevcut talaşlı imalat makinelerine kolayca entegre olabilmektedir (M. Çelik, 2023).



Şekil 4.1. Ezerek parlatma işleminin şematik görseli (M. Çelik, 2023)

Literatürde yapılan çalışmalar, özellikle bilye parlatma ve makaralı parlatma yöntemleri, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve yüzey tabakasında kalıntı basma gerilmelerinin oluşturulması üzerine odaklanmaktadır. Lazer kesimli çeliklerde yapılan çalışmalar, parlatma parametrelerinin mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Parlatma ön yükünün malzeme sünme davranışını azalttığını ve mukavemet değerlerini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, çoklu geçişler ve farklı yönlerde uygulanan parlatma işlemlerinin pirinç yüzeylerindeki etkileri incelenmiş ve yapay sinir ağları kullanılarak optimum yüzey pürüzlülüğü tahminleri gerçekleştirilmiştir. Östenitik paslanmaz çeliklerde yapılan çalışmalar ise plastik deformasyon yönü ile parlatma hareket yönünün çakışması durumunda yorulma dayanımının arttığını kanıtlamıştır (Kuşakowska & Bohdal, 2024).

Makaralı parlatma yönteminin yüzey makro-pürüzlülüklerinin plastik deformasyonla şekillendirilmesine olanak sağladığı ve bu sayede aşınmaya dayanıklı bir yüzey tabakası elde edilerek üst yüzeyde kalıntı basma gerilmelerinin oluşturulabileceğı belirlenmiştir. Tornalama sonrası yüzeyin makro-pürüzlülüklerinin düşey açısı ile yüzey pürüzlülüğü parametreleri arasındaki ilişki, özellikle 60°-150° aralığındaki açı değerlerinde SEM, AFM ve metalografik analizler kullanılarak incelenmiş ve bu analizler sonucunda, yüzeyin istenen geometrik yapısının elde edilmesine yönelik uygun parlatma parametreleri belirlenmiştir (Kuşakowska & Bohdal, 2024).

4.1. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Yüzey pürüzlülüğü, tribolojik özellikleri, aşınma, sürtünme, yağlamanın yanı sıra sızdırmazlık, hidrodinamik, elektrik ve ısı iletimi gibi birçok faktörü etkileyen önemli bir parametredir. Ürünlerin yüzey kalitesini iyileştirmek için kesme derinliğı, ilerleme hızı, kesme hızları, soğutma sıvısı debisi ve kesici takım parametreleri gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyileştirilmesi, işleme parametrelerinin doğrudan etkisiyle mümkündür, bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün nasıl oluştuğunu belirlemek ve operasyon öncesi sonuçları tahmin etmek gerekmektedir. Bu amaçla, literatürde pek çok çalışma yapılmış ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için farklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Özellikle

ANFIS, yapay sinir ağı ve çoklu regresyon gibi yöntemler kullanılarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin eden modeller oluşturulmuş ve bu modeller, kesme parametrelerinin etkisini analiz etmek için başarılı sonuçlar elde etmiştir. Yüzey kalitesinin önceden tahmin edilmesi için gri ilişki analizi de sıklıkla kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, talaş yapısının işleme verimliliği üzerindeki etkisi büyüktür ve operatör güvenliği, takım aşınması, tezgâh güvenliği gibi birçok konuda etkili olmaktadır. Özellikle tornalama ve delik delme işlemlerinde talaş kontrolü büyük önem taşımaktadır. Kesme parametrelerinin talaş yapısına olan etkisi, işleme verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir faktördür (Yılmaz & Güllü, 2020).

Tornalama işlemi, genellikle silindirik iş parçalarının çaplarını azaltmak, hedef boyutlara ulaşmak ve iyi bir yüzey kalitesi elde etmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Talaşlı şekil verme işlemlerinde, her zaman iyi bir yüzey kalitesinin sağlanması hedeflenmekte ve yüzey kalitesini etkileyen üç temel faktör bulunmaktadır: ilerleme hızı (F), kesme hızı (Vc) ve kesme derinliği/paso miktarı. Bu faktörler, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ve genel kalitesini doğrudan etkileyerek, işlem verimliliğini ve nihai ürünün özelliklerini belirlemektedir (Safa Bodur vd., 2022).

4.1.1. Kesme Hızı

Kesme hızı, talaşlı imalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünü ve takım ucu sıcaklığını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Genellikle, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri azalmaktadır. Yüksek kesme hızları genellikle daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ile sonuçlanırken, aynı zamanda takım ucu sıcaklığını da artırabilmektedir. Bu nedenle, istenen yüzey kalitesi ve takım ömrü arasında bir denge sağlamak için kesme hızı optimizasyonu önemli olmaktadır (Bilgiç vd., 2019).

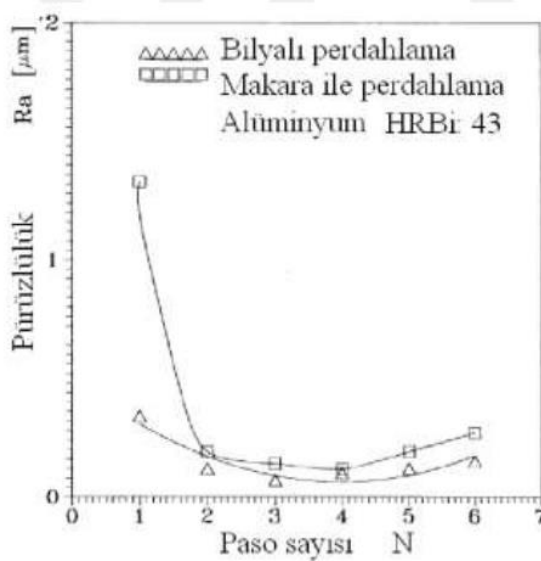
4.1.2. İlerleme Hızı

İlerleme hızı, talaşlı imalat işlemlerinde kesici takımın her devirde iş parçası boyunca ilerlediği mesafeyi ifade eder ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genellikle, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Bunun nedeni, daha yüksek ilerleme hızlarında, kesici takımın malzemeden daha

büyük talaşlar kaldırması ve bu da yüzeyde daha belirgin izler bırakmasıdır. İlerleme hızı ayrıca takım ömrünü, kesme kuvvetlerini ve talaş oluşumunu da etkilemektedir. Bu nedenle, talaşlı imalat işlemlerinde istenen yüzey kalitesi, takım ömrü ve verimlilik arasında optimum bir denge sağlamak için ilerleme hızının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir (Albar, 2023).

4.1.3. Paso Sayısı

Bilyeli parlatma işleminde paso sayısının optimizasyonu, diğer işlem parametreleri ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle dikkatlice ele alınması gereken önemli bir husustur. Bilyeli parlatma işleminde optimum paso sayısı, kullanılan malzemeye, istenen yüzey kalitesine ve diğer işlem parametrelerine bağlı olarak değişir ve deneysel olarak belirlenmelidir. Araştırmalar, tek geçişte maksimum normal kuvvet uygulanmasının bilye parlatma işlemi için genellikle etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir. Alüminyum malzeme üzerinde yapılan çalışma, paso sayısının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde başlangıçta bir iyileşme olduğunu, ancak 4. geçişten sonra yüzey pürüzlülüğünün tekrar arttığını ortaya koymuştur. Bu durum, aşırı işlem nedeniyle yüzeyde hasar veya deformasyon meydana gelebileceğini düşündürmektedir. Şekil 4.2. de paso sayısının yüzey durumuyla ilişkisi gösterilmiştir (Albar, 2023).



Şekil 4.2. Paso sayısının yüzey durumuyla ilişkisi (Albar, 2023)

4.2. Mekanik Yüzey İyileştirme Yöntemleri

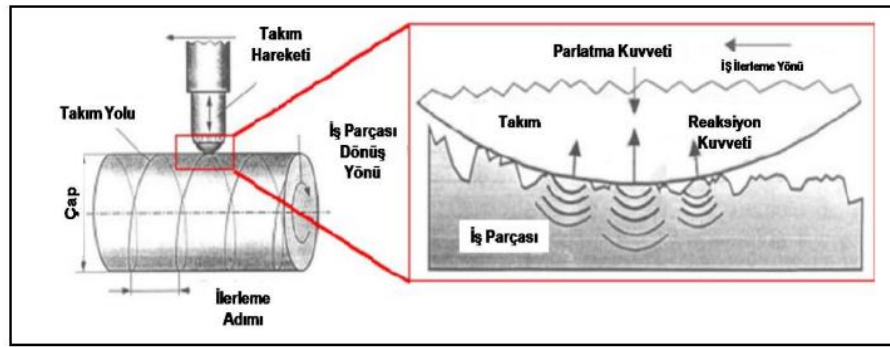
Mekanik yüzey işlemleri, malzemelerin estetik özelliklerini iyileştirirken, aşınma, korozyon direncini artırmak ve yorulma dayanımını geliştirmek için kullanılmaktadır. Bu işlemler, temiz, hızlı ve düşük maliyetli olmalarıyla avantaj sağlarken tornalama, frezeleme, delme ve kaynak gibi işlemler, yüzeyde çekme gerilimleri oluşturup yorulma ömrünü kısaltabilir. Yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek, çatlamları önleyerek parçaların hizmet ömrünü uzatmaktadır. Yüzeydeki basma gerilmesi, hasar oluşumunu geciktirmekte ve parçanın çalışma koşullarına katkı sağlamaktadır (Albar, 2023).

4.2.1. Bilyeli Parlatma

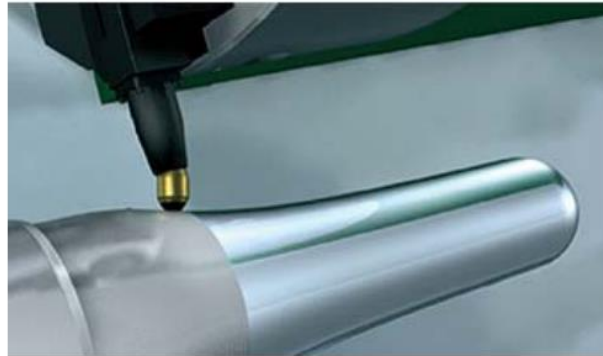
Bilyeli parlatma, bir topun iş parçasının yüzeyinde yuvarlanarak elastik, elasto-plastik ve plastik deformasyonlara yol açtığı bir süreçtir. Bu işlem, iş parçasının şeklini, boyutlarını, pürüzlülüğünü, sertliğini ve gerilmelerini değiştirmektedir, böylece yüksek geometrik doğruluk ve boyutsal hassasiyet sağlamaktadır. Çoğunlukla prizmatik ve silindirik iş parçaları işlenebilmektedir. Bilyeli parlatma, malzemenin aşınma direncini, yorulma direncini ve korozyon direncini önemli ölçüde artırabilir. Çelik, bakır, alüminyum, pirinç, polimerler, titanyum, nikel-krom-molibden alaşımları, ahşap gibi çeşitli malzemeler üzerinde uygulanabilir. Bilyeli parlatma aletleri, parlatma kuvveti oluşturmak için yay, basınçlı akışkan ve yüksek sertlikli aletler gibi farklı mekanizmalar kullanılmaktadır. Titreşim destekli ve manyetik destekli hibrit sistemler de mevcuttur. Parlatma kuvveti genellikle tek bir bilye tarafından üretilirken, birden fazla bilye kullanılan sistemler de bulunur (Kanovic vd., 2022).

Parlatma bilyeleri, tungsten karbür, krom kaplı çelik, yüksek hızlı çelik, silikon nitrür ve seramik gibi malzemelerden yapılmaktadır. Yüksek sertlikli aletle gerçekleştirilen bilyeli parlatma işleminde, iş parçası sabitlenir ve bilyenin kaymadan yuvarlanması sağlanır. Bilye ve üç makaralı rulmanlardan oluşan bir düzenek, bilyenin yuvarlanmasını kontrol etmektedir. Bilye giriş derinliği, gerekli parlatma kuvvetinin elde edilmesinde belirleyici faktördür. Bu işlemde yüzeydeki tepe noktaları deformasyona uğrayarak çukurlukları doldurur ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasını sağlamaktadır (Kanovic vd., 2022).

Bilyeli parlatma işlemi, iş parçası ile küresel bilye arasındaki temas bölgesinde oluşan yüzey basıncına dayanarak gerçekleşir. Akma mukavemetinin aşılmasıyla, makroskobik gerilmeler ve mikroyapısal deformasyon etkileri ortaya çıkar. Bu süreç, sertleşme veya yumuşama ile bölgesel plastik deformasyonlara yol açmaktadır. Diğer mekanik yüzey işlemleriyle karşılaştırıldığında, bu işlemin en belirgin avantajlarından biri, makroskobik bası gerilmeleri ve deformasyon sertleşmesinin etkilerinin yüzeyin derinliklerine kadar ulaşabilmesidir. Bu faydalı etkiler, bilyeli parlatma işleminin günümüzde birçok teknik alanda yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır (Akbulut, 2011).



Şekil 4.3. Takım ve numunenin hareket şekli(Akbulut, 2011)



Şekil 4.4. İşlem sonrası yüzey görünümü(Akbulut, 2011)

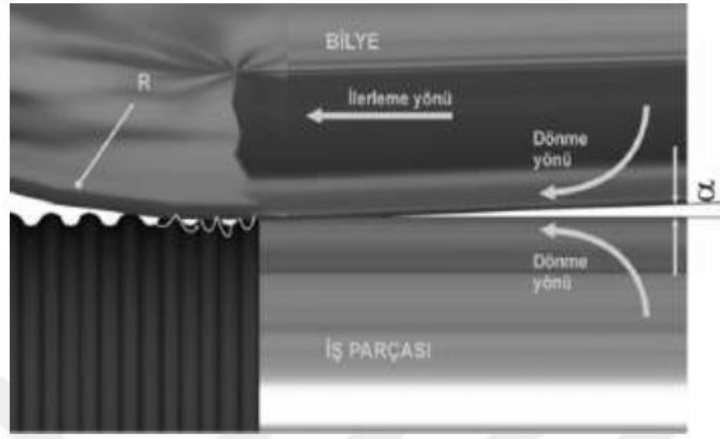
Şekil 4.3 'deki bilyeli parlatma işleminde, belirli bir yol izleyen bilye elemanına uygulanan kuvvet, kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak genellikle 25 ila 45 kgf arasında değişiklik göstermektedir. Bu işlem sırasında, yüzeydeki çıkıntılar bilyenin uyguladığı kuvvetle plastik deformasyona uğrayarak, yüzeydeki girintileri doldurur. Şekil 4.4'te ise bilyeli parlatma işleminden sonra elde edilen istenen yüzeyin görünümü gösterilmiştir (Akbulut, 2011).

4.2.2. Lazerli Şok Darbesi (LSP)

Lazer şoklama, yüksek pik güç yoğunluğuna ve kısa atımlı lazer ışınlarına sahip bir yüzey işleme teknolojisidir. Genellikle havacılık sektöründe alüminyum ve titanyum alaşımları gibi metaller üzerinde uygulanmaktadır. Bu işlem, malzemenin aşınma ve korozyon direncini artırırken, yorulma ömrünü de uzatır. Lazer ışınının metal yüzeyine odaklanmasıyla oluşan siyah bant emici tabaka, lazer enerjisini emerek termodinamik bir patlama meydana getirir ve yüksek basınçlı bir plazma oluşturur. Bu plazma, su gibi sınırlayıcı bir tabaka tarafından sınırlandırılarak, malzemenin iç kısmına yüksek etkiyle yük verir ve yüzeyde plastik deformasyon oluşturmaktadır. Bu işlem, metal yüzeyde faydalı artık gerilme oluşturarak, malzemenin korozyon ve aşınma direncini artırır, gerilme genliğini azaltır ve yorulma ömrünü uzatır (Yang vd., 2025).

4.2.3. Derin Ezme

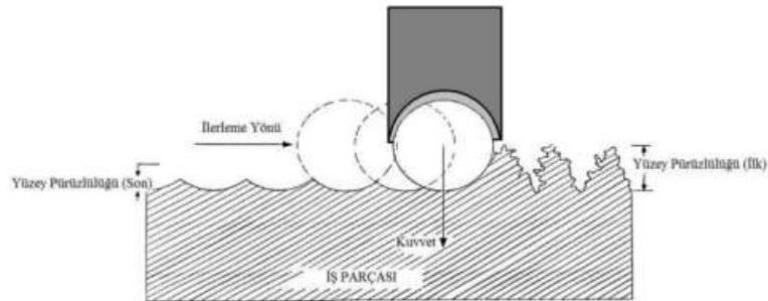
Derin ezme (deep burnishing), dönen bir takım tarafından iş parçası yüzeyine baskı uygulanarak gerilim oluşturulan ve bu gerilimin akma noktasına ulaşarak plastik şekil değişimine neden olduğu bir yüzey işleme yöntemidir. Baskı ve ilerleme hızı arasındaki ilişki, yüzey pürüzlülüğünü etkiler; baskı arttıkça ve ilerleme hızı azaldıkça pürüzlülük azalmaktadır. Derin ezme işlemi, yüzey sertliğini artırır, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirir ve basma artık gerilmesi oluşturur. Hızlı ve ekonomik bir işlem olarak endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 4.5'te derin ezme yöntemi gösterilmiştir (Albar, 2023).



Şekil 4.5. Derin ezme yöntemi (Albar, 2023)

4.2.4. Makara ile Perdahlama Yöntemi

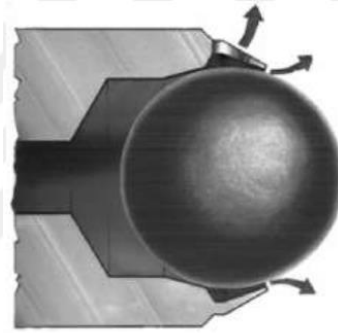
Makara perdahı, iş parçasının yüzey kalitesini ve sertliğini artırmayı hedefleyen, ilerleme ekseninde hareket ettirilen makaralar aracılığıyla plastik deformasyona uğratarak iyileştiren bir yüzey işleme yöntemidir (Labuda vd., 2024). Genellikle artık gerilmeler oluşturmak amacıyla tasarlanmamış olan bu işlem, sertleştirilmiş bir aletin yüzeyde gezdirilmesiyle gerçekleşir ve tornalama sonrasında uygulanarak yüzeyin daha düzgün bir hale gelmesini sağlamaktadır. Yüzey kalitesini iyileştirmenin yanı sıra, ölçüsel sapmaları düzeltir, montajı kolaylaştırır ve oksitlenmiş tabakaları temizler. Şekil 4.6 da makara ile perdahlama işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Metal ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan makara perdahı, yüzey sertliği ve yorulma mukavemetini artırmaktadır (Albar, 2023).



Şekil 4.6. Makara ile perdahlama işlemi (Albar, 2023)

4.2.5. Bilyeli Perdahlama Yöntemi

Bilyeli perdahlama, metal yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesi, temizlenmesi ve parlatılması amacıyla kullanılan bir yüzey işleme yöntemidir. Bu işlem, malzemelerle birlikte çelik bilyeler ve özel perdah malzemelerinin karıştırılarak bir kabın içinde döndürülmesi veya titreştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.7). Bilyelerin ve perdah malzemelerinin sürtünmesi, yüzeydeki pürüzleri giderir, oksit tabakalarını temizlemekte ve yüzeyi parlatmaktadır. Bilyeli perdahlama, aşındırıcı veya kimyasal içerik kullanmadığı için malzemeye zarar vermez, metal kaldırmaz. Ayrıca, yüzey sertliğini artırarak korozyon ve yorulma direncini geliştirmektedir. Bu işlem, estetik görünüm elde etmek ve montaj veya işleme için parçaları uygun hale getirmek amacıyla yaygın olarak kullanılır. Teknolojinin ilerlemesiyle, parça kalınlığına bağlı olarak farklı bilyeli perdahlama takımları geliştirilmiştir (Albar, 22023).



Şekil 4.7. Bilyeli perdahlama(Albar, 2023)

4.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçme Yöntemleri

Yüzey kalitesini belirlemek için "ortalama çizgi" (M) ve "zarf sistemi" olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde, genellikle M yöntemi tercih edilmekte olup, yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesinde ortalama pürüzlülük (R_a) veya en büyük pürüzlülük (R_{max}) gibi ölçütler kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, belirli bir "değerlendirme uzunluğu" içinde yapılır. R_a , yüzeydeki girinti ve çıkıntıların alanlarının ortalamasını temsil ederken, R_q , bu sapmaların karelerinin geometrik ortalamasıdır. R_z , değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek çıkıntı ile en derin girintinin ortalamasını ifade eder. R_{max} , filtre edilmemiş

pürüzlülükteki en yüksek çıkıntı ile en derin girintinin farkını, R_t ise filtrelenmiş pürüzlülükte bu mesafeyi temsil etmektedir (Güllü vd., 2003).

4.3.1. Mekanik Çalışma Yöntemi

En az 500 gram kütleyle sahip bir çelik bilye kullanılarak yüzeyin içine doğru gerçekleşen 1 μm 'lik yer değiştirme, yüzey pürüzlülüğünün bir ölçütü olarak değerlendirilmektedir (Güllü vd., 2003).

4.3.2. Hidrolik Yöntem

200 mm uzunluğundaki eğik bir düzlem üzerinde, 0,25 cm^3 hacmindeki bir yağ damlasının geçiş süresi (t) ile 10 nokta yüksekliği parametresi (R_z) arasındaki ilişki doğrultusunda aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir. Bu yöntem ile 2~50 μm aralığındaki R_z değerlerinin belirlenmesi mümkündür (Güllü vd., 2003).

$$R_z = 0.13 \cdot t^{3.7} \quad (4.1)$$

4.3.3. Yüzey Dinamometresi Yöntemi

Dinamometre, gerinim ölçer ve piezo-elektrik ivmeölçer kullanarak sırasıyla statik ve dinamik kuvvetleri ölçmektedir. Sekizgen halkaların yerleşimi ve gerinim ölçer konumları, maksimum hassasiyet için optimize edilmiştir. Geliştirilen bu sistem, bir veri toplama cihazına bağlanarak kesme kuvveti sinyallerini sayısal forma dönüştürüp işlenmesini sağlar. Sonuçlar, dinamometrenin frezeleme ve diğer takım tezgâhı işlemlerinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Sousa vd., 2020).

İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının, sürtünen yüzeylerin pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiği göz önüne alındığında, dinamometre ile ölçülen sürtünme kuvveti (F), yüzey pürüzlülüğü ile orantılı olarak belirlenmektedir (Güllü vd., 2003).

4.3.4. X Işını Yöntemi

X-ışını yöntemleri, malzemelerin bileşimi, kristal yapı mükemmelliği, atomik yapısı, enerji seviyeleri ve elektronik yapıları gibi önemli parametreleri tespit etmek için kullanılan ileri teknolojiye dayalı, tahribatsız test tekniklerinden biridir. X-ışını yöntemleri, özellikle yüklü parçaların tahribatsız testlerinde uygulama sınırlarının analiz edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, farklı yüzey işleme yöntemlerine tabi tutulmuş parçaların yüzey tabakalarında oluşan mikro gerilmeler ve plastik deformasyonlar, X-ışını yöntemi ile karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu yöntem, yüzey pürüzlülüğü, iç gerilmeler ve deformasyonların detaylı analizini sağlayarak, malzeme davranışını ve üretim süreçlerinin etkilerini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Syusyuka, 2021).

X-ışını yöntemi, x-ışını demetinin kristallerden kırınımını ve kırınım açısının artık gerilmeye bağlı olarak nasıl değiştiğini ölçmektedir. Artık gerilme olmadığında, kristalografik düzlemler arasındaki mesafe sadece malzemenin özelliklerine bağlı olmaktadır ancak, artık gerilme mevcut olduğunda bu mesafe değişir ve bu da kırınım açısında bir değişikliğe neden olur. Gelen x-ışını demeti malzemenin yüzey katmanlarına nüfuz eder ve kristalografik düzlemler arasındaki mesafeye bağlı olarak kırılır. Kırılan x-ışınları dedektörler tarafından kaydedilir ve bu veriler kullanılarak artık gerilme hesaplanmaktadır. X-ışını yöntemi yalnızca elastik deformasyonu ölçer ve artık gerilme boyutu ile doğru orantılıdır (Czan vd., 2016).

4.3.5. Elektron Mikroskobu Yöntemi

Elektron mikroskobu yöntemi, malzemelerin atomik ve nano ölçekteki karakterizasyonu için kullanılan bir analiz aracıdır. Geleneksel ışık mikroskoplarından farklı olarak, elektron mikroskopları görüntü oluşturmak için ışık yerine elektronları kullanır. Elektronların dalga boyu, görünür ışığından çok daha kısa olduğundan, çok daha yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesini sağlamaktadır. Elektron mikroskobu yöntemi, farklı teknikler aracılığıyla malzemelerin detaylı incelenmesini sağlar ve bunlardan bazıları şunlardır:

Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM): TEM, ince numunelerden bir elektron demeti geçirerek yüksek çözünürlüklü mikro yapılar ve atomik düzen hakkında görüntü elde etmeyi sağlayan bir tekniktir.

Tarama Elektron Mikroskobu (SEM): SEM, numunenin yüzeyini taramak için odaklanmış bir elektron demeti kullanarak malzemenin yüzey topografyasını ve morfolojisini incelemeye olanak tanımaktadır. Bu yöntem, malzemenin yüzey yapısını yüksek çözünürlükle görselleştirmektedir.

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS): EDS, elektron bombardımanı ile numuneden yayılan X-ışınlarını analiz ederek malzemenin elementel bileşenlerini tespit eden bir tekniktir.

Tarama Transmisyon Elektron Mikroskobu (STEM): STEM, SEM ve TEM prensiplerini birleştirerek, numunenin hem yüzeyini hem de iç yapısını yüksek çözünürlükle incelemeye olanak tanımaktadır.

Elektron Kırınımı: Elektron kırınımı, bir numuneye bir elektron demeti atışarak ve malzemede atomların düzenini belirlemek için ortaya çıkan kırınım modelini analiz ederek malzemelerin atomik yapısını incelemek için güçlü bir tekniktir.

Operando Elektron Mikroskobu: Operando mikroskobu, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar gibi süreçler sırasında numunenin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlamaktadır.

Sapma Düzeltilmiş Elektron Mikroskobu (ACEM): ACEM, elektron mercekları kullanarak, görüntüdeki sapmaları düzelterek atomik ölçekte yüksek çözünürlüklü analizler yapmayı sağlamaktadır.

Elektron mikroskobu, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoloji, tıp ve mühendislik gibi pek çok alanda geniş uygulama alanlarına sahip olup, malzemelerin mikro yapıları, morfolojisi ve elementel bileşenleri üzerine derinlemesine analizler yapılmasına olanak tanımaktadır (Agrawal vd., 2024).

4.3.6. Optik Mikroskop Yöntemi

Optik mikroskop yöntemi, yüzey pürüzlülüğünü ve diğer yüzey özelliklerini ölçmek için ışığı kullanan temassız bir tekniktir. Bu yöntemde, bir ışık huzmesi yüzeye odaklanır ve yansıyan ışık bir sensör tarafından toplanmaktadır. Yansıyan ışığın analizi, yüzeyin yükseklik değişimlerini belirlemek ve yüzey pürüzlülüğü

parametrelerini hesaplamak için kullanılır. Bu sistem, üç boyutlu yüzey görüntüleri oluşturmak için optiğin odak varyasyonunu kullanarak farklı dikey mesafelerde bir dizi görüntü çeker ve optik keskinliği kullanmaktadır. Hem renk hem de topografik bilgi yakalayabilir, form ve pürüzlülük parametrelerini analiz etmek için kullanılabilir. Ayrıca alansal yüzey pürüzlülüğü parametrelerini bulmak için de kullanılabilir (Duboust vd., 2017)(Zhao vd., 2021).



5. LİTERATÜR

Yapılan detaylı literatür çalışmasında delik delme problemlerine önerilen farklı yaklaşımların olduğu görülmüştür. Çalışmaların bir kısmının derin delik delme çevrimlerinin gerek ürün hassasiyeti (geometrik tamlık, yüzey hassasiyeti, vs.) gerekse işlem verimliliği (delme süresi) açısından iyileştirilmesine, diğer kısmının ise kesme parametrelerinin delik geometrisi ve yüzey kalitesine etkilerinin üzerine odaklandığı görülmektedir.

Lin ve çalışma arkadaşları, matkap aşınmasının kesme kuvveti sinyalleri aracılığıyla izlenebilirliğini geniş bir kesme koşulları altında incelemiştir. Bakır alaşımı delme işlemlerinde matkap aşınmasının ve diğer kesme parametrelerinin kesme kuvveti sinyalleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma, matkap aşınması ile kesme kuvveti sinyalleri arasındaki ilişkileri ortaya koymuş; ilerleme hızı, mil dönüş hızı, matkap çapı ve diğer kesme parametreleri ile olan bağlantıları belirlemiştir. Bu ilişkilere bağlı olarak, takım aşınmasının tahmin edilebileceği ifade edilmiştir. Özellikle, ilerleme miktarı, itme kuvveti sinyalleri ve matkap çapı gibi parametrelerin bilindiği durumlarda takım aşınmasının tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma, takım aşınmasını belirlemek için kesme kuvveti sinyallerinin etkin bir araç olabileceğini göstermektedir (Lin & Ting, 1994).

Hassan ve arkadaşlarının yapmış oldukları ezerek parlatma (burnishing) işleminin temel amacı, iş parçasının yüzeyindeki pürüzlülükleri azaltarak daha pürüzsüz bir yüzey elde etmek ve yüzey sertliğini artırmaktır. Bu işlem, yüzeydeki tepe noktalarından metalin plastik deformasyonu ile yüzey kalitesini iyileştirmektedir. Ezerek parlatma ayrıca, iş parçasının aşınma direncini, korozyon direncini ve yorulma dayanımını artırmakta ve yüzeyde kalıcı basınç gerilmeleri oluşturmaktadır. Deneyler sonucunda, ezerek parlatma kuvveti ve paso sayısı gibi parametrelerin yüzey özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu bulunmuştur (Hassan & Sharef A1-Bsharat, 1996).

Ke ve çalışma arkadaşları, derin delik delme işlemlerinde talaş kalınlaşmasının etkilerini incelemiştir. Araştırma, talaşın dışarıya akışını engelleyen kuvvetlerin olduğu durumlarda, talaş kalınlığının ve kesme kuvvetlerinin arttığını ortaya koymuştur. Talaş kalınlaşmasının etkilerini değerlendirmek için geliştirilen analitik

model, deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışma, derin delik delme işleminde delme kuvvetlerinin artışının hem talaşın sürtünmesinden hem de talaş kalınlaşmasından kaynaklandığını göstermektedir. Matkap oluğunun talaş akışını kısıtlaması, talaş şekli ve delme kuvvetlerini değiştirmektedir. Araştırmada, derin delik delme sırasında talaş kalınlığının ilerleyen derinliklerle arttığı ve bu artışın delme kuvvetine etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, talaş çıkarma zorlaşmakta, talaşlar matkap oluğunda birikmekte ve sürtünme, talaş akışına karşı direnci artırmaktadır. Bu direnç, delme ilerledikçe büyüyüp kesme bölgesine iletilmekte ve talaş oluşum sürecini değiştirmektedir. Sonuç olarak, derin delik delme sırasında talaşlar, orijinal şekillerinden farklılaşmaktadır. Tipik bir matkapta, iç kesici kenarın dış kesici kenara göre daha küçük bir talaş açısına sahip olduğu ve ilk talaşların iç tarafta daha kalın, dış tarafta ise daha ince olduğu gözlemlenmiştir (Ke vd., 2006).

Imran ve çalışma arkadaşları, derin delikli mikro delmenin nikel bazlı süper alaşımlar için zorluklarını incelemektedir. 1 mm'den küçük takımlar kullanarak nikel alaşımlarında mikro delme işlemiyle ilgili literatürde bir bilgi bulunmadığını belirtmişlerdir. Çalışma, ön deliğin geometrisinin kontrol edilmesinin önemli olduğunu ve büküm matkabının yükünü kademeli artırarak nikel alaşımların delinmesini sağladığını göstermektedir. Matkap aşınması, yüzey bütünlüğü ve performansın optimize edilmesi, gelecekteki araştırma alanları olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, Nikel bazlı süper alaşımların derin delikli mikro delinmesi mümkündür. Mikro delme işlemi, talaş yüküne, iş mili hızına ve gagalama derinliğine duyarlı bir süreçtir. Kullanılan matkap kırılmadan önce yaklaşık 80 delik açılabilir. Ancak, matkap aşınması, yüzey bütünlüğü ve performansın optimizasyonu, daha fazla araştırma gerektirmektedir (Imran vd., 2008).

Kim ve çalışma arkadaşları, çelik üzerinde derin mikro delik delme işlemlerinde takım ömrünü iyileştirmek amacıyla itme kuvveti izleme kullanan bir gagalama (peck delme) yöntemini kullanmışlardır. Yöntem, zaman ve frekans alanında itme kuvvetinin analiz edilmesine dayanmaktadır ve kararlı işleme sağlamak için uygun tek adım ilerleme uzunluğunu (OSFL) belirlemek amacıyla üç izleme parametresi tanımlamaktadır. Yapılan deneyler, izleme sisteminin AISI 1045 ve AISI P20 çeliklerinde takım ömrünü önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Ayrıca, izleme sistemi kullanılmadığında, takım çapının onda biri kadar sabit bir OSFL'nin hem kararlı mikro delme işlemi hem de takım ömrü iyileştirmeleri için uygun olduğu tespit

edilmiştir. Elde edilen bulgular, mikro delme işlemlerinde takım ömrü ve işlem kararlılığını artırmak için pratik bir yaklaşım sunmaktadır (Kim vd., 2009).

Liu ve çalışma arkadaşları, 4145H çeliğinden sondaj kulesi için 71 mm çapında ve 7500 mm uzunluğunda süper uzun derin delik delme işlemini incelemişlerdir. Çalışma, çelik malzemenin özellikleri, uygun takım seçimi, ideal kesme parametreleri ve delme, taşıyıcı ile honlama süreçlerini kapsamlı bir şekilde ele almakta ve optimal işleme yöntemini belirlemektedir. Deney sonuçları, üretim sorunlarını çözmek için uygun kesme yöntemleri, takım seçimi ve parametreler kullanılarak gerçekleştirilen işlemin kararlı ve güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma, üretim verimliliğini ve kaliteyi artırmaya yönelik çözümler sunmayı hedeflemektedir (Z. Liu & Li, 2011).

Liu ve çalışma arkadaşları, 304 paslanmaz çeliğin süper uzun derin delik delme işleminin teknolojik testini incelemektedir. Çalışma, çelik türü, kesici takım geometrisi, kesme parametreleri ve delme yöntemleri gibi çeşitli faktörlerin işlem üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. BTA derin delik delme sistemi kullanılarak, belirli parametreler (50 mm çap ve 4700 mm uzunluk) ile başarılı bir şekilde delme işleminin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, optimal kesme parametreleri ve soğutucu sıvı kullanımı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü ve doğruluk gereksinimlerini karşılayan etkili bir yöntem sunmaktadır. Yapılan testler, yüksek basınçlı titreşimli kesme sıvısı besleme yönteminin en etkili yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Bu yöntem, yalnızca delme işlemini dengeleyerek titreşimi sönmölemekle kalmaz, aynı zamanda takım sapmasını da önemli ölçüde azaltmaktadır (Z. F. Liu & Xu, 2013).

Huang ve çalışma arkadaşları, G73 ve G83 çevrimlerini birleştirerek hibrit bir matkap komutu geliştirmiştir. Özel bir makro komut kullanılarak oluşturulan bu hibrit, toplam matkap derinliğini farklı mesafelere bölmeyi ve bu mesafeleri kademeli olarak azaltmayı hedeflemektedir. Matkap talaşı G73 çevrimi ile kırılırken, her mesafede matkabın delikten geri çekilmesi için G83 çevrimi kullanılmıştır. Hibrit matkap komutu, CNC işleme merkezinde gerçekleştirilen derin delik delme deneyleriyle değerlendirilerek elde edilen sonuçlar, bu yöntemin takım aşınmasını azaltmada, matkap ömrünü uzatmada ve işlem süresini kısaltmada başarılı olduğunu ortaya koymuştur (Huang & Wu, 2012).

Omrou ve çalışma arkadaşları, Heidenhain ve Fanuc gibi yaygın olarak kullanılan modern CNC kontrol sistemlerinde mevcut derin delik delme dlerinin mekanizmalarını temel alarak delik delme işlemlerine uygun bir G-kodu algoritması geliştirmeyi hedeflemiştir. Bu algoritma, gagaama stratejilerinde esneklik sağlayacak şekilde tasarlanmıştır ve g bir CNC programlama yöntemi olan parametrik programlamaya dayanmaktadır. Önerilen algoritma, modern CNC kontrol sistemlerinin standart dlerinden farklı olarak, her bir duruma özel yeni gagaama stratejileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Algoritma, delme sürecini etkileyen tüm faktörleri değişken parametreler olarak tanımlayarak, programcılara işlem süresini en aza indirirken yüksek yüzey kalitesi elde etmek için uygun değerlerinin seçilmesi sağlamaktadır. Bu algoritmanın etkinliği, simülasyon testleriyle değerlendirilmiş ve derin delik delme işlemlerinde etkili bir m sunduğunu göstermiştir (Omrou & Fyrrillas, 2015).

Patra ve çalışma arkadaşları, yüksek hassasiyetli imalat süreçlerinde mikro mekanik peck delme işlemi sırasında takım aşınması ve kırılmasını izlemek amacıyla yapay sinir ağları (ANN) kullanmışlardır. Takım aşınması, farklı kesme koşullarında elde edilen delinmiş delik sayısıyla ilişkilendirilmiş olup, ANN modeli, itici kuvvet ve kesme parametrelerini temel alarak delinmiş delik sayısını tahmin etmektedir. ANN modelinin performansı, regresyon modeliyle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yeni test verileriyle doğrulanmıştır. Çalışma, ANN modelinin takım durumunu tahmin etmek için güvenilir ve etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır (Patra vd., 2017).

Yaman ve çalışma arkadaşları, Ti6Al4V titanyum alaşımının delinmesinde, kaplamasız kısa ve uzun HSS matkapların performansını karşılaştırarak takım boyunun delinme sürecine etkisini incelemiştir. Aynı kesme parametreleri kullanılarak iki farklı uzunluktaki matkaplarla gerçekleştirilen deneylerde, uzun matkapların takım aşınması açısından kısa matkaplara kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ancak, uzun matkaplarda yanal, eksenel ve burulma titreşimlerinin neden olduğu salgılar, delik çapı ve geometrik toleransları olumsuz yönde etkilemiştir. İlerleme hızındaki artışın, her iki matkap türünde de yüzey pürüzlülüğünde artışa yol atığı, bu etkinin özellikle uzun matkaplarda daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, delik sayısının artmasıyla kısa matkaplarda gözlemlenen takım aşınmasının, delik yüzey

pürüzlülüğünü artırarak uzun matkaplarda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir (Yaman vd., 2017).

Bykador ve çalışma arkadaşı, derin delme sürecinde çatallaşma oluşumunu incelemişlerdir. Çatallaşma, kesme kuvveti ile matkap yan yüzeyi ve delik yüzeyi arasındaki karşılıklı etkileşimine ilişkisine dayanmaktadır. Kesme bölgesinde meydana gelen kuvvetler, takımların radyal hareketine bağlı olarak kesme sürecinin doğrusal olmayan dinamik özelliklerini şekillendirir. Radyal hareket, özellikle küçük çaplı deliklerin derin delinmesinde belirgin bir özellik taşımaktadır. Bu çalışmada, derin delme sürecinde ortaya çıkan çeşitli olguları anlamının ve bu olguları kontrol sürecinin erken aşamalarında düzeltmenin önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca, derin delme sistemlerinin durumunu dinamik olarak izlemeye yönelik bir sistem geliştirilmesinin gerekliliği ve süreçlerin kontrol edilmesi ve istenmeyen olguların engellenmesinin önemi vurgulanmıştır (Bykador & Bykador, 2017).

Han ve çalışma arkadaşları, derin delik delme işlemlerinde matkap kırılmasını önlemek ve işleme verimliliğini artırmak amacıyla, tekrarlı öğrenme kontrolü (ILC) tabanlı yeni bir delme derinliği optimizasyon yöntemi önermektedir. Söz konusu yöntem, talaş tahliye tork modelini basitleştirerek ve talaş uzaklaştırma sürecinin etkilerini analiz ederek, her adımda optimum delme derinliğini yinelemeli olarak belirlemektedir. Yenilenmiş bir Newton yöntemi kullanılarak maksimum verimlilik sağlanmakta ve matkap kırılmasının önüne geçilmektedir. Farklı kesme parametreleri altında gerçekleştirilen deneyler, yöntemin etkinliğini ve %10'dan daha az hata oranı ile doğru derinlik tespiti sağladığını ortaya koymaktadır (Han vd., 2018).

Çiftçi ve çalışma arkadaşı, Ti6Al4V titanyum alaşımının karbür matkaplarla delinmesi sırasında matkap aşınmasını incelemek amacıyla üç farklı delme yöntemi uygulamışlardır. İlk yöntemde, matkap doğrudan iş parçasına dalarak delme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde, matkap her defasında 1 mm derinliğinde dalmış ve ardından 2 mm geri çekilerek (gagalama) delme işlemi yapılmıştır. Üçüncü yöntemde ise, matkap her seferinde 1 mm derinliğinde dalıp tam geri çekilme ile delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, farklı delme yöntemlerinin matkap aşınmasını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, delme işlemindeki yöntem seçimlerinin aşınma ve takım ömrü üzerinde önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Çiftçi & Gökçe, 2018).

Ulaş'ın yapmış olduğu çalışmada, AISI D2 ve AISI D3 soğuk iş takım çeliklerinin delinmesi sırasında uygulanan kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında farklı kesme hızları, ilerleme oranları ve matkap malzemeleri (HSS ve karbür) kullanılarak maksimum kesme kuvvetleri ve tork değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar, ilerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinde genel bir artış gözlemlendiğini, ancak kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, AISI D3 çeliğinin delinmesi sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin AISI D2 çeliğine kıyasla daha yüksek olduğu ve karbür matkapların kullanımıyla daha düşük kesme kuvvetleri elde edildiği belirlenmiştir (Ulaş, 2018).

Mehtaf ve çalışma arkadaşları, G83 çevriminde takım çapı optimizasyonu için yeni bir metodoloji geliştirmiştir. Minimum kesme maliyetine ulaşmak için kesme hızını ve ön delik çaplarını tahmin etmeyi hedeflemektedir. Bu amaçla, bir ön delik çapı modellemesi önerilmiş ve döngü süresi, makinenin kinematik performansına bağlı olarak bir ilerleme hızı modellemesiyle hesaplanmıştır. Sonuçlarının hassasiyetini artırmak için, teknolojik ve makine kısıtlamalarını (mil hızı, makine gücü ve besleme hızı) göz önünde bulunduran bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca, besleme hızı modellemesini doğrulamak ve incelenen malzemenin özgül kesme kuvveti değerini hesaplamak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Prosedürün açıklanması amacıyla, AISI 4140 iş parçası malzemesi üzerinden elde edilen sonuçlar, G83 çevriminde ekonomik bir delme sürecinin, minimum ön delik çapı ile elde edilebileceğini göstermiştir (Ben Meftah vd., 2019).

Harshith ve çalışma arkadaşları, havacılık alarımında gagalama (peck delme) işlemleri sırasında yüzey bütünlüğü ve silindiriklik hatasının iyileştirilmesine yönelik bir araştırma sunmuşlardır. Çalışmada, grafit, MOS2 ve Blasocut yağlayıcılarının kuru koşullarla karşılaştırılması yoluyla farklı devir ve ilerleme hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, katı yağlayıcıların kullanıldığı peck delme işlemlerinin, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik üzerinde belirgin iyileşmeler sağladığını ve silindiriklik hatasını azalttığını ortaya koymaktadır. En iyi yüzey kalitesi, molibden disülfür (MOS2) kaplı matkap ile elde edilmiştir (Harshith vd., 2019).

Shete ve çalışma arkadaşı bu makalede, AISI 1055 çeliği üzerinde yüksek basınçlı soğutucu (HPC) kullanılarak gerçekleştirilen delme işleminde, yüzey pürüzlülüğü üzerine takım tezgâhı hızı, ilerleme hızı, delme derinliği ve soğutucu basıncının etkilerini Taguchi tekniği ile incelemiştir. Deneysel sonuçlar, optimum soğutucu basıncının 13.5 bar olarak belirlendiğini ve soğutucu basıncı ile takım tezgâhı hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Yüksek basınçlı soğutucu kullanımının, yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve üretim maliyetlerini düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır (Shete & Sohani, 2020).

Mukhtar ve arkadaşları, Minimum Miktar Yağlama (MQL) yöntemiyle AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğinin gagalama delme tekniğiyle işlenmesi üzerine bir araştırma sunmuşlardır. Çalışma, kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap açısı gibi işleme parametrelerinin takım ömrü, yüzey bütünlüğü ve delik hassasiyeti üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Deneysel veriler, optimum işleme parametrelerini belirlemek ve bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ile takım ömrü arasındaki ilişkisini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiş olup elde edilen sonuçlar, düşük kesme hızı ve ilerleme hızının, daha uzun takım ömrü ve iyileştirilmiş yüzey kalitesi sağladığını ortaya koymaktadır (Mukhtar vd., 2021).

Attabi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, 316L paslanmaz çeliğin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bilyalı parlatma işleminin mekanik özellikler ve aşınma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, bilyalı parlatma işleminin yüzey mikrosertliğini artırdığı ve aşınma kaybını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Optimum işlem parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen bilyalı parlatma işlemi sonucunda, yüzey mikrosertliğinde %38,3'e varan bir artış sağlanırken, aşınma kaybında %65,2'ye kadar azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, nano-sertlik ve elastik modül değerlerinde de belirgin bir artış meydana gelmiştir. XRD analizleri, bilyalı parlatma işlemi sonrasında tane boyutunda küçülme gerçekleştiğini ancak malzemenin faz kompozisyonunda herhangi bir değişiklik olmadığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak yapılan çalışma bilyalı parlatma işleminin 316L paslanmaz çeliğin sürtünme davranışını iyileştirdiğini ve sertleşmiş tabakanın derinliğinin artırılmasının aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Attabi vd., 2021)

Mon ve çalışma arkadaşları, işleme stratejilerinin deliklerin geometrik doğruluğu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test edilen stratejiler arasında en yüksek geometrik doğruluk, punta deliği delme ($v_c = 50$ m/dak, $f = 0.15$ mm/dev) ve ön delme işlemi ($v_c = 60$ m/dak, $f = 0.16$ mm/dev) içeren ikinci stratejiyle elde edilmiştir. Bu strateji, ardından uzun delik delme işlemi ($v_c = 25$ m/dak, $f = 0.1$ mm/dev ve değişken besleme) ile tamamlanmıştır. En düşük geometrik doğruluk ise, aynı parametreler ve besleme hızlarıyla fakat ön delme işlemi kullanılmadan yapılan delme işlemiyle elde edilmiştir. Ayrıca, delik eksenlerinin pozisyonundaki sapmaların daha büyük olduğu gözlemlenmiş, bu sapmalar özellikle deliklerin akslarına dik olan düzlemde ve platinin arka kenarına dik olan düzlemde daha belirgin hale gelmiştir (Mon vd., 2022).

Ma ve çalışma arkadaşları, Inconel 718 nikel-bazlı süper alaşımının işlenebilirliğini, farklı malzeme ve yapıya sahip üç burgu ucu kullanarak konvansiyonel ve gagalama delme yöntemleriyle değerlendirmektedir. Çalışma, delme kuvvetleri, takım aşınması ve işleme kalitesi gibi faktörleri inceleyerek, nikel-bazlı süper alaşımların delme işlemlerinde uygun takım seçiminin ve gagalama delme yönteminin parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak, KDG303 karbür uçlu burgunun en yüksek performansı sergilediğini, çift boşluk açısının delme kuvvetini azalttığını ve gagalama delmenin işleme doğruluğu ile yüzey kalitesini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır (L. J. Ma vd., 2023).

Albar'ın yapmış olduğu çalışmada, ezerek parlatma yönteminin parametreleri olan ezme kuvveti, paso sayısı ve ilerleme miktarının AISI 316 östenitik paslanmaz çelik üzerindeki etkilerini (yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği, çap değişimi ve çekme mukavemeti) deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde bu yöntemle ilişkin sınırlı sayıda çalışma bulunması nedeniyle, yöntemin uygulanabilirliğinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yüzey pürüzlülüğünde 450 N kuvvete kadar iyileşme sağlandığı, çekme dayanımının uygulanan kuvvet ve paso sayısındaki artışla yükseldiği, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ezme kuvvetinin artmasıyla mikrosertlik değerinde bir yükselme gözlemlenirken, bu etkinin 450 N'den sonra azaldığı belirlenmiştir. Çap değişiminin hem kuvvet hem de paso sayısının artmasıyla yükseldiği, ancak ilerleme miktarının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, yüzey bölgesinde meydana gelen plastik deformasyonun tane yapısında değişimlere yol açtığı saptanmıştır. Sonuç olarak ezerek parlatma yönteminin AISI 316

paslanmaz çelik üzerinde önemli yüzey ve mekanik özellik değişimleri sağladığını göstermiştir (Albar, 2023).

Çelik'in yapmış olduğu çalışmada, Inconel 718 süper alaşımının yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla ezerek parlatma yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Tornalama işlemi uygulanmış Inconel 718 numuneleri, disk şeklindeki bir aparat kullanılarak ezerek parlatma işlemine tabi tutulmuş ve yöntemin yüzey kalitesine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemiyle gerçekleştirilen 16 deney sonucunda, yüzey pürüzlülük değerlerinde ortalama %94,29'luk bir iyileşme sağlanmış ve EP yönteminin Inconel 718 alaşımının yüzey kalitesini artırmada başarılı ve uygulanabilir bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Sinyal/Gürültü oranı analizi, paso sayısının yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (YPİO) üzerinde en etkili parametre olduğunu, ardından ilerleme miktarının ve baskı kuvvetinin geldiğini göstermiştir. Baskı kuvvetindeki artışın özellikle yüksek paso sayısı ve düşük ilerleme miktarlarında YPİO üzerinde olumsuz etki yaptığı, ilerleme miktarındaki artışın YPİO üzerinde olumlu etki yaparken, paso sayısındaki artışın özellikle yüksek baskı kuvvetlerinde olumsuz etki yaptığı belirlenmiştir (M. Çelik, 2023).

Tamura ve çalışma arkadaşı, yüksek üretim oranlarına ulaşmak amacıyla gerçekleştirdikleri derin delik delme işleminde, talaş tıkanması nedeniyle meydana gelen takım kırılmaları ve yüzey kalitesindeki bozulmaları ele almaktadır. Takım aşınmasının geometrik değişimleri ile talaş akışındaki değişikliklerin bu sorunlara neden olduğu vurgulanmaktadır. Çalışma, kesme kuvvetini analiz etmek, talaş akışını simüle etmek ve takım aşınmasının yüzey kalitesi ile delik profilindeki etkilerini incelemek için deneysel ve analitik yöntemleri birleştirmektedir. Deneysel sonuç, takım aşınmasının talaş akışını radyal yönde değiştirdiğini ve bu değişikliğin talaş tıkanmasına yol açtığını ortaya koymuştur (Tamura & Matsumura, 2024).

6. TEST VE ÖLÇÜM

6.1. Materyal

Bu çalışmada, deformasyon sertleşmesinin giriş çapağı oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda seçilecek malzemenin işlenebilirliğinin nispeten zor olması, sünek yapısı nedeniyle talaşın kıvrılmaya meyilli olması ve deformasyon sertleşmesi göstermesi önemli kriterler olarak değerlendirilmiştir. Bu özellikleri sağlaması nedeniyle, endüstride sıklıkla kullanım alanı bulan yüksek korozyon direncine sahip, biyouyumlu AISI 316L östenitik paslanmaz çelik bu çalışma için uygun bulunmuştur. Deneylerde kullanılan AISI 316L malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Oda Sıcaklığındaki Mekanik Özellikleri	
Kalite	316L (1.4404) X2CrNiMo17-12-2
Kopma mukavemeti	Min 485 Mpa
Akma mukavemeti, (%0.2)	Min 170 Mpa
Sertlik, Vickers (HV)	Max 226 HV

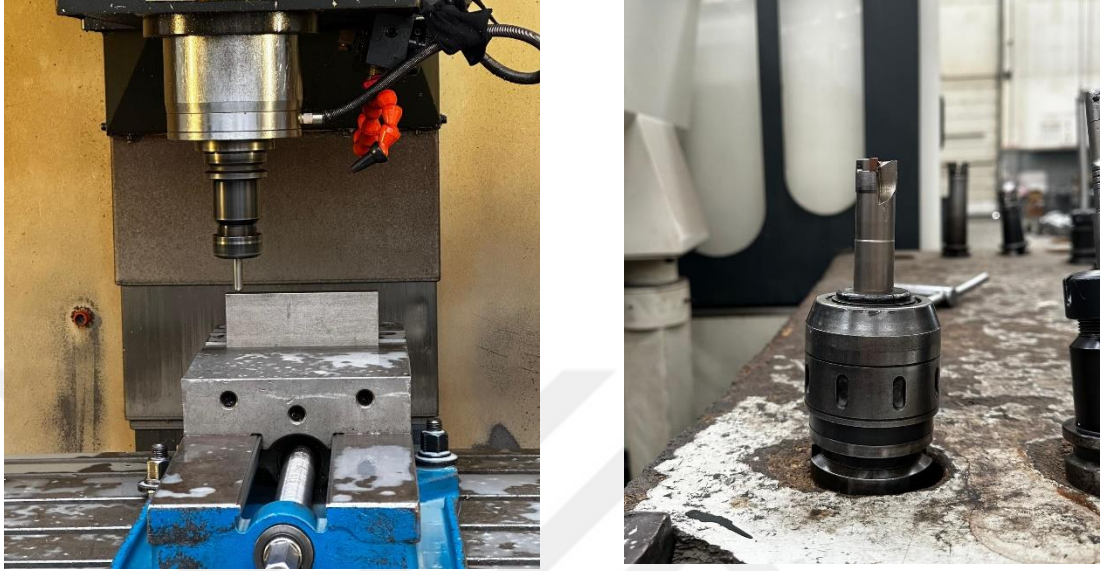
Tablo 6.2. Deney Numunelerinin Kimyasal Özellikleri

AISI 316L Kimyasal Bileşimi										
Kalite	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	P	S	N
316L (1.4404)	0,013	0,38	1,43	16,68	2,05	10,07	0,162	0,029	0,028	0,077

6.2. Numunelerin Ezerek Parlatma İşlemlerinin Yapılması

Deney için üç adet numune, 100 mm × 15 mm × 150 mm ölçülerinde frezelenerek hazırlanmıştır. Numunelerden birine iki paso, diğerine ise üç paso ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Kontrol amaçlı olarak üçüncü numune herhangi bir ezerek parlatma işlemine tabi tutulmamıştır. Yüzey frezeleme ve ezerek parlatma

işlemleri için Aymas Makine San. Ve Tic. A.Ş. firması bünyesinde bulunan Hartrol-M7200 MITSUBISHI kontrol ünitesine sahip Hartford marka CNC freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan takım tezgâhı ve kesici takım Şekil 6.1 de gösterilmiştir



Şekil 6.1: Hartford CNC Tezgâhı ve freze ucu

Ezerek parlatma işlemi için özel üretilmiş 10mm çapında yarım küre şeklinde form verilmiş, Krom-Karbo-Nitrür (CrCN) kaplamalı, sinterlenmiş karbür takım kullanılmıştır. Bu takım Şekil 6.2’de görülmektedir. Tablo 6.3’te ise belirtilen kaplamanın teknik özellikleri verilmiştir (Müftüoğlu, 2014). Ezerek parlatma işlemi için kullanılan işlem parametreleri; devir sayısı 500dev/dak, ilerleme hızı 0,125mm/dev (fn), penetrasyon derinliği 0,05mm (50 μ m) (ap) ve yan kayma miktarı 0,2mm (ae) şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 6.2. Krom Karbo-Nitrür Kaplama (CrCN)(Müftüoğlu, 2014)

Tablo 6.3. Krom Karbo-Nitrür Kaplama Özellikleri(Müftüoğlu, 2014)

Kimyasal Bileşimi	CrCN
Sertlik (HV 0,05)	1400±200
Oksidasyon Sıcaklığı (C°)	500
Sürtünme Katsayısı	0,2-0,3
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0,2
Kalınlık (µm)	1-4
Renk	Koyu gri

6.3. Delik Delme İşlemleri

Delik delme işlemleri, Süleyman Demirel Üniversitesi bünyesindeki Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi Tasarım ve İmalat Birimi (YETEM)’de, Hartford marka 4 eksenli dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Delik delme işlemleri esnasında Kistler Tip 9257B marka 3 Eksen Dinamometre kullanılarak kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 6.3 ve 6.4’te deney süreçlerine ait görseller paylaşılmıştır.



Şekil 6.3. CNC 4 Eksen dik işleme merkezi



Şekil 6.4. Kistler Tip 9257B marka 3 Eksen Dinamometre

Delik delme işlemlerinde Maier marka, matkaplar tercih edilmiştir. Matkaplara ait teknik özellikler Tablo 6.4'te verilmiştir. Üretici firmanın web sayfasında, 316L paslanmaz çelik için önerilen kesme hızı 100 m/dak, ilerleme miktarı ise 50mm/dak olarak belirtilmiş ve deneylerde bu değerler kullanılmıştır. Tüm delik delme işlemleri kuru ortamda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.4. Matkap Özellikleri

	Malzeme	HSS
	Kaplama	Co.8%
	Çap	9,8mm
	Helis açısı	30°
	Uç açısı	135°
	Kesme boyu	65mm
	Tam boyu	133mm
	Kesici ağız sayısı	2 adet

Deformasyon sertleşmesinin giriş çapağına etkisini daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla, 30 mm derinliğindeki kör deliklerin delinebilmesi için farklı delik delme çevrimleri kullanılmıştır. Bu çevrimler genellikle derin delik delme işlemlerinde tercih edilse de doğalarındaki tekrarlı giriş-çıkış hareketleri nedeniyle delik iç yüzeyinde deformasyon sertleşmesine yol açmaları kaçınılmazdır. Bu nedenle, çalışmada bu çevrimlerin kullanımı özellikle tercih edilmiştir. İlk koşulda sabit adımlı gagalama

çevrimi, ikinci koşulda sabit adımlı talaş kırma çevrimi, üçüncü koşulda ise değişken adımlı gagalama çevrimi uygulanmıştır. Sabit adımlı işlemlerde adım değeri 5mm ($5+5+5+5+5+5+5+5=30\text{mm}$), güvenli yaklaşma mesafesi 2mm olarak belirlenmiştir. Değişken adımlı işlemlerde adım değeri 5mm'den başlayarak azaltılarak değiştirilmiştir ($5+5+4+4+3+3+2+2+1+1=30\text{mm}$). Tüm parametreleri içeren deney planı Tablo 6.5'te, işleme için kullanılan G kodları ise Tablo 6.6'da verilmiştir. Her deney şartı üçer kez tekrarlanmış, dolayısıyla toplamda 27 adet delik işlenmiştir. Delik delme işlemleri ve işlenen numuneler Şekil 6.5 ve 6.6'da görülmektedir.

Tablo 6.5. Delme İşlemlerine Ait Parametreler

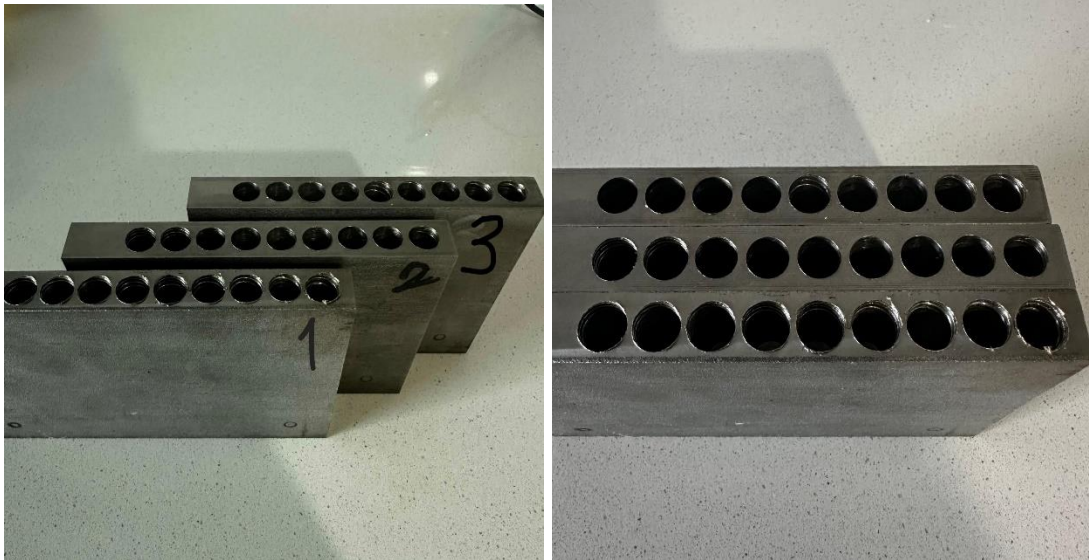
Numune No	Delik Delme Çevrimi	G kodu	Adım Değeri	Ezerek Parlatma Durumu
1	Gagalama	G83	Sabit	Yok
2	Gagalama	G73	Sabit	2 Paso
3	Gagalama	G83	Sabit	3 Paso
4	Talaş Kırma	G73	Sabit	Yok
5	Talaş Kırma	G73	Sabit	2 Paso
6	Talaş Kırma	G73	Sabit	3 Paso
7	Gagalama	G83	Değişken	Yok
8	Gagalama	G83	Değişken	2 Paso
9	Gagalama	G83	Değişken	3 Paso

Tablo 6.6. Delme İşlemleri Yapılırken Kullanılan G-kodları

G- Kodu	Açıklama
G98 G83 Z-30. R2. Q5. F50	Toplam Delinecek Derinlik:30mm Çevrim Tipi: G83 (Gagalama) Adım: 5mm (Q) Geri Çıkma Mesafesi: 2mm (R) İlerleme Miktarı: 50 mm/dak (F)
G98 G73 Z-30. R2. Q5. F50	Toplam Delinecek Derinlik:30mm Çevrim Tipi: G73 (Talaş Kırma) Adım: 5mm (Q) Geri Çıkma Mesafesi: 2mm (R) İlerleme Miktarı: 50 mm/dak (F)
G98 G83 Z-10. R2. Q5. F50 G98 G83 Z-18. R-7. Q4. F50 G98 G83 Z-24. R-15. Q3. F50 G98 G83 Z-28. R-21. Q2. F50 G98 G83 Z-30. R-25. Q1. F50	Toplam Delinecek Derinlik:30mm (10+8+6+4+2) Çevrim Tipi: G83 (Gagalama) Adım: 5+5+4+4+3+3+2+2+1+1mm (Q) Geri Çıkma Mesafesi: 2, -7, -15, -21, -25 mm (R)



Şekil 6.5. Delik delme deneyleri



Şekil 6.6. Delik delme deneyleri

6.4. Metalografik Analiz

Ezerek parlatma işlemi uygulanan yüzeylerin mikroyapı görüntülerinin incelenmesi amacıyla Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi metalografi laboratuvarında metalografik analizler gerçekleştirilmiştir. Numuneler Struers-Labotom-3 marka kesme makinesiyle (Şekil 6.7) numuneler çıkartılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.7. Numune kesme işlemi ve Struers-Labotom-3 marka kesme makinesi



Şekil 8. Struers-Labotom-3 kesme makinesi ile kesilmiş numuneler

Şekil 6.9’da görüldüğü üzere numuneler Struers CitoPress-1 sıcak bakelite alma cihazı kullanılarak bakelite alınmıştır. Ardından numuneler Şekil 6.10’da gösterilen Struers LaboPol-5 marka makine ile sırasıyla 200-400-600-800-1000-1200

zımpara kâğıtları ile zımparalanmışlardır. Ardından aynı cihazda önce 6-3 μm 'luk sonra 1 μm 'luk solüsyonlar ve kadife keçeler kullanılarak parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Struers CitoPress-1 sıcak bakalite alma cihazı ve numuneler



Şekil 6.10. Struers LaboPol-5 marka zımparalama ve parlatma cihazı

Parlatılan numuneler, 15 cc hidroklorik asit (HCl), 10 cc nitrik asit (HNO_3), 10 cc asetik asit (CH_3COOH) ve 3 damla gliserin solüsyonu ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) içeren bir dağlama çözeltisi ile dağlanmıştır. Ardından Şekil 6.11'de gösterilen NIKON Eclipse LV100 metal mikroskobu kullanılarak mikroyapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.



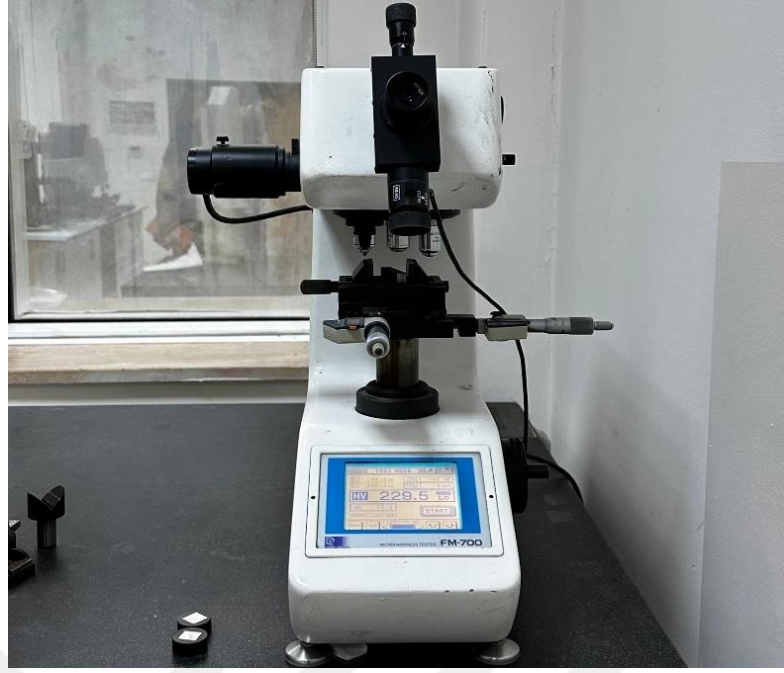
Şekil 6.11. NIKON Eclipse LV100 Metal Mikroskobu

6.5. Mikrosertlik Testi

Mikrosertlik ölçümleri, ezerek parlatılmış yüzeyden ana metale doğru olacak şekilde, 0,125 mm aralıklarla, 300 gf yük altında ve 10 saniye süreyle uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Şekil 6.12’de gösterilen Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı kullanılarak yapılmış ve her iki numunede de ezerek parlatılmış yüzeyden başlayarak ana metalde sona eren doğrusal bir çizgi boyunca, iki farklı bölgeden 5’er adet iz alınarak gerçekleştirilmiştir.

6.6. Yüzey Pürüzlülük Testi

Öncelikle ana metal ve ezerek parlatılmış yüzeyler ve daha sonra delik iç yüzeyleri olmak üzere yüzey pürüzlülük ölçümleri Şekil 6.13’te gösterilen Mitutoyo SJ 301 marka yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



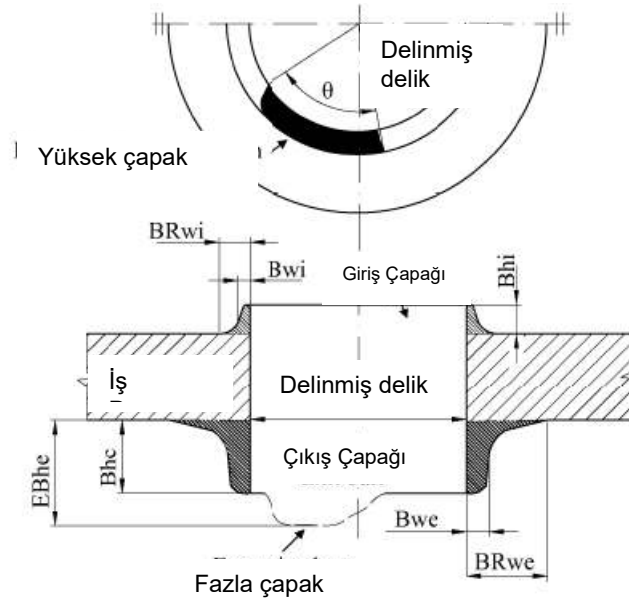
Şekil 6.12. Future-Tech FM-700 mikrosertlik cihazı



Şekil 6.13. Mitutoyo SJ 301 marka yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı

6.7. Çapak Boyutlarının Ölçümü

Bu çalışmada, delik delme esnasında oluşan giriş çapaklarının boyutları ölçülmüştür. Ölçümlerde Şekil 6.14 referans alınmıştır. Dolayısıyla Giriş Çapak Genişliği (Bwi), Çapak Kök Genişliği (BRwi) ve Giriş Çapak Yüksekliği (Bhi) Dino Capture Yazılımı ile ölçülmüştür.



Şekil 6.14. Çapak geometrisi(Pilný vd., 2011)

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

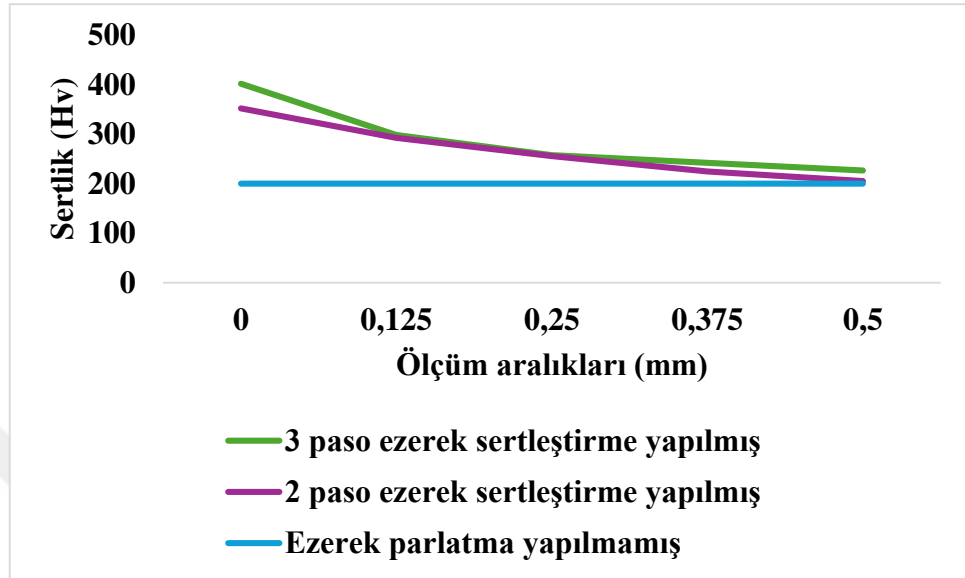
7.1. Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları

Ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerin en üst yüzeyinden 0,5 mm derinliğe kadar, 0,125 mm aralıklarla toplam beş adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1’de sunulan sertlik dağılım grafiği incelendiğinde, ezerek parlatma işlemi uygulanmamış numunenin ölçülen sertlik değerinin yaklaşık 200 Hv olduğu görülmektedir. Buna karşın, 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunenin en üst yüzeyinde ölçülen sertlik değeri 352,2 Hv, 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunenin en üst yüzeyinde ölçülen sertlik değeri ise 402,25 Hv olarak belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunede yaklaşık %75, 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunede ise yaklaşık %101 oranında bir sertlik artışı meydana geldiği tespit edilmiştir.

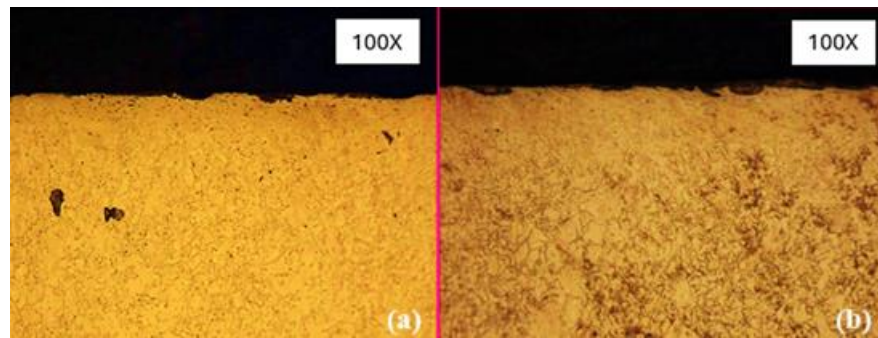
Şekil 7.1’de sunulan grafik detaylı olarak incelendiğinde, 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunede deformasyon sertleşmesinin etkili olduğu bölgenin derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, paso sayısının artmasının yalnızca yüzey sertliğini değil, aynı zamanda sertleşme bölgesinin derinliğini de etkilediğini göstermektedir. Dolayısıyla, ezerek parlatma işlemi sonucunda hem yüzey sertliğinde hem de deformasyon sertleşmesi etkisinin gözlemlendiği bölgenin derinliğinde belirgin bir artış meydana geldiği söylenebilir.

7.2. Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 7.2a’da 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunenin, Şekil 7.2b’de ise 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunenin iç yapı görüntüleri sunulmaktadır. Bu görseller, gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümlerini destekler niteliktedir. Özellikle Şekil 7.2b incelendiğinde, deformasyon sertleşmesinin etkili olduğu bölgenin 2 paso ezerek parlatma uygulanan numuneye kıyasla daha geniş bir derinliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 7.1. Numunelere ait mikrosertlik grafiği



Şekil 7.2. Ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapı görünümleri (a) 2 paso ezerek parlatma uygulanmış numune, (b) 3 paso ezerek parlatma uygulanmış numune (100× büyütme).

7.3. Delme Esnasında Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

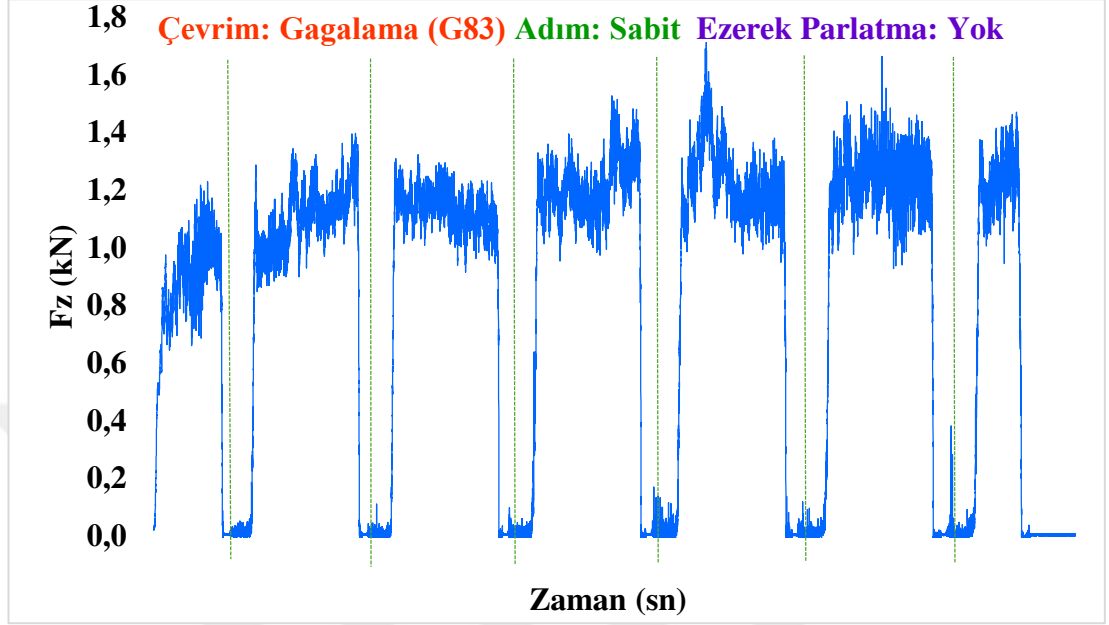
Bu çalışmada, deformasyon sertleşmesi gösterdiği bilinen 316L paslanmaz çelik malzemelerde, yüzeyde meydana gelen deformasyon sertleşmesi miktarı ile giriş çapağı oluşumu arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu doğrultuda, delme işlemi öncesinde delik giriş yüzeylerine ezerek parlatma işlemi uygulanmış ve ek olarak, gagalama yöntemi gibi tekrarlı hareketlerin kullanıldığı delik delme yöntemleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında, delik delme işlemi sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Şekil 7.3 ile Şekil 7.11 arasında her bir işlem koşulu için elde edilen Fz-Zaman grafikleri sunulmaktadır. Şekil 7.12’de ise her bir koşul için hesaplanan ortalama itme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerin genel analizi sonucunda, ilk 5 mm’lik derinlikte Z yönündeki (matkabın ilerleme yönü) kesme kuvvetinin kademeli olarak arttığı, ilerleyen kesme seviyelerinde ise bu kuvvetlerin ortalama değerler civarında seyrettiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.12’de verilen grafik diğer grafikler ile incelendiğinde, en yüksek güç gereksiniminin sabit adımla talaş kırmalı delik delme çevriminin (G73) uygulandığı koşullarda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, sertlik artışı ile bu yöntemin kullanıldığı koşullarda Fz değerlerinin düştüğü görülmüştür.

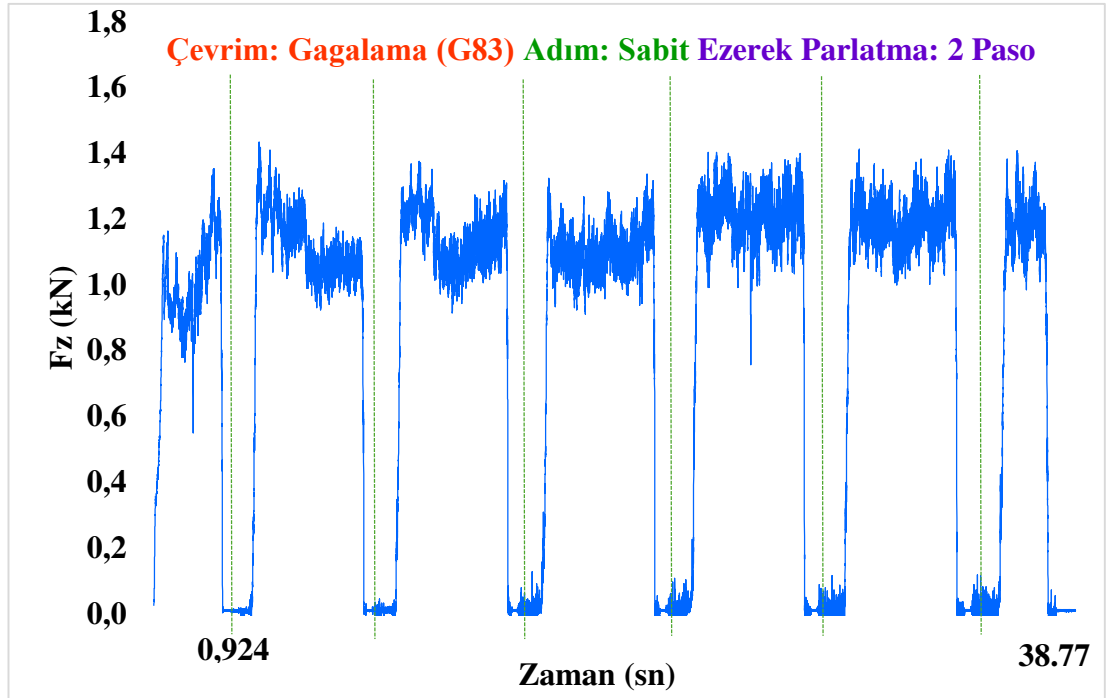
Tüm koşullar içinde en düşük Fz değerleri, 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanmış numunelere sabit adımlı gagalayarak delik delme yönteminin uygulandığı durumda (Koşul 2) elde edilmiştir. Öte yandan, değişken adımla gagalayarak delik delme yönteminin uygulandığı koşullarda (Koşul 7, 8 ve 9) sertlik değişiminden etkilenmediği tespit edilmiştir. Bu durumun birden fazla sebebi olabilir. Bunlar; adım değerlerinin giderek azalması ve kullanılan değerlerin standart gagalama yönteminde kullanılanlardan daha düşük olması, matkabın toplam hareket mesafesinin 410 mm olması nedeniyle sürtünme etkisinin artarak delik içinde ek deformasyon sertleşmesine neden olması olarak sıralanabilir. Benzer şekilde, sabit adımla gagalayarak delik delme işleminde takımın malzeme içinde toplamda 210 mm yol kat ettiği belirlenirken, sabit adımla talaş kırmalı delik delme yönteminde bu mesafenin 145 mm olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında, talaş kırmalı delik delme yönteminde diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek Fz değerlerinin elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.

Ezerek parlatma işleminin uygulanmadığı koşullarda, değişken adımlı gagalayarak delik delme yönteminin daha düşük kesme kuvvetleri ile gerçekleştirildiği

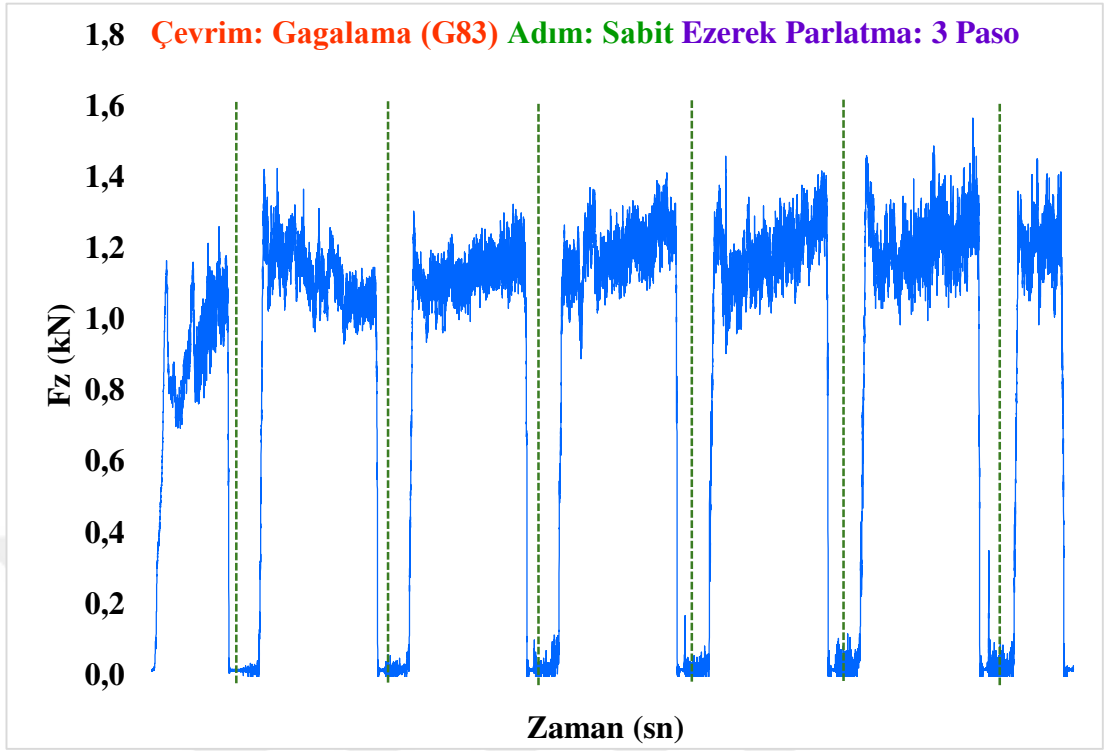
belirlenmiştir. Genel olarak ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde ise 2 paso uygulanan koşullarda kesme kuvvetinin arttığı, 3 paso uygulanan koşullarda ise bu kuvvetin görece azaldığı gözlemlenmiştir.



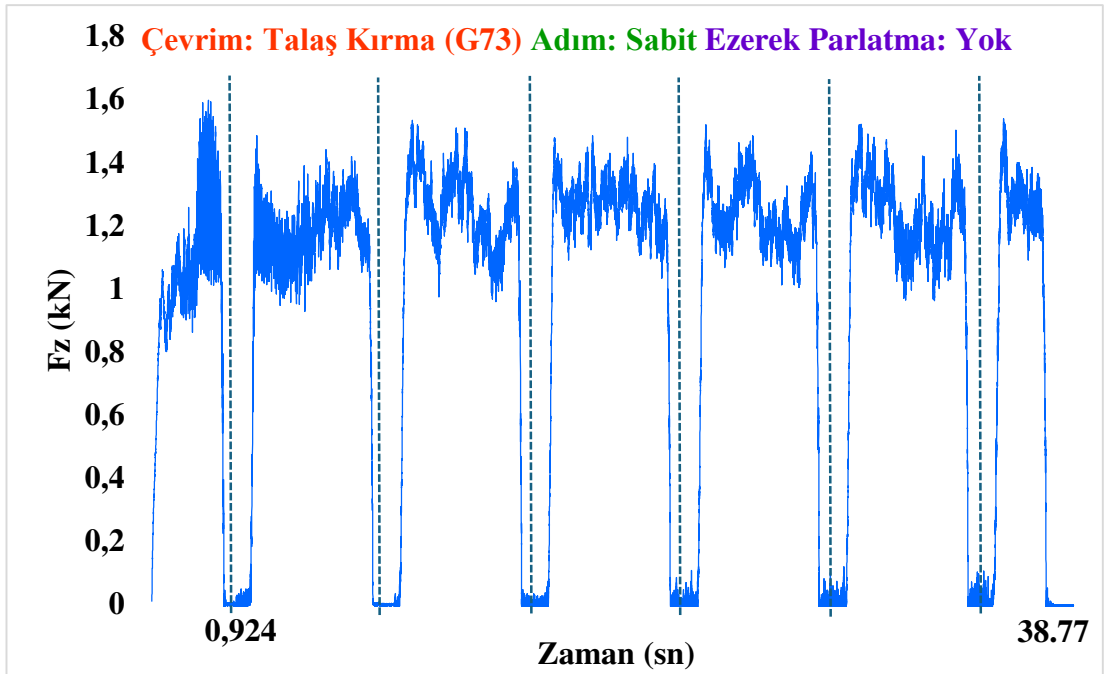
Şekil 7.3. 1. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



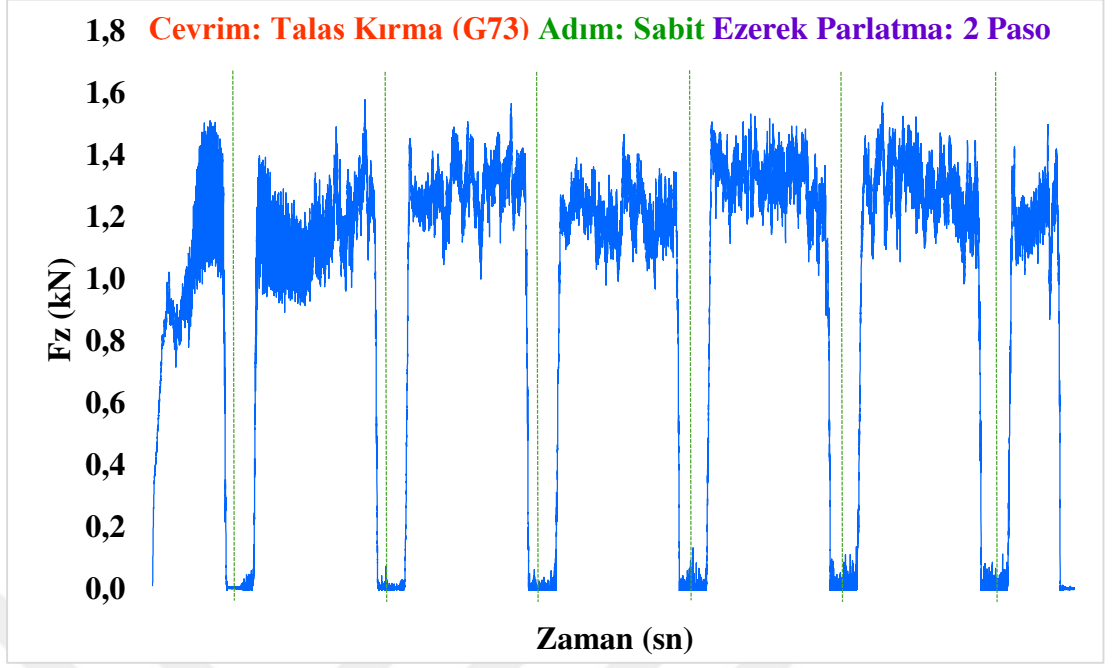
Şekil 7.4. 2. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



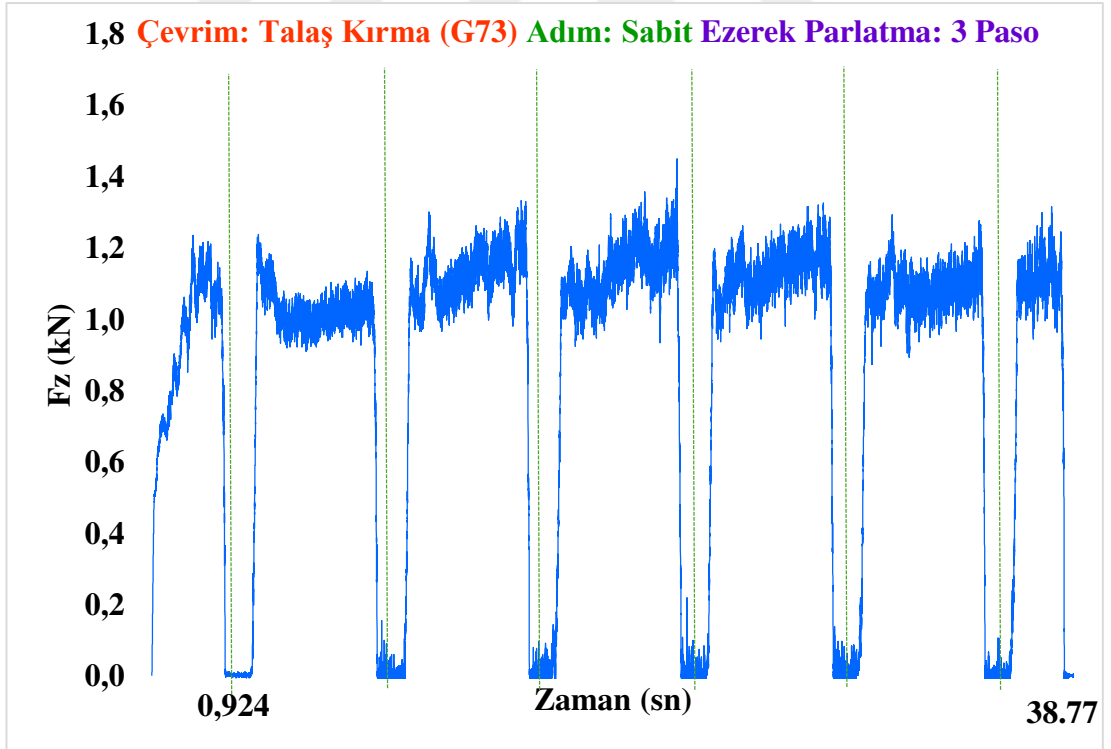
Şekil 7.5. 3. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



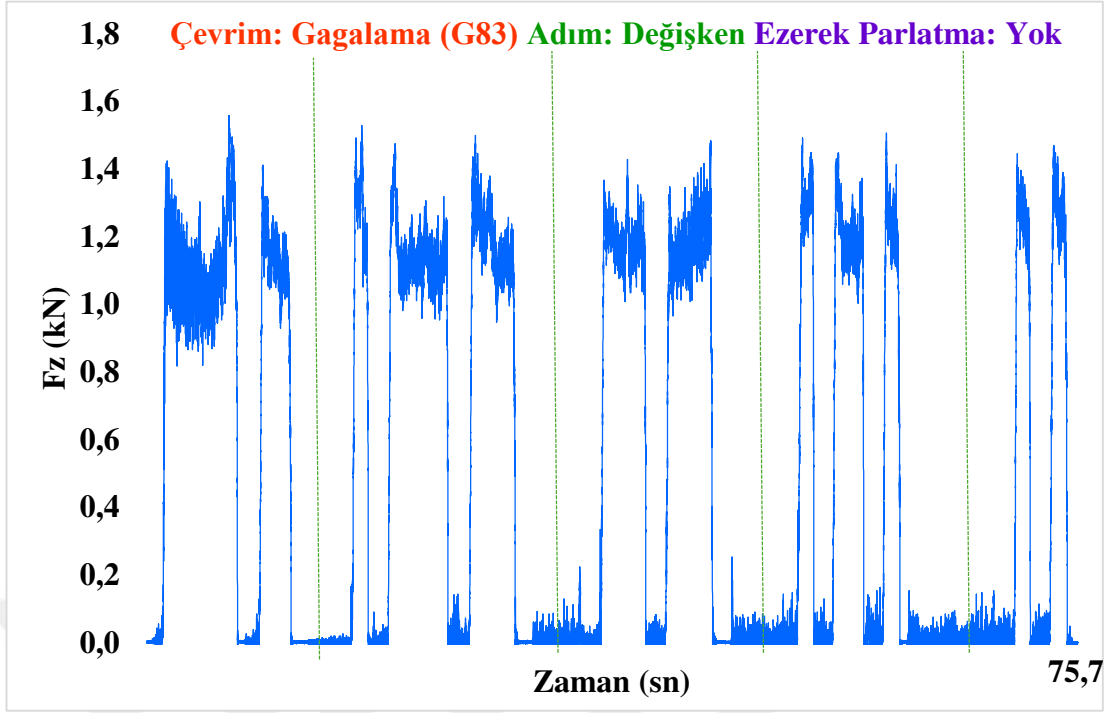
Şekil 7.6. 4. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



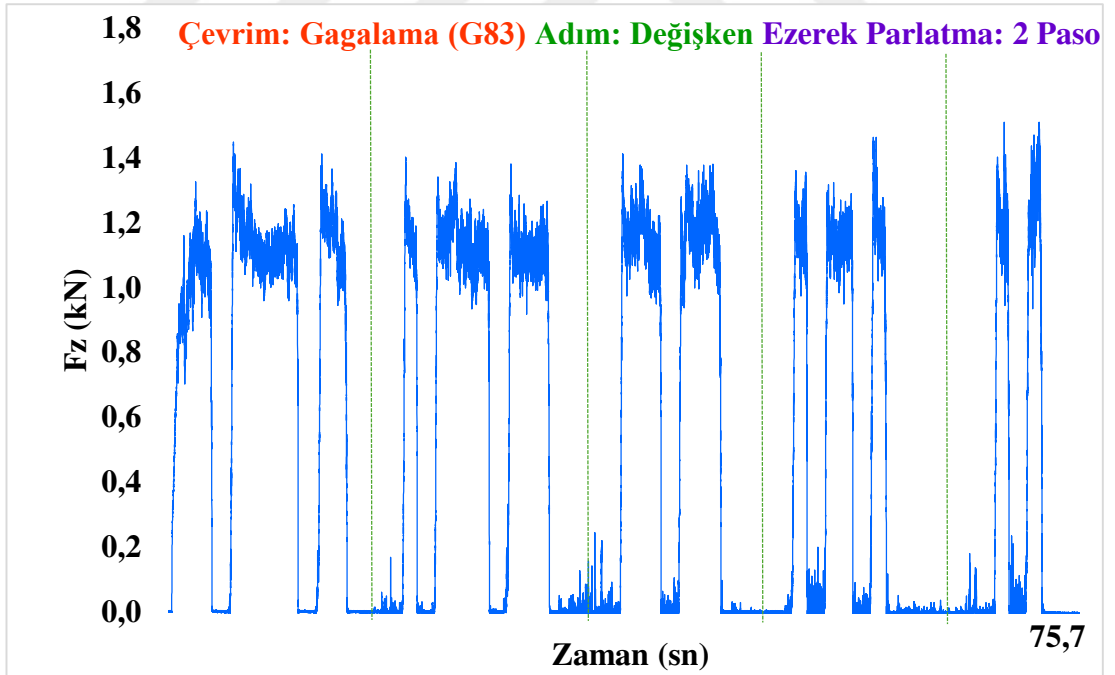
Şekil 7.7. 5. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



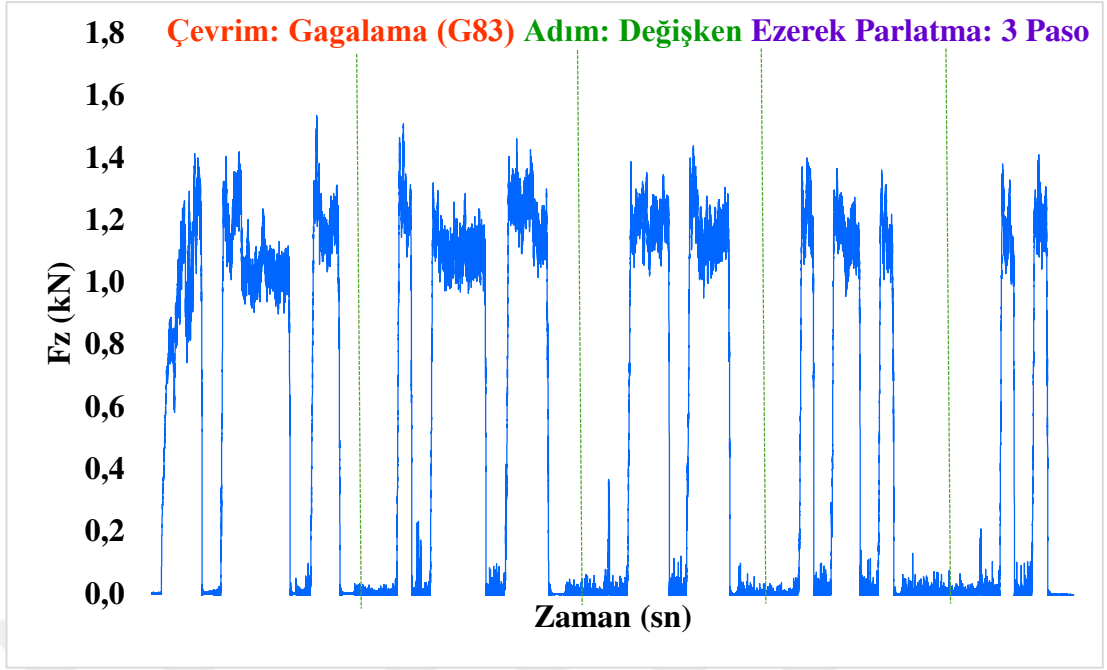
Şekil 7.8. 6. Koşula ait Fz-Zaman grafiği



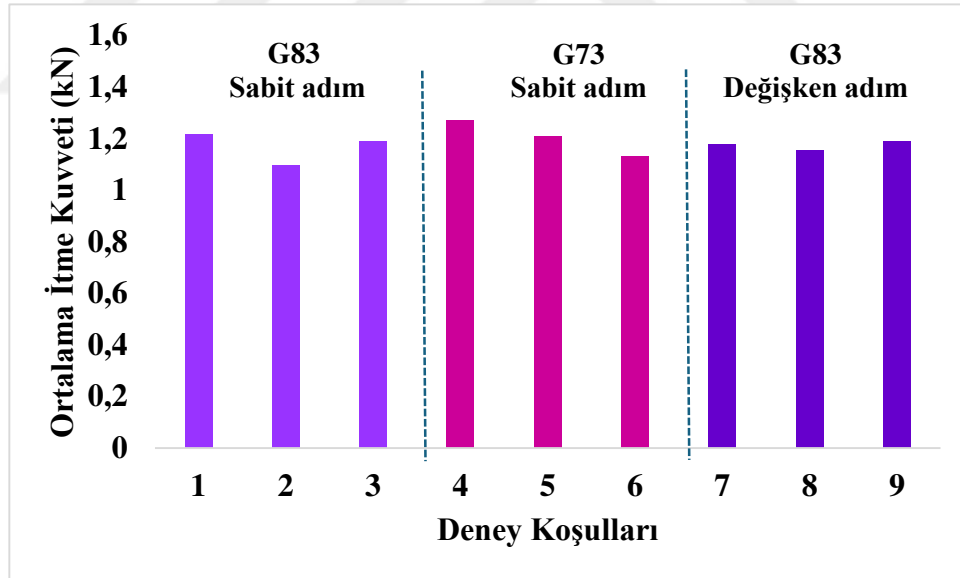
Şekil 7.9. 7. Koşula ait F_z -Zaman grafiği



Şekil 7.10. 8. Koşula ait F_z -Zaman grafiği



Şekil 7.11. 9. Koşula ait Fz-Zaman grafiği

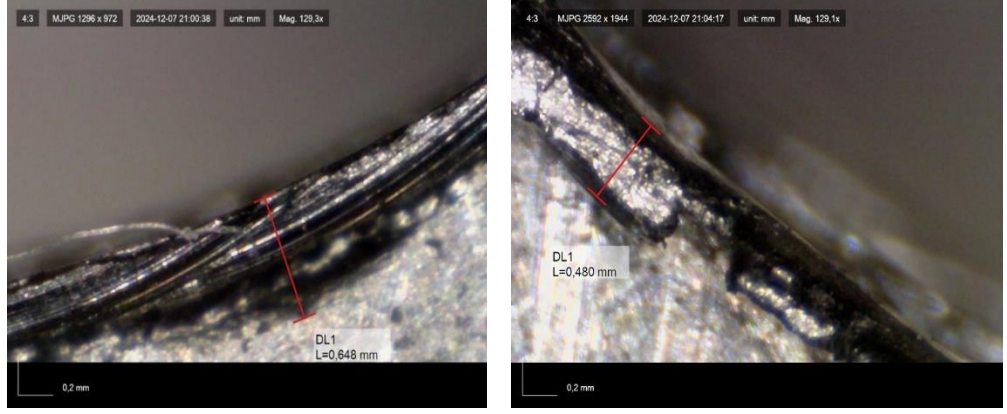


Şekil 7.12. 9. Ortalama İtme Kuvveti-Zaman grafiği

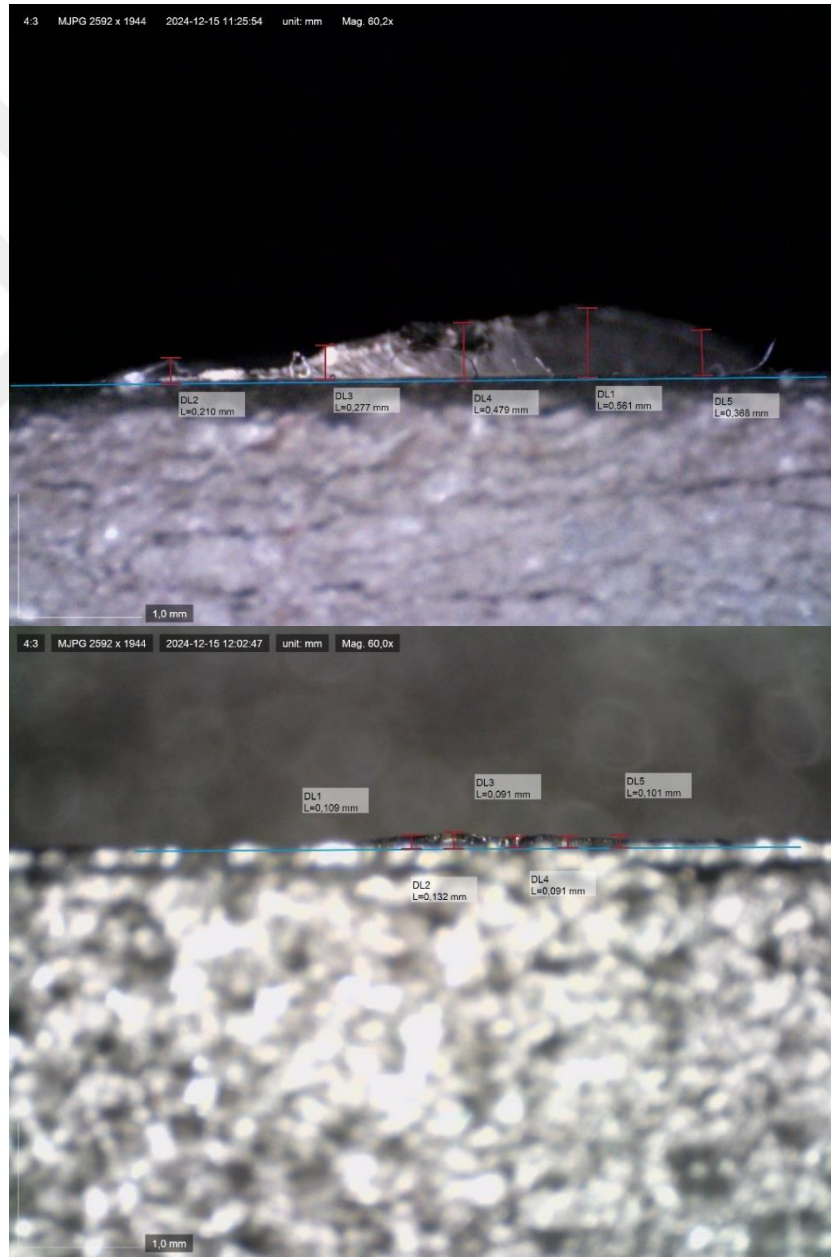
7.4. apak Analizi

Bu çalışmada, delik delme esnasında oluşan çapaklar, apak genişlikleri (**Bwi**) ve apak kök genişlikleri (**Brwi**) ve apak Yüksekliği (**Bhi**) Dino Capture Yazılımı ile ölçülmüştür. lmler şekil 7.13 ve şekil 7.14'te örnek olarak gösterilmiştir. şekil 7.15'te ise tüm ölçüm sonuçları tek bir grafik şeklinde sunulmuştur.

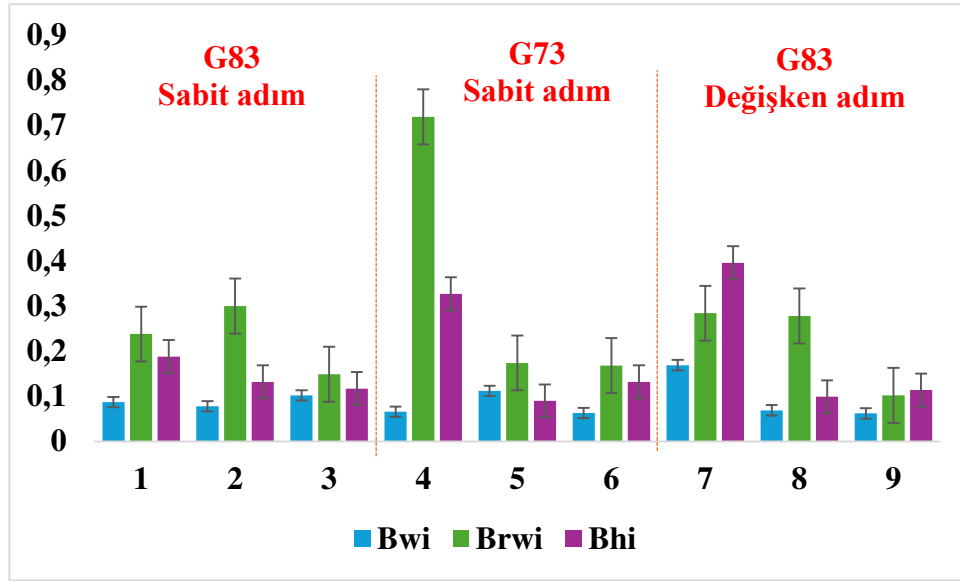
Elde edilen sonuçlara göre, ezerek parlatma işlemi uygulanmamış numunelerde apak genişliği nispeten yüksek olup, en büyük değer **Koşul 5'te** (0,112 mm) gözlemlenmiştir. apak yüksekliği açısından ise en büyük değer ezerek parlatma yapılmamış **Koşul 1'de** (0,188 mm) llmştr. Öte yandan, 2 paso ezerek parlatma uygulanan numunelerde apak genişliği genellikle azalırken, apak kök genişliği artış göstermiştir. Bu durum, yüzey sertleşmesine bağlı olarak malzemenin plastik deformasyon kabiliyetinin değişmesiyle açıklanabilir. Özellikle **Koşul 8'de**, en düşük apak genişliği (0,069 mm) ve en yüksek apak kök genişliği (0,278 mm) llerek, bu yöntemin apak oluşumu üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konmuştur. 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde ise apak genişliği ve kök genişliği en düşük seviyeye gerilemiş, özellikle **Koşul 9'da** en düşük apak genişliği (0,062 mm) ve apak kök genişliği (0,102 mm) elde edilmiştir. apak yüksekliği açısından ise ezerek parlatma işlemi genel olarak düşürücü bir etki göstermiş, özellikle 3 paso uygulanan numunelerde apak yüksekliği önemli ölçüde azalmıştır. Bu bulgular, ezerek parlatma işleminin yüzey sertliğini artırarak apak oluşum mekanizmasını etkilediğini ve apak boyutlarını düşürdüğünü göstermektedir. Özellikle 3 paso uygulandığında apak genişliği ve kök genişliği en düşük seviyelere inerken, 2 paso uygulanan numunelerde kök genişliğinde artış gözlemlenmesi, deformasyon sertleşmesi ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, ezerek parlatma işlemi, delme işlemi sırasında oluşan apak miktarını ve karakteriştiğini belirgin şekilde değiştirmekte olup, özellikle talaş kaldırma sürecinde yüzey sertleşmesinin apak oluşumuna etkisini anlamak açısından önemli veriler sunmaktadır.



Şekil 7.13. Çapak kök genişlikleri (BRwi)



Şekil 7.14. Çapak yükseklikleri (Bhi)

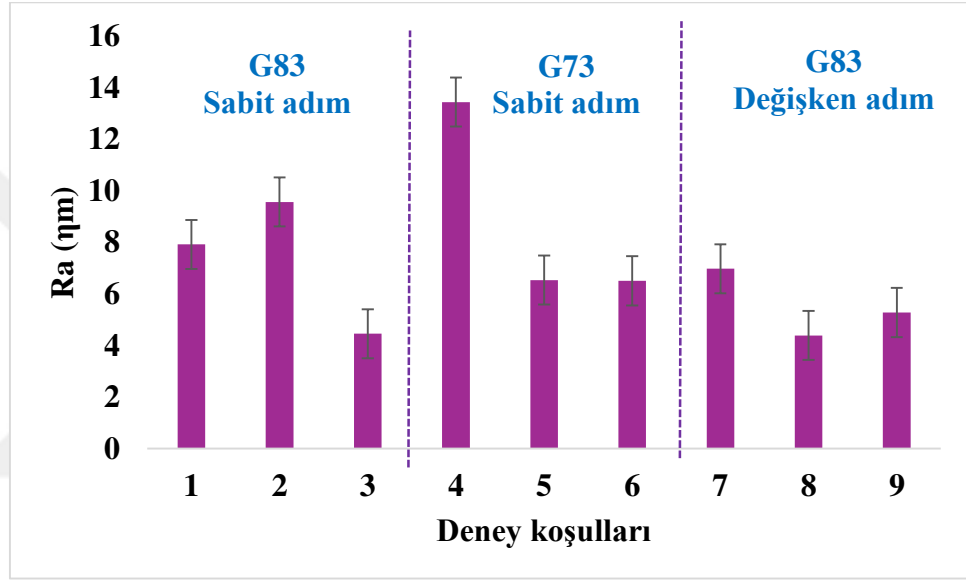


Şekil 7.15. Deney koşullarının çapak oluşumuna etkisi

7.5. Yüzey Pürüzlülük Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen deneylerde, farklı delme ve ezerek parlatma koşulları altında işlenen deliklerin iç yüzeylerinden ölçülen Ra yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 7.16’da grafik olarak sunulmuştur. Genel olarak, yüzey pürüzlülüğünün ezerek parlatma işlemi ile azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ezerek parlatma uygulanmamış numunelerde Ra değerleri genellikle daha yüksek olup, özellikle Koşul 4’te ($13,44 \mu\text{m}$) en yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. 2 paso ezerek parlatma uygulanan numunelerde ise Ra değerlerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiş, özellikle Koşul 8’de ($4,39 \mu\text{m}$) en düşük pürüzlülük elde edilmiştir. Bu durum, ezerek parlatma işleminin yüzey sertliğini artırarak plastik deformasyonu azaltması ve yüzeyin daha düzgün bir hale gelmesini sağlamasıyla açıklanabilir. 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde ise yüzey pürüzlülüğünde daha stabil bir iyileşme gözlemlenmiştir. Koşul 9’da pürüzlülük değeri ($5,28 \mu\text{m}$) ölçülerek, 3 paso işleminin 2 paso işlemine kıyasla yüzey pürüzlülüğünde nispeten daha az değişime yol açtığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, artan sertliğe bağlı olarak kesme sırasında malzemenin kırılkan davranış göstermesi olabilir. Genel olarak, 2 paso

ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerin delik iç yüzeylerinde en düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. 3 paso uygulandığında ise yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir iyileşme gözlemlenmesine rağmen, 2 paso uygulanan numuneler kadar düşük değerlere ulaşılmamıştır. Bu sonuçlar, ezerek parlatma işleminin delik iç yüzey kalitesini artırarak, talaş kaldırma işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğünü optimize edebileceğini göstermektedir.



Şekil 7.16. Delik iç yüzeylerinden ölçülen Ra (μm) Yüzey pürüzlülük değerleri

7.6. Sonuç ve Öneriler

Yapılan araştırmada elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. 2 paso ezerek parlatma işlemi, yüzey sertliğini yaklaşık %75 artırırken, 3 paso ezerek parlatma işlemi bu oranı %101'e kadar çıkarmıştır.
2. 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde, deformasyon sertleşmesinin etkili olduğu bölgenin derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir.
3. Sabit adımla talaş kırmalı delik delme işlemi, en yüksek kesme kuvvetlerinin elde edilmesine neden olmuştur.
4. 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde, sabit adımla gagalayarak delik delme yönteminde en düşük Fz değerleri elde edilmiştir.
5. 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulanan numunelerde ise kesme kuvvetlerinin 2 paso uygulamaya göre azaldığı tespit edilmiştir.
6. Ezerek parlatma işlemi, çapak genişliği ve kök genişliğini azaltmıştır. 3 paso ezerek parlatma işlemi, çapak genişliği ve kök genişliğini en düşük seviyeye indirmiştir. Çapak yüksekliği de özellikle 3 paso ezerek parlatma uygulandığı koşullarda önemli ölçüde azalmıştır.
7. 2 paso ezerek parlatma işlemi uygulandığı şartlarda delik iç yüzeylerinde, en düşük Ra (yüzey pürüzlülük) değerleri elde edilmiştir. 3 paso ezerek parlatma işlemi uygulandığı şartlarda yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir iyileşme sağlamış olsa da 2 paso işlem kadar düşük değerlere ulaşamamıştır.

Öneriler:

1. Ezerek parlatma parametreleri üzerinde çalışılarak optimize edilebilir.
2. Delik delme koşulları arttırılarak optimum delik delme şartları belirlenebilir.
3. Daha kaliteli matkaplarla derin delik delme deneyleri gerçekleştirilebilir. Böylece seçilen delik delme yöntemleri derin delikler için daha sağlıklı değerlendirilebilir.

4. Ezerek parlatma işlemleri ile elde edilebilecek maksimum sertlik değeri araştırılarak çapak boyutları kontrol edilebilir. Sertlik arttıkça çapak boyutları azalma gösterdiği için minimum çapak boyutlarının elde edildiği koşullar araştırılabilir.
5. Delik delme işlemleri için farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme miktarı vb.) için deneyler tekrarlanarak delik iç yüzeylerinde daha iyi yüzey kalitelerinin elde edildiği koşullar araştırılabilir.



KAYNAKÇA

- Abushaala, M. A. (2024). *Investigation Of The Effects Of Ti And Zr Elements Added To 316L Stainless Steel On Microstructure, Mechanical, Wear And Corrosion Properties.*
- Afkhami, S., Dabiri, M., Piili, H., & Björk, T. (2021). Effects Of Manufacturing Parameters And Mechanical Post-Processing On Stainless Steel 316L Processed By Laser Powder Bed Fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 802. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140660>
- Agrawal, M., Prasad, V. V. S. H., Nijhawan, G., Jalal, S. S., Rajalakshmi, B., & Dwivedi, S. P. (2024). A Comprehensive Review of Electron Microscopy in Materials Science: Technological Advances and Applications. *E3S Web of Conferences*, 505. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450501029>
- Akbulut, M. (2011). *AISI 1045 Çeliğinin Yorulma Davranışı Üzerinde Mekanik Yüzey İşleminin Etkisi.* Atatürk Üniversitesi.
- Akın, B. (2014). *AISI 316L Paslanmaz Çeliklerin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi.*
- Albar, H. B. (2023). *Ezerek Parlatma Parametrelerinin Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özelliklerine Etkisi.* Fırat Üniversitesi.
- Altıntaş, Y. (t.y.). *Üretim Otomasyonu.*
- Amuda, M. O. H., & Mridha, S. (2011). An Overview Of Sensitization Dynamics In Ferritic Stainless Steel Welds. *International Journal of Corrosion*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/305793>
- Attabi, S., Himour, A., Laouar, L., & Motallebzadeh, A. (2021). Mechanical and wear behaviors of 316L stainless steel after ball burnishing treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3255-3267. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.081>
- Aydın, K., Katmer, Ş., Gök, A., & Şeker, U. (2021). Experimental And Statistical Investigation Of The Machining Performance Of Wave Form End Mills On AISI 316L Stainless Steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 2225-2238. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.881590>
- Aydın, E., & Nalbant, M. (2020). The Effect Of Drill Point Angles On Drillability In CFRP/Al-7075 Stacking Drilling. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 917-931. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.548419>
- Batman, Ö. (2019). *2011-T6 Alüminyum Alaşımının Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.* Sakarya Üniversitesi.

- Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y., & Turgut, Y. (2017). Delik Delme Prosesi: Bir Araştırma. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 124-124. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.296833>
- Ben Meftah, M., Baili, M., Gassara, B., Dessein, G., & Bouzid Saï, W. (2019). Pre-Hole Diameter Optimization İn High Speed Drilling Considering Machining Cost. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), 3323-3336. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03689-z>
- Berns, H., Gavriljuk, V., & Riedner, S. (2013). *High Interstitial Stainless Austenitic Steels*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33701-7>
- Bilgiç, H. H., Güvenç, M. A., Cakır, M., & Mistıkoğlu, S. (2019). A Study On Prediction Of Surface Roughness And Cutting Tool Temperature After Turning For S235jr Steel. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7, 966-974. <https://doi.org/10.36306/konjes.624725>
- Brnic, J., Turkalj, G., Canadija, M., Lanc, D., Krscanski, S., Brcic, M., Li, Q., & Niu, J. (2016). Mechanical Properties, Short Time Creep, And Fatigue Of An Austenitic Steel. *Materials*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/ma9040298>
- Bykador, V. S., & Bykador, Z. E. (2017). Bifurcations of Deep Hole Drilling Process. *Procedia Engineering*, 206, 151-156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.452>
- Constantin Berbecaru, A., Coman, G., Stefan Gradinaru, C., Gabriela Sohaciu, M., Predescu, C., Elena Dumitrescu, R., Ciuca, S., & Arina Gherghescu, I. (2019). Microstructural Characterization of Some Turbine Blade Martensitic Stainless Steels. *Revista de Chimie*, 1132-1139. <http://www.revistadechimie.ro>
- Czan, A., Zauskova, L., Sajgalik, M., & Drbul, M. (2016). Triaxial Measurement Method for Analysis of Residual Stress after High Feed Milling by X-Ray Diffraction. *Technological Engineering*, 13(2), 31-33. <https://doi.org/10.2478/teen-2016-0019>
- Çelik, E., Şirin, Ş., & Kivak, T. (2021). AISI 2507 Süper Dupleks Paslanmaz Çeliğinin Hibrit Soğutma/Yağlama Yöntemleri Altında Tornalanmasında Yüzey Kalitesinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 929-942. <https://doi.org/10.29130/dubited.819984>
- Çelik, M. (2023). Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 333-342. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1229068>
- Çiftçi, İ., & Gökçe, H. (2018). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.450289>
- Çobanoğlu, T. (2021). *Havacılık Sektöründe Kompozit Metal Malzeme Kombinasyonlarında Delik Delme Prosesinin İyileştirilmesi*. Gazi Üniversitesi.

- de Souza Silva, E. M. F., da Fonseca, G. S., & Ferreira, E. A. (2021). Microstructural And Selective Dissolution Analysis Of 316L Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4317-4329. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.009>
- Demirbaş, A. (2023). *Monel 400 Alaşımının Kriyojenik Koşullar Altında İşlenebilirliğinin Araştırılması*. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi.
- Duboust, N., Ghadbeigi, H., Pinna, C., Ayvar-Soberanis, S., Collis, A., Scaife, R., & Kerrigan, K. (2017). An Optical Method For Measuring Surface Roughness Of Machined Carbon Fibre-Reinforced Plastic Composites. *Journal of Composite Materials*, 51(3), 289-302. <https://doi.org/10.1177/0021998316644849>
- Efstathiou, C., Vakondios, D., Lyronis, A., Sofiakakis, K., & Antoniadis, A. (2016, Kasım 11). *Finite Element Modeling and Experimental Study of Burr Formation in Drilling Processes*. <https://doi.org/10.1115/imece2016-66026>
- Ekmen, F. H. (2021). *Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımlarında Delik Delme İşlemlerinin Araştırılması*. Batman Üniversitesi.
- Ertuğrul, O., Güzelipek, O., Soyusinmez, T., Tuğberk AKDOĞAN, A., Burak GÜNEŞ, A., Katip Çelebi Üniversitesi, İ., ve Mimarlık Fakültesi, M., Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, M., Makina ve Yedek Parça Sanayi ve Ticaret AŞ, T., Üniversitesi, G., Fakültesi, T., Tasarım Mühendisliği Bölümü, E., Üniversitesi, Ç., Fakültesi, M., & Mühendisliği Bölümü, O. (2020). Dökme Demir Malzemelerin Karbür Uçlarla Delme İşleminde Proses Parametrelerinin Optimizasyonu. *İçinde Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture* (C. 35, Sayı 1).
- Ganem, S., Mahmood, M., & J. Khalifa, H. (2023). Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel After Exposure to Elevated Temperature. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 37-51. <https://doi.org/10.24237/djes.2023.16304>
- Gök, K. (2006). *KGDD Malzemelerde Östemperleme İşleminin Kesme Parametrelerine ve Takım Ömrüne Etkisinin Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Gökçe, H., & Çiftçi, İ. (2023). Molibden ve Alaşımlarının Frezelenmesinde Takım Aşınmasının İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1215548>
- Gunawan, G., & Arifin, A. (2021). Intergranular Corrosion And Ductile-Brittle Transition Behaviour In Martensitic Stainless Steel. *Indonesian Journal of Engineering and Science*, 2(3), 031-041. <https://doi.org/10.51630/ijes.v2i3.23>
- Güllü, A., Özdemir, A., & Demir, H. (2003). Yüzey Pürüzlülüğü Ölçme Yöntemleri ve Mukayesesi. *Teknoloji*, 79-92.
- Han, C., Luo, M., Zhang, D., & Wu, B. (2018). Iterative Learning Method For Drilling Depth Optimization İn Peck Deep-Hole Drilling. *Journal of Manufacturing*

Science and Engineering, Transactions of the ASME, 140(12).
<https://doi.org/10.1115/1.4041420>

- Harshith, N., Devendra, Y., & Jagadesh, T. (2019). Investigations Into Surface Integrity And Cylindricity Error During Peck Drilling Of Aerospace Alloy Using Graphite, MOS 2 And Blasocut Lubricant. İçinde *Materials Today: Proceedings* (C. 18).
www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings
- Hassan, A. M., & Sharef Al-Bsharat, A. (1996). Influence Of Burnishing Process On Surface Roughness, Hardness, and Microstructure Of Some Non-ferrous Metals. *Wear*.
- Hayajneh, M. T. (2001). Hole Quality In Deep Hole Drilling. *Materials And Manufacturing Processes*, 16(2), 147-164. www.dekker.com
- Huang, J. C., & Wu, W. P. (2012). The Study On Evaluation Of Hybrid Drilling Command Under Deep Hole Drilling. *Advanced Materials Research*, 579, 219-226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.579.219>
- Imran, M., Mativenga, P. T., Kannan, S., & Novovic, D. (2008). An Experimental Investigation Of Deep-Hole Microdrilling Capability For A Nickel-Based Superalloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(12), 1589-1596. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1217>
- Jangid, Y. K., Goyal, A., & Dadhich, M. (2022). Investigation Of Cutting Time And Tool Wear Rate On En-24 Steel Alloy By The Drilling Process. *Engineering Review*, 42(2), 1-12. <https://doi.org/10.30765/er.1611>
- Jin, S. Y., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., & Debnath, S. (2020). Burr Formation And Its Treatments—A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5-6), 2189-2210. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05203-2>
- Kanovic, Z., Vukelic, D., Simunovic, K., Prica, M., Saric, T., Tadic, B., & Simunovic, G. (2022). The Modelling of Surface Roughness after the Ball Burnishing Process with a High-Stiffness Tool by Using Regression Analysis, Artificial Neural Networks, and Support Vector Regression. *Metals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/met12020320>
- Kaplan, Y., Nalbant, M., & Gökkaya, H. (2011). AISI D2 ve AISI D3 Soğuk İş Çeliklerinin Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 37-46.
- Kara, Y. (2015). *TiAlN Ve TiN Kaplamalı Matkaplarla C38 Dövme Çelik Malzemesinin Derin Delik Delme İşleminin İncelenmesi*. Karabük Üniversitesi.
- Ke, F., Ni, J., & Stephenson, D. A. (2006). Chip Thickening İn Deep-Hole Drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1500-1507. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.022>

- Kim, D. W., Lee, Y. S., Park, M. S., & Chu, C. N. (2009). Tool Life Improvement By Peck Drilling And Thrust Force Monitoring During Deep-Micro-Hole Drilling Of Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4), 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.11.005>
- Korg, H. (2007). *Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Robot Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* [Tez]. Sakarya Üniversitesi.
- Kulakowska, A., & Bohdal, Ł. (2024). Surface Characterization of Carbon Steel after Rolling Burnishing Treatment. *Metals*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/met14010031>
- Labuda, W., Wieczorska, A., & Charchalis, A. (2024). The Influence of the Burnishing Process on the Change in Surface Hardness, Selected Surface Roughness Parameters and the Material Ratio of the Welded Joint of Aluminum Tubes. *Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/ma17010043>
- Lin, S. C., & Ting, C. J. (1994). Tool Wear Monitoring In Drilling Using Force Signals. *Wear*, 180, 53-60.
- Liu, X., Meng, L., Zeng, X., Zhu, B., Cao, J., Wei, K., & Hu, Q. (2024). Study On Cavitation Erosion And Slurry Erosion Resistance Of Martensitic Precipitation Hardening Stainless Steel Coatings Fabricated By High Power Laser Cladding. *Wear*, 558-559. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205562>
- Liu, Z. F., & Xu, M. (2013). Research On Technology Test Of 304 Stainless Steel Super Long Deep-Hole Drilling. *Advanced Materials Research*, 774-776, 1137-1140. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1137>
- Liu, Z., & Li, R. (2011). Experimental Research On Superlong Deep-Hole Drilling Processing Technology For Steel Of 4145H Drill Collar. *Advanced Materials Research*, 201-203, 2597-2600. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.201-203.2597>
- Loto, R. T., Aiguwurhuo, O., & Evana, U. (2016). Corrosion Resistance Study of Heat Treated 420 Martensitic Stainless Steel and 316 Austenitic Stainless Steel in Dilute Acid Concentrations. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, 39(7). <https://doi.org/10.21311/001.39.7.04>
- Luecke, W. E., & Slotwinski, J. A. (2014). Mechanical Properties Of Austenitic Stainless Steel Made By Additive Manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 398-418. <https://doi.org/10.6028/jres.119.015>
- Ma, F. Y. (2012). *Corrosive Effects of Chlorides on Metals* (ss. 139-178). www.intechopen.com
- Ma, L. J., Yu, H., Mao, X. H., Li, C. R., Feng, C. Y., & Li, F. N. (2023). Influence Of Cutting Tool And Drilling Process On The Machinability Of Inconel 718. *Manufacturing Technology*, 23(2), 204-215. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.013>

- Manninen, T., & Säynäjäkangas J. (2012). Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steels at Elevated Temperature. *Tornio Research Centre*, 1-15.
- Mavi, A. (2020). Evaluation Of Cutting Parameters By Determination Of The Grey Correlation Analysis Methods Of The Effects On The Cutting Force And Surface Roughness Of Duplex Stainless Steels (2205). *Tehnicki Vjesnik*, 27(1), 270-275. <https://doi.org/10.17559/TV-20181220075328>
- Mohamed, G. A. (2018). *Dynamic Strain Ageing Behaviour Of 316L Austenitic Stainless Steel*.
- Mon, D., Piesko, P., Zawada-Michalowska, M., & Jozwik, J. (2022). Geometric Accuracy Of Deep Holes Drilled With Various Strategies And Technological Parameters. *2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2022 - Proceedings*, 328-332. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9855968>
- Mukhtar, M., Effendee, M., Ibrahim, M. H., & Syahrir, M. (2021). Analysis of Solid Carbide Drilling Performance on AISI 316L Austenite Stainless Steel using MQL (Minimum Quantity Lubrication) using Peck Drilling Approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1874(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012065>
- Müftüoğlu, H. S. (2014). *DC01 Çeliğinin Artışlı Şekillendirilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi*. Celal Bayar Üniversitesi.
- Neseli, S. (2014). Optimization Of Process Parameters With Minimum Thrust Force And Torque İn Drilling Operation Using Taguchi Method. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/925382>
- Olaseinde, O. A., Merwe, J. Van der, & Cornish, L. (2014). Characterization and Corrosion Behaviour of Selected Duplex Stainless Steels in Acidic and Acidic-Chloride Solution. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 04(01), 89-93. <https://doi.org/10.4236/aces.2014.41012>
- Olugbade, T. O. (2022). Corrosion Resistance, Evaluation Methods, and Surface Treatments of Stainless Steels. *İçinde Stainless Steels* (ss. 1-4). [https://doi.org/OlumideOlugbade,T.\(2022\).KorozyonDirenci,DeğerlendirmeYöntemlerivePaslanmazÇeliklerinYüzeyİşlemleri.IntechOpen.doi:10.5772/intechopen.101430](https://doi.org/OlumideOlugbade,T.(2022).KorozyonDirenci,DeğerlendirmeYöntemlerivePaslanmazÇeliklerinYüzeyİşlemleri.IntechOpen.doi:10.5772/intechopen.101430)
- Omirou, S. L., & Fyrrillas, M. M. (2015). A General G-Code Algorithm for Deep Hole Drilling. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 15(2), 225-237. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2014-0028>
- Özcan, D. (2023). *Kesici Takım Geometrisinin Kesme Performansı Ve Delik Kalitesine Etkisi*. Sakarya Üniversitesi.
- Özek, C., & Bal, M. (2020). Investigation Of Bushing Dimensions And Micro Hardness Changes İn Thermal Friction Drilling Process. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 511-525. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.556943>

- Patel, Prof. J., Intwala, A., Patel, D., Gandhi, D., Patel, N., & Patel, M. (2014). A Review Article on Effect of Cutting Parameter on Drilling Operation for Perpendicularity. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(6), 11-18. <https://doi.org/10.9790/1684-11661118>
- Patra, K., Jha, A. K., Szalay, T., Ranjan, J., & Monostori, L. (2017). Artificial Neural Network Based Tool Condition Monitoring In Micro Mechanical Peck Drilling Using Thrust Force Signals. *Precision Engineering*, 48, 279-291. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.12.011>
- Perçin, M. (2015). *Mikro Delik Delme İşleminde Ti6Al4V Alaşımı İçin Kesme Şartlarının Etkisinin Araştırılması*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pilný, L., De Chiffre, L., Píška, M., & Villumsen, M. F. (2011). Hole Quality And Burr Reduction In Drilling Aluminium Sheets. *New Technologies In Manufacturing*.
- Sabzi, H. E., Lim, S. H., Crociata, D. Della, Castellote-Alvarez, R., Simonelli, M., San-Martín, D., Hao, X., Choi, P. P., & Rivera-Díaz-del-Castillo, P. E. J. (2024). Genetic Design Of Precipitation-Hardening Stainless Steels For Additive Manufacturing. *Acta Materialia*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120018>
- Safa Bodur, M., Üniversitesi, Y., Bilimi, M., & Bölümü, N. M. (2022). AISI 304 Paslanmaz Çelik Talaşlı Şekil Verme İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Güç Tüketimini Azaltmaya Yönelik İstatiksel Yaklaşım. *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci*, 11(2), 379-386. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1054913>
- Shareef, I., Kumar, D., Potluri, R., & Horton, G. (2024). Effect Of Materials And Process Parameters On Machinability Of Stainless Steels. *Manufacturing Letters*, 41, 696-707. www.sciencedirect.com
- Shete, H. V., & Sohani, M. S. (2020). Effect of Process Parameters on Surface Roughness in HPC Drilling of AISI 1055 Steel. *Journal of Mechanical Engineering*, 17(1), 33-48.
- Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2020). HSLA Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği Üzerindeki Etkilerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(2), 320-334. <https://doi.org/10.29109/gujsc.683818>
- Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G., Fecheira, J. S., Lopes, H. M., Martinho, R. P., Casais, R. B., & Ferreira, L. P. (2020). Cutting Forces Assessment In Cnc Machining Processes: A Critical Review. *Sensors (Switzerland)*, 20(16), 1-26. <https://doi.org/10.3390/s20164536>
- Steigerwald, R. F., Bond, A. P., Dundas, H. J., & Lizlovs, E. A. (1977). The New Fe-Cr-Mo Ferritic Stainless Steels. *Corrosion Nace*, 279-294.
- Syusyuka, E. N. (2021). Possibility Of Applying X-Ray Methods To Control The Surface Quality Of A Shaft Line After Finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2061(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012022>

- Tamura, S., & Matsumura, T. (2024). Cutting Process İn Non-Step Drilling Of Deep Hole With Tool Wear Progress. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 18(4). <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2024jamdsm0045>
- Teke, E. (2024). *Alüminyum 5083-H111 Malzemenin Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Optimizasyonu*. Sakarya Üniversitesi.
- Tian, J., Zhou, G., Wang, W., Hu, Q., Jiang, Z., & Yang, K. (2023). Understanding The Effect Of Cobalt On The Precipitation Hardening Behavior Of The Maraging Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 6719-6728. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.106>
- Türkyilmazoğlu, A. (2006). *Dubleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı* [Tez]. Sakarya Üniversitesi.
- Ulaş, H. B. (2018). AISI D2 VE AISI D3 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.412662>
- Uzun, G., Yaşar, S. A., & Korkut, İ. (2017). Ti-6Al-4V Alaşımının Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerine ve Delik Kalitesine Etkisinin İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Müh. Derg*, 7(2), 469-475. <http://fbd.beun.edu.tr>
- Üstün, T. (2019). *Delik Delmede Farklı Delme Uygulamalarının Takım Performansı ve İşleme Ekonomisi Açısından Karşılaştırılması*. Gazi Üniversitesi.
- Yaman, K., Bıçakçı, N., & Özgedik, A. (2017). Matkap Boyunun Delik Toleranslarına Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 765-775. <https://doi.org/10.2339/politeknik.368982>
- Yang, J., Chen, J., Liu, Y., Sun, B., & Zhu, R. (2025). The Effect Of Laser Shock Peening On The Fatigue Performance Of 25Cr2Ni4MoV Alloy. *Engineering Failure Analysis*, 169, 109150. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109150>
- Yılmaz, B., & Güllü, A. (2020). The Investigation of the Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness and Chip Formation in Turning of AISI 1050 Steel. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(4), 628-633. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.06702>
- Zai, L., Zhang, C., Wang, Y., Guo, W., Wellmann, D., Tong, X., & Tian, Y. (2020). Laser Powder Bed Fusion Of Precipitation-Hardened Martensitic Stainless Steels: A Review. *Metals*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/met10020255>
- Zhao, C. Y., Cheung, C. F., & Fu, W. P. (2021). An investigation of the cutting strategy for the machining of polar microstructures used in ultra-precision machining optical precision measurement. *Micromachines*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/mi12070755>