
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

INCONEL 939 SÜPER ALAŞIMIN SÜRÜNME İLERLEMELİ TAŞLAMA PROSESİNDE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

Ozan Can OZANER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2021

Ozan Can OZANER tarafından hazırlanan "INCONEL 939 SÜPER ALAŞIMIN SÜRÜNME İLERLEMELİ TAŞLAMA PROSESİNDE PARAMETRE OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……....

Başkan: Prof. Dr. İhsan KORKUT

İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……....

Üye: Doç. Dr. Şener KARABULUT

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……....

Tez Savunma Tarihi: 06 / 01 / 2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ozan Can OZANER

06/01/2021

INCONEL 939 SÜPER ALAŞIMIN SÜRÜNME İLERLEMELİ TAŞLAMA PROSESİNDE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Ozan Can OZANER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Havacılık sektöründe kullanılan gaz türbini parçaları çalışma esnasında oldukça ciddi yüklemelere maruz kalmaktadır. Özellikle, sıcak bölgede konumlanan türbin kanatçıkları hem dinamik yüklemelere hem de yüksek sıcaklığın meydana getirdiği termal gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu nedenle türbin kanatçıklarının rotordan kolaylıkla ayrılabilir, değiştirilebilir ve tekrar montaj edilebilir bir şekilde imal edilmesi gerekmektedir. Ancak, bahsedilen yüksek yüklemelere karşı dayanım gösterebilmesi için, çok dar toleranslar ile yüzey bütünlüğünün korunarak işlenmesi gerekmektedir. Bunun için havacılık sanayinde freze, tel erozyon tezgahı ve sürünme ilerlemeli taşlama sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sürünme ilerlemeli taşlama sistemi kullanılarak, türbin palesinin rotora bağlantısını sağlayacak olan kök geometrisinin işlenmesi sağlanmıştır. Çalışmalar, yüzey bütünlüğünü etkileyecek olan yüzey pürüzlülüğü, yeniden katılaşan bölgenin kalınlığı, sıcaktan etkilenen bölgenin kalınlığı ve profil toleranslarını göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu çalışmada, sürünme ilerlemeli taşlama sistemi, sürekli bileme ve aralıklı bileme durumları için farklı parametrelerin Taguchi metodu yardımı ile yüzey bütünlüğüne etkileri incelenmiştir. Sürünme ilerlemeli taşlama sistemi için mevcut olan iki proses tipide paso miktarı, tabla ilerlemesi miktarı, taş lineer hızı, bileyici taş dönme oranları gibi parametreler ile incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda parametrelerin yüzey bütünlüğüne etkileri, sonucunda meydana gelen yeniden katılaşan bölge, yüzey pürüzlülüğü gibi sonuçlarında birbirlerini etkiledikleri görülmüştür. Sonuç olarak, sürünme ilerlemeli taşlama sistemleri ile türbin palesi kökünün üretimi için geometri bazlı olarak optimum parametreler elde edilmiştir

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Sürünme ilerlemeli taşlama, hassas işleme, taşlama, türbin, yüzey bütünlüğü
Sayfa Adedi	:	82
Danışman	:	Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

PARAMETER OPTIMIZATION OF CREEP FEED GRINDING FOR INCONEL 939 SUPER ALLOY

(M.Sc. Thesis)

Ozan Can OZANER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

Gas turbine components used in the aviation industry are subjected to serious loads. The turbine blades located in the hot section are suffered from dynamic loads and thermal stresses caused by high temperature and centrifugal motion. Therefore, turbine blades must be produced in a way that can be easily separated, replaced, and reassembled from the rotor disc. However, in order to withstand high loads, production should be done with narrow tolerances without damaging the surface integrity. Therefore, milling, wire electrical discharge machining, creep feed grinding are used in the aviation industry. In this study, the root geometry that connects the turbine blade to the turbine rotor disc is processed. The studies are carried out by considering the surface roughness, profile tolerances, the thickness of recast layer and heat affected zone, which affect the surface integrity. In this study, creep feed grinding is investigated by Taguchi method using different parameter sets for continuous and non-continuous states. The two different types of creep feed grinding are examined with parameters such as depth of cut, table feed rate, wheel linear speed, and the dressing ratio rates. As a result of these investigations, it is observed that the parameters have an effect on the surface integrity and that they affect each other in the results such as recast layer and surface roughness. Finally, optimum parameters based on the geometry depends are obtained for the production of turbine blade fir tree with creep feed grinding

Science Code	:	91438
Key Words	:	Creep feed grinding, precision machining, grinding, turbine, surface integrity
Page Number	:	82
Supervisor	:	Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında; tecrübelerini ve tavsiyelerini esirgemeyen değerli tez danışmanım Prof. Dr. Mahmut İZCİLER'e, yüksek lisans eğitimime devam etmeme olanak sağlayan, imalat ve test imkanlarından faydalandıran TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. (TEI)'ye, tez çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Teknoloji Programları Müdürlüğü'ndeki tüm iş arkadaşları ve yöneticilerine teşekkürü bir borç bilir, hayatımın her noktasında desteğini esirgemeyen ve beni bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ x
SİMGELER VE KISALTMALAR xiv
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR TARAMASI 5
2.1. Türbin Palesi ve Bağlantı Elemanları 5
2.2. Kök Geometrisi Üretim Metotları 7
2.2.1. Tel erozyon tezgahı 8
2.2.2. Frezeleme 12
2.2.3. Sürünme ilerlemeli taşlama 14
2.3. Türbin Palesi Ölçüm Metotları 19
2.4. Havacılıkta Katmanlı İmalat 23
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 27
3.1. Numune Tasarımı 27
3.2. Taguchi Deney Tasarımı 30
3.3. Numune Üretimi 32
3.4. Parça İşlemeleri ve Tezgah Konfigürasyonu 34
3.5. Taş Seçimi 36
3.6. Kalite Ölçümleri 36
3.6.1. Görsel muayene 37
3.6.2. CMM ölçümleri 37
3.6.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 39
3.6.4. Yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarının ölçümü 40

Sayfa

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 43
4.1. Görsel Muayene Sonuçları 43
4.2. Profilden Sapma ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri 48
4.3. Yeniden Katılaşan Bölge ve Isıdan Etkilenen Bölge Ölçümleri 59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 77
ÖZGEÇMİŞ 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. L18 Taguchi tipine göre dizayn edilmiş 1.deneme grubu 30

Çizelge 3.2. L9 Taguchi tipine göre dizayn edilmiş 2.deneme grubu 30

Çizelge 3.3. Inconel 939 malzemesinin yüzdece kimyasal kompozisyonu 32

Çizelge 3.4. Denemelerde kullanılan taş özellikleri 36

Çizelge 4.1. Deney seti 1 profilden sapma ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları...…….50

Çizelge 4.2. Deney seti 2 profilden sapma ve yüzey pürüzlülük sonuçları...…….....57

Çizelge 4.3. Kalling's No.2 solüsyonunun kimyasal içeriği ...……...…….63

Çizelge 4.4. Deney seti 1 için yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçüm sonuçları...……64

Çizelge 4.5. Deney seti 2 yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları sonuçları...….....71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Türbin giriş sıcaklığı ve malzemelerin gelişimi 2

Şekil 2.1. Katmanlı imalat üretim metodu 23

Şekil 4.1. Deney seti 1 profilden sapma miktarları.....48

Şekil 4.2. Deney seti 1 giriş ve çıkış bölgesi yüzey pürüzlülüğü 54

Şekil 4.3. Deney seti 2 profilden sapma 57

Şekil 4.4. Deney seti 2 giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüğü.....58

Şekil 4.5. Deney seti 1 giriş yeniden katılaşan bölge kalınlığı ölçümleri.....65

Şekil 4.6. Deney seti 1 giriş HAZ kalınlığı ölçümleri 65

Şekil 4.7. Deney seti 1 çıkış yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığı ölçümlerine paso miktarının etkisi.....70

Şekil 4.8. Deney seti 1 ilk 4 numune giriş ve çıkış bölgeleri yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları 71

Şekil 4.9. Deney seti 2 bileme oranlarının yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarına etkileri 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. Gaz türbin bölgeleri 1

Resim 1.2. Türbin palesi bölgeleri 3

Resim 2.1. Türbin bölgesi blisk parçası 5

Resim 2.2. Türbin palesi kök bağlantı tipleri 6

Resim 2.3. Pale kök geometrisi için örnek köknar ağacı geometrisi 6

Resim 2.4. Yorulma kaynaklı disk üzerindeki kök geometrisindeki çatlaklar 7

Resim 2.5. a) Tel erozyon ile açılmış örnek kök slotları b) Tel erozyon metodu ile açılmakta olan disk slotu 8

Resim 2.6. Farklı parametreler ile işlenmiş parçada meydana gelen yüzey kusurları 9

Resim 2.7. Erozyon sistemlerinde sıcaklığın etkisinin şematik görüntüsü 10

Resim 2.8. EDM sonrası faz değişimleri 10

Resim 2.9. Kök geometrisi frezeleme için üretilen freze takımları 12

Resim 2.10. Örnek Fir-Tree freze takımı ve operasyonu 13

Resim 2.11. Sürekli bilemeli sürünme ilerlemeli taşlama prosesi 14

Resim 2.12. Parça özelinde hazırlanmış masa bileyiciler grubu 15

Resim 2.13. PA-K aserbest yüzey bileyici takımı 15

Resim 2.14. Türbin kökünün sürünme ilerlemeli taşlama prosesi ile işlenmesi 16

Resim 2.15. Taşlama sistemlerinde parça ve taş arasındaki açı 18

Resim 2.16. Taş ve Fir-Tree profilini ilk teması 18

Resim 2.17. Tomografi cihazı çalışma mantığı 20

Resim 2.18. Tomografi tezgahı ile taranmış bir pale 21

Resim 2.19. Elle lazer tarama sistemi MMDX 21

Resim 2.20. Lazer ile kanatçık taraması 22

Resim **Sayfa**

Resim 2.21. Lazer ile ölçüm sisteminin çalışma sistemi 22

Resim 2.22. Katmanlı imalat havacılık uygulamaları.....24

Resim 2.23. Katmanlı imalat ile üretilmiş türbin paleleri.....25

Resim 3.1. Deneyler için tasarlanan numuneler 27

Resim 3.2. Denemelerde kullanılan fikstür.....28

Resim 3.3. Numunelerin ölçüleri 29

Resim 3.4. Üretilen numune ve hedef parça 29

Resim 3.5. Numunelerin ölçüm bölgeleri 31

Resim 3.6. Numunelerin alttaş üzerindeki görüntüsü 33

Resim 3.7. Üretimi tamamlanmış numuneler 33

Resim 3.8. Parça işlemesi için tezgah görseli 34

Resim 3.9. İndikatör yardımı ile açısal dönüklüğün giderilmesi 35

Resim 3.10. İşlenmiş numuneler.....35

Resim 3.11. Parça işleme anı 36

Resim 3.12. Numuneler için CMM ölçümü.....37

Resim 3.13. CMM ölçümü.....38

Resim 3.14. Lazer tarama sonucu alınan kesit bölgeleri 38

Resim 3.15. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri - 1 39

Resim 3.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri - 2 40

Resim 3.17. Numunelerin recast ve HAZ ölçümleri için tel erozyon ile parçalara bölünmesi için ölçüler.....41

Resim 3.18. Numunelerin takibi için numaralandırma.....41

Resim 3.19. Numunelerin tel erozyon ile kesilmesi 42

Resim 4.1. Deney seti 1 - 9 numaralı parametre yanık izi 43

Resim **Sayfa**

Resim 4.2. Nozzle ve taş konumu.....44

Resim 4.3. Parametre seti 12 numune görseli.....45

Resim 4.4. Parametre seti 13 numune görseli.....45

Resim 4.5. Parametre seti 14 numune görseli.....46

Resim 4.6. Parametre seti 15 numune görseli.....46

Resim 4.7. Parametre seti 16 numune görseli.....47

Resim 4.8. Parametre seti 18 numune görseli.....47

Resim 4.9. CMM ölçümlerinin normalleştirilmesi.....49

Resim 4.10. Konvansiyonel taşlama benzetmesi.....50

Resim 4.11. Bakalite alınacak numuneler.....60

Resim 4.12. Numuneler için SEM görüntüsü.....60

Resim 4.13. Yeniden katılaşan bölge için SEM görüntüsü.....61

Resim 4.14. Yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölge için SEM görüntüsü.....62

Resim 4.15. Yeniden katılaşan bölge için detaylı SEM görüntüsü.....63

Resim 4.16. Dağlama sonrası örnek yeniden katılaşan bölge ve HAZ görüntüsü.....63

Resim 4.17. Örnek devamlı yeniden katılaşan bölge ve HAZ.....67

Resim 4.18. Örnek yarıçap bölgesindeki yeniden katılaşan bölge ve HAZ oluşumları.....67

SİMGELER VE KISALTMALAR

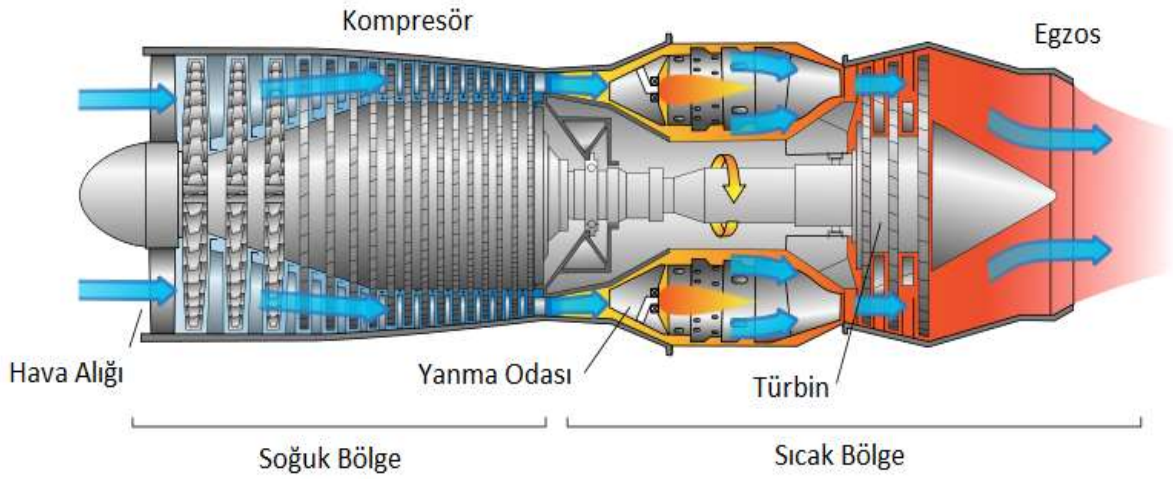
Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
a_p	Temas Uzunluğu (mm)
β	Sıcaklık aktarım katsayısı
°C	Celsius
dk	Dakika
d_e	Paso derinliği (µs)
E_E	Boşalım enerjisi (J)
F_t	Teğetsel kuvvet (N)
I	Akım
K	Kelvin
L	Termal sayısı
l_c	Temas alanı
M	Metrik
mm	Milimetre
Ra	Aritmetik yüzey pürüzlülüğü birimi
R_{plazma}	Boşalım yarı çapı(µm)
t_{on}	Boşalım süresi (µs)
t_{off}	Boşalımlar arası bekleme süresi (µs)
V	Voltaj
v_s	Taş dönme hızı(m/s)
q_{ch}	Talaş ile uzaklaştırılan ısı (J)
q_f	Soğutucu sıvı ile uzaklaştırılan ısı (J)
q_s	İş parçasında kalan ısı (J)
q_t	Sistemdeki total ısı (J)
q_w	Taş ile uzaklaştırılan ısı (J)
θ_m	Maksimum sıcaklık (K)

Kısaltmalar	Açıklamalar
CAD	Modellemede kullanılan programlar bütünü
CBN	Kübik boron nitrür
CFG	Sürünme ilerlemeli taşlama
HAZ	Isıdan etkilenen bölge
NC	Sayısal kontrol
STL	CAD Dosyaları için uzantı
Wire EDM	Tel erozyon tezgahı

1. GİRİŞ

Günümüzde 1900'lü yıllarda geliştirilen ve kullanılmaya başlanan gaz türbinli motorlar havacılık sektöründe çok önemli bir yer edinmektedir. İçten yanmalı makineler grubu altında sınıflandırılan gaz türbinli motorlar kendi altında, çalışma prensiplerine göre gruplandırılmaktadır. Çalışma prensipleri değişse de Resim 1.1'de gösterildiği gibi, gaz türbinli motorlar hava alığı, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz gibi bölümlere sahiptir. Gaz türbinli motorların bölgeleri komponent isimlerine göre sınıflandırılabildiği gibi çalışma sıcaklıklarına da göre ayrılabilir. Resim 1.1'de gösterildiği gibi gaz türbinli motorlar soğuk ve sıcak bölge olarak 2 farklı bölgeden oluşmaktadır. Yanma odasındaki sıcaklık motor torkuna bağlı olarak 1800 K değerlerini görebilmektedir, bu nedenle yanma odası, türbin ve egzoz bölgesi sıcak bölge olarak adlandırılmaktadır [1].

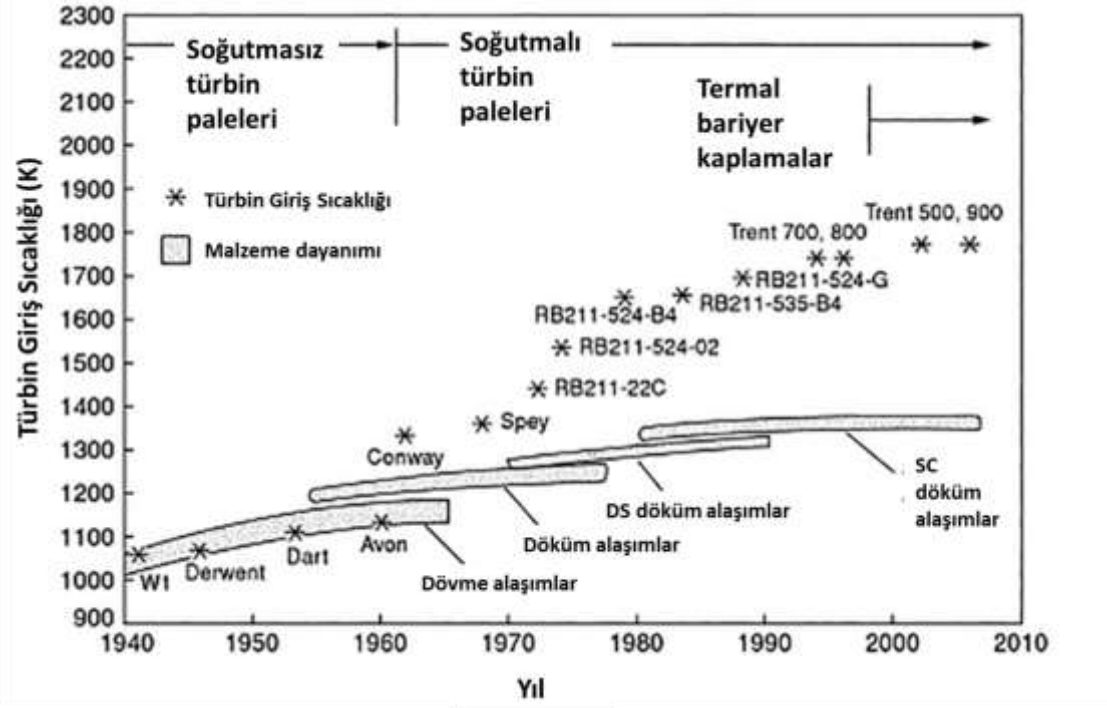


Resim 1.1. Gaz türbin bölgeleri [1]

Gaz türbinli motorlarda, özellikle sıcak bölge parçaları çalışma esnasında çok yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu nedenle parçalar üzerinde oldukça ciddi termal stres meydana gelmektedir. Ayrıca türbin bölgesine, termal yükleme ile dinamik yükleme de etki etmektedir. Gaz türbinli motorların çalışma prensibine bağlı olarak verimin ve itki gücünün artması için türbin giriş sıcaklığının artırılması gereklidir. Bu nedenle geliştirilen her gaz türbinli motorda, türbin bölgesine iletilen sıcaklıkta artmaktadır.

Sonuç olarak türbin bölgesinin tasarımı oldukça önemli bir hale gelmektedir. Bahsedilen verim ve itki arttırma ihtiyacı ile Şekil 1.1'de gösterildiği gibi türbin bölgesindeki

hedeflenen sıcaklık değerlerini arttırmıştır, bu nedenle her hedeflenen sıcaklık için özel malzemeler geliştirilmiştir. Günümüz teknolojisinde östenitik özellik sergiledikleri için nikel esaslı süper alaşımlar kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Türbin giriş sıcaklığı ve malzemelerin gelişimi [2]

Ancak gün geçtikçe isterler arttığı için, malzeme dayanımları yetmese de termal bariyerlerin, türbin paleleri üzerindeki ekstra soğutma kanallarının vb. kullanımı ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılmıştır [3].

Yüksek sıcaklıklara çıkılması ile, türbin bölgesinde oluşan termal stres daha da artmıştır. Genellikle, türbin paleleri Resim 1.2'de 3 numaralı geometri ile gösterildiği gibi pale kökü ile birlikte imal edilir. Bu sayede türbin diskine montajı gerçekleşmektedir. Ancak bahsedilen yüksek termal yüklemeler ve dönme etkisi ile meydana gelen dinamik yüklemelerden dolayı kök bölgesinin imalatı oldukça zorlayıcıdır. Dünya üzerinde sayılı firmanın üretimini yapmış olduğu bu kök bölgesi için sayılı imalat metodu mevcuttur. Bilinen konvansiyonel metotların dışında, alışagelmemiş metotların veya mekanik ancak zorlayıcı proseslerin kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir.



Resim 1.2. Türbin palesi bölgeleri [4]

Bu tez çalışması kapsamında katmanlı imalat metodu ile üretilen Inconel 939 numuneler üzerinde sürünme ilerlemeli taşlama tezgahı kullanılarak, türbin palesi kökü üretimi için parametre optimizasyonu yapılmıştır. Tez içeriği; türbin palesi kök üretimi hakkında literatür araştırması, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçlarından oluşmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

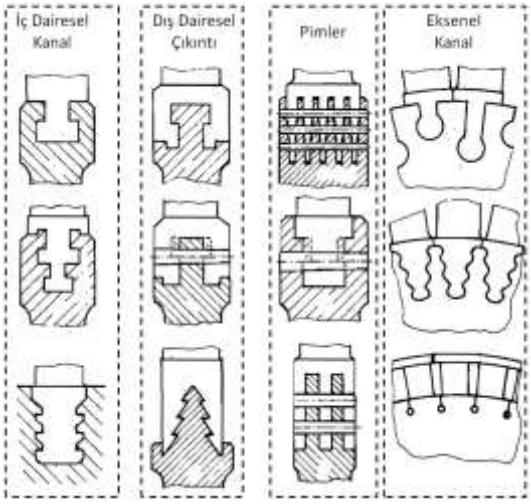
2.1. Türbin Palesi ve Bağlantı Elemanları

Türbin geometrisi havacılık motorlarında, kullanım prensibine, itki ihtiyacına vb. göre ya türbin diski ile yekpare bir şekilde ya da türbin diskine montaj edilebilmesi için, montaj edilebilir bir geometri ile imal edilir. Resim 1.2'de tek ve bağlantı bölgesi ile üretimi yapılmış bir türbin palesi, Resim 2.1'de ise yekpare üretimi tamamlanmış bir blisk parçasının görüntüsü gösterilmektedir.



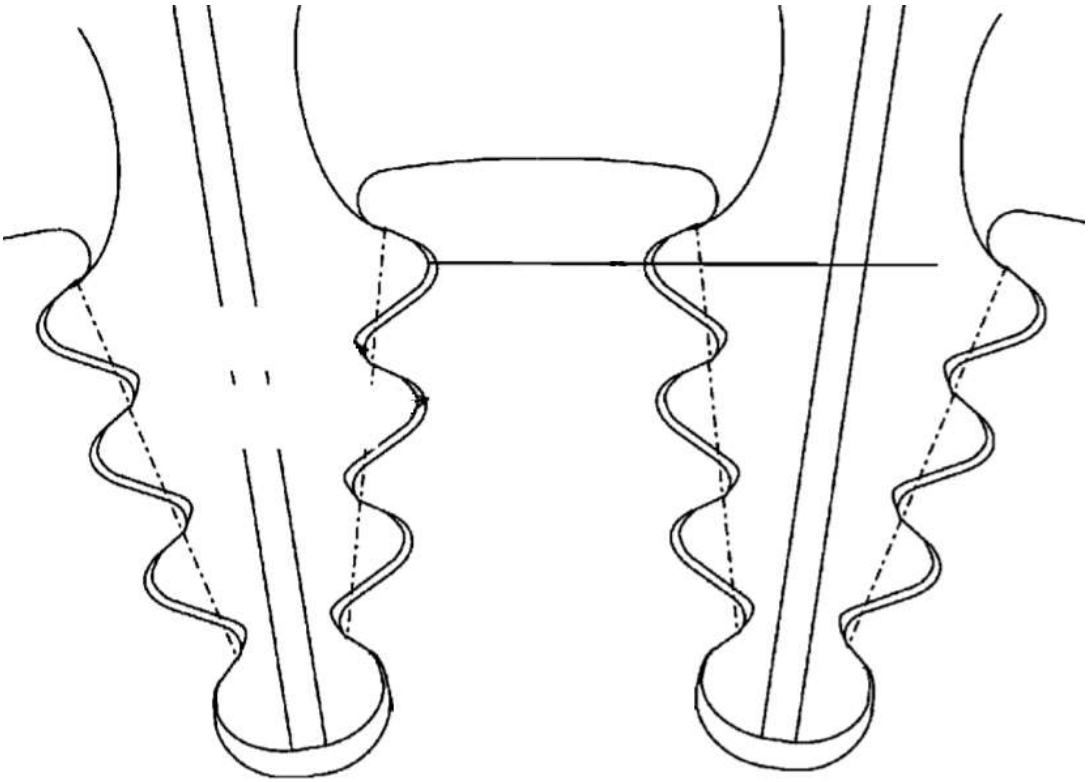
Resim 2.1. Türbin bölgesi blisk parçası [4]

Türbin bölgesi genellikle Resim 1.2.'de gösterildiği gibi tekil palelerden oluşmaktadır. Bu nedenle bahsedilen çevrimsel yüklemelere ve termal strese karşı gelinebilmesi için Resim 2.2.'de gösterilen birkaç farklı pale kök geometrisi bulunmaktadır [1,5].



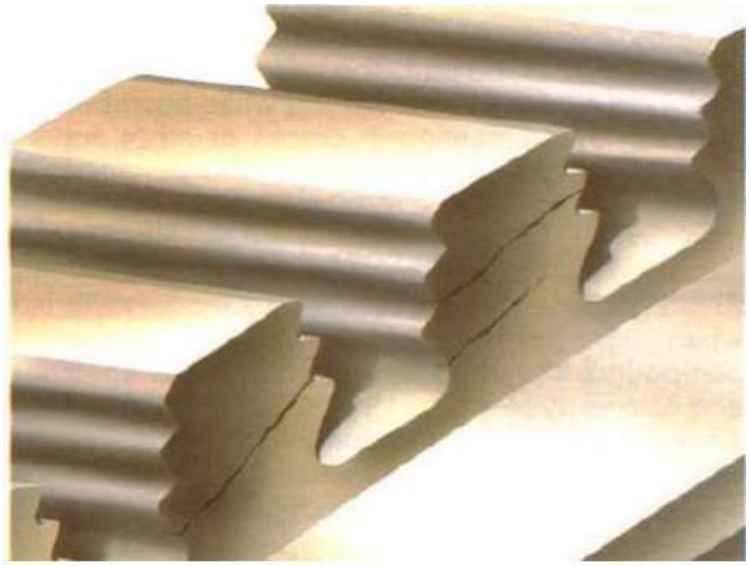
Resim 2.2. Türbin palesi kök bağlantı tipleri [5]

Resim 2.2.'den de görülebileceği üzere, pek çok farklı kök bağlantı elamanı bulunmaktadır. Ancak genellikle yüklemenin daha eşit ve dengeli bir şekilde dağıtılabilmesi için en çok eksenel kanal geometrili bağlantılar kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanı Resim 2.3.'de bir örneği gösterilen köknar ağacı geometrisidir [5].



Resim 2.3. Pale kök geometrisi için örnek köknar ağacı geometrisi [6]

Ancak bu geometrinin tasarımı kadar üretimi de oldukça zorlayıcıdır. Kök geometrisi oldukça dar toleranslar ile çok hassas işlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde Resim 2.4'de gösterildiği gibi yorulma kaynaklı çatlaklar meydana gelebilmektedir. Havacılık sanayiinde köknar ağacı geometrisinin üretim toleransları yaklaşık 40 mikron civarıdır. Bu durumda imalatı oldukça zorlaştırmaktadır [7].



Resim 2.4. Yorulma kaynaklı disk üzerindeki kök geometrisindeki çatlaklar [8]

Türbin palelerinin üretildiği malzemeler göz önünde bulundurulduğunda, işlemesi zor sınıfa girecek olan nikel esaslı malzemelerdir. Ayrıca bazı türbin palelerinde yönlendirilmiş katılaşma ya da tek kristal döküm yöntemleri tercih edilmektedir. Bu durumda bahsedilen toleranslar ile üretim yapmak oldukça zorlayıcı bir hale gelmektedir [6,7].

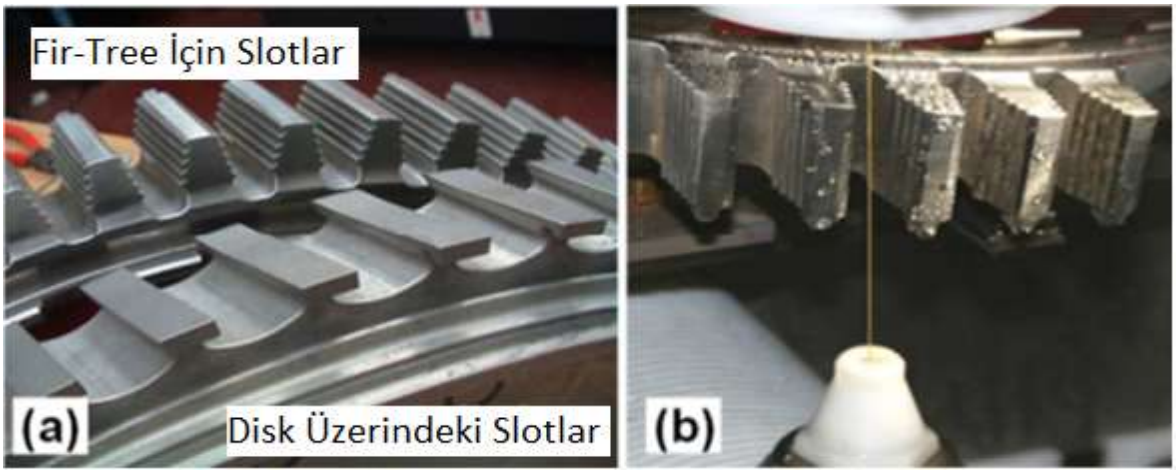
2.2. Kök Geometrisi Üretim Metotları

Literatürde, çok sayıda kaynak olmasa da kök geometrisinin üretimi için 3 farklı metot kullanılmaktadır. Bunlar tel erozyon tezgahı, frezeleme ve sürünme ilerlemeli taşlama metotlarıdır. Bahsedilen metotların birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [7]. Alt başlıklarda her metot kendi içinde incelenmiştir.

2.2.1. Tel erozyon tezgahı

Tel erozyon tezgahı havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan elektro-mekaniksel bir prosestir. Tel erozyon tezgahı çalışma mantığı olarak, elektriksel kutuplama ile ana malzemeden paso kaldırma prosesidir. Tezgah içerisinde devamlı akan bir tele genellikle artı yükleme yapılırken, hedef parçaya eksi yükleme yapılır. Bu sayede eksi ve artı kutuplar arasında elektriksel bir alan oluşturulur, parçadan ve telden kopan iyonlar dielektrik sıvının içerisinde karşılaşarak, kinetik enerjinin arttırılmasına neden olur. Artan kinetik enerji ile, çok yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Yüksek sıcaklık ile ana malzemeden hedeflenen paso, katı fazdan plazma fazına geçirilerek ayrılır. Bu sayede talaş kaldırma işlemi yapılmış olur. Bu prosesin en önemli özelliği takım ve parça birbiri ile temas etmez. Sadece takım ve parça arasında meydana gelen ark-elektriksel boşalım alanı sayesinde talaş kaldırılır.

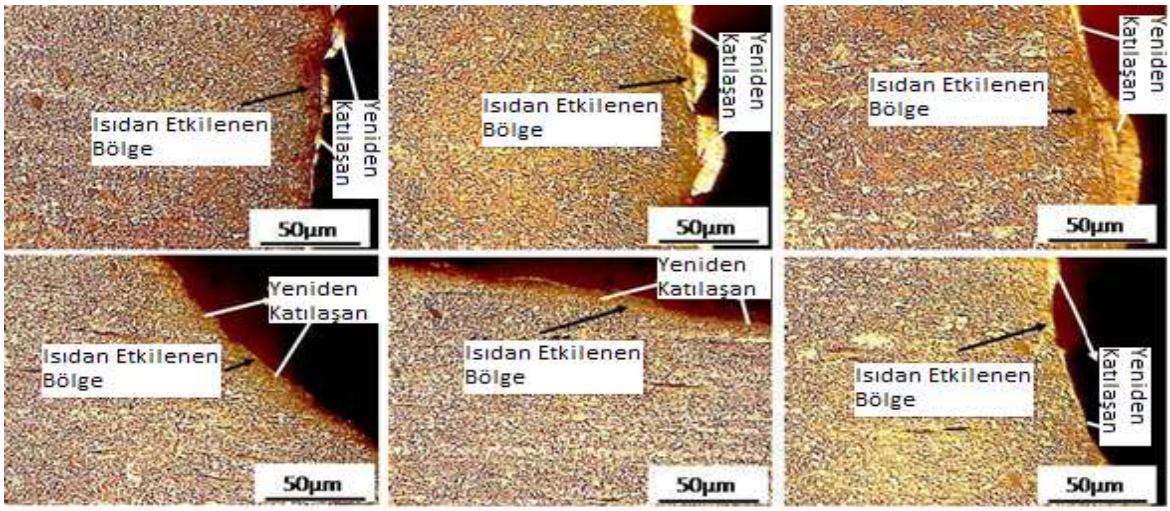
Literatürde tel erozyon tezgahı ile havacılık uygulamaları oldukça yaygındır. Ancak kök geometrisi üretimi özelinde tel erozyon tezgahı ile yapılan çalışmalar türbin diski yuvası ile kısıtlı kalmaktadır [10-12]. Yapılan çalışmalar ile Resim 2.5.'de gösterildiği gibi türbin diski üzerinde köknar ağacı slotları açılabilmektedir.



Resim 2.5. a) Tel erozyon tezgahı ile açılmış örnek kök slotları b) Tel erozyon tezgahı metodu ile açılmakta olan disk slotu [12]

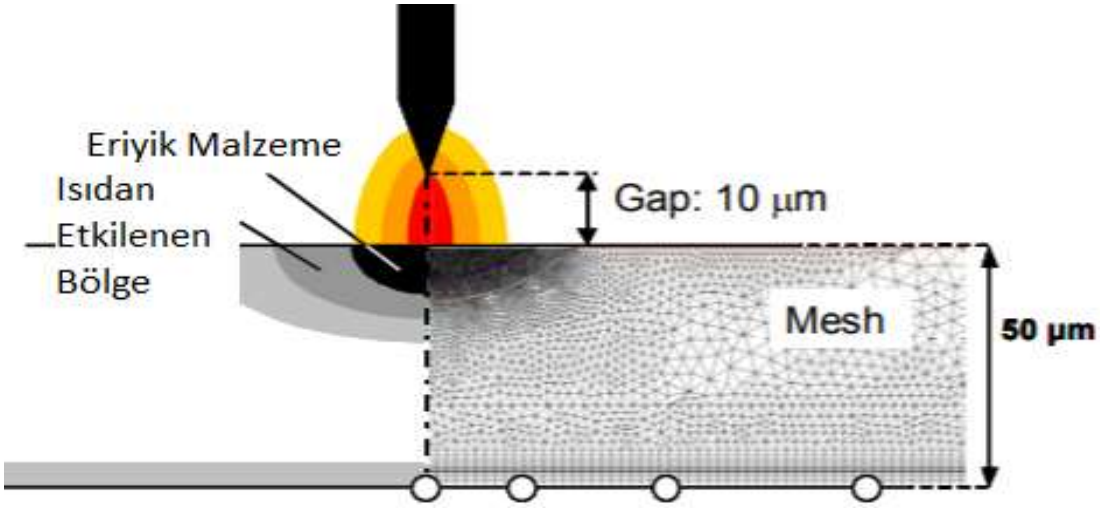
Yapılan çalışmalar sonucunda tel erozyon tezgahı metodu ile türbin diski üzerinde slot açılabildiği görülse bile, tel erozyon tezgahı metodunun doğası gereği gelen dezavantajları nedeni ile araştırılmalar yapılması gerekmiştir. Tel erozyon tezgahlarında bahsi geçen ark bölgesi (plazma bölgesi) nedeni ile yüksek sıcaklıklar meydana gelmektedir. Oluşan yüksek

sıcaklıklar her ne kadar parçadan talaşın uzaklaştırılmasına yardımcı olsa da, hedef parça üzerindeki yüzey bütünlüğünü oldukça olumsuz etkiler. Literatürde sıkça karşılaşılan ve havacılık endüstrisindeki en ciddi problemlerden birisi olan yeniden katılaşma bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge tel erozyon tezgahı prosesindeki yüksek sıcaklıklardan dolayı artmaktadır. Resim 2.6.'da gösterilen farklı parametreler ile ortaya çıkan yüzey kusurları gösterilmiştir.



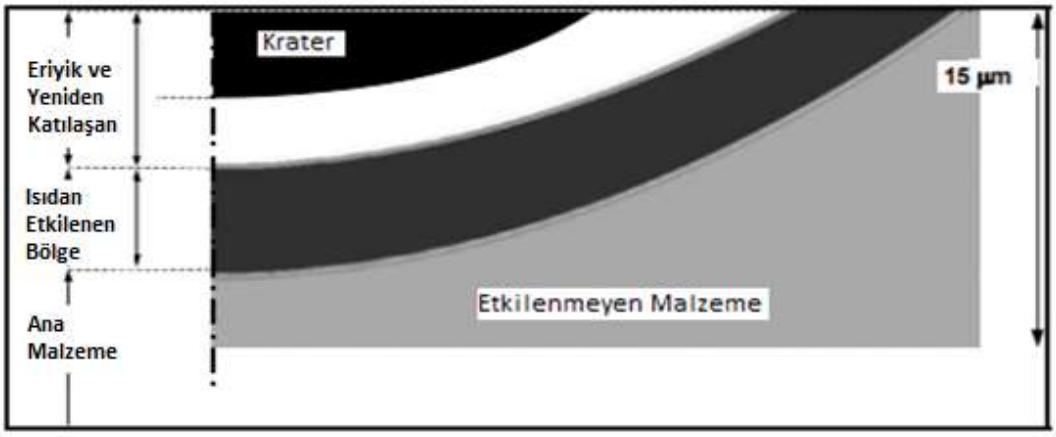
Resim 2.6. Farklı parametreler ile işlenmiş parçada meydana gelen yüzey kusurları [13]

Resim 2.8'de gösterilen yüzey kusurlarının önüne geçilmesi için, buna neden olan tel erozyon tezgahı parametrelerinin anlaşılmış olması gereklidir. Tel erozyon tezgahlarının temel parametreleri voltaj, deşarj süresi, akım, deşarjlar arası bekleme ve offset parametreleridir [14]. Yüzey kusurları için her parametre oldukça önemli olsa da en önemli parametreler deşarj süresi ve deşarjlar arası bekleme süresidir. Tel erozyon tezgahı ve dalma erozyon talaş kaldırma sırasında benzer mantıkla çalışarak oluşturduğu sıcaklık Resim 2.7.'de gösterildiği gibi parça üzerine etki etmektedir. [15-17].



Resim 2.7. Erozyon sistemlerinde sıcaklığın etkisinin şematik görüntüsü [18]

Resim 2.7.'de sıcaklığın iletimi dikkatlice incelendiğinde Resim 2.8'de gösterilen malzeme üzerindeki faz değişimlerine rastlanılmaktadır.



Resim 2.8. EDM sonrası faz değişimleri [18]

Resim 2.7'de gösterildiği gibi tel ve dalma erozyonda oluşturulan ark belirli bir boşalım enerjisi ile, Eş. 2.1.'de gösterilen belirli bir yarı çap boyunca etki eder.

$$R_{plazma} = KI^m t_{on}^n \quad (2.1)\ [19]$$

Eş. 2.1.'dende görüleceği üzere boşalım süresi sıcaklığın iletileceği yarı çapı belirler. Bu nedenle yüzey bütünlüğünü etkileyecek olan en önemli parametrelerden birisi boşalım süresidir. Malzeme boyunca iletimi yapılan bir sıcaklığın faz değişimine dolayısı ile yeniden

katılaşma ya da ısıdan etkilenen bir bölge yaratması için ise, malzemenin faz değişim grafiklerinde ifade edilen belirli sıcaklıkları geçmesi gerekmektedir. Tel erozyon tezgahı ve dalma erozyon sistemlerinin oluşturduğu sıcaklık ise boşalım enerjisi olarak literatürde yer edinmektedir. Eş. 2.2.'de gösterilen boşalım enerjisi ile malzeme yüzeyinde meydana gelecek sıcaklık hesap edilebilir. V voltaj, I akım, t_{on} boşalım süresi ve t_{off} boşalımlar arası geçen süreyi ifade etmektedir.

$$E_e = \int_0^{t_e} V_e(t) I_e(t) dt = V_e I_e t_{on} \frac{1}{t_{on}+t_{off}} \quad \text{(2.2.) [19]}$$

Eş. 2.2'den görüldüğü gibi boşalım enerjisi voltaj, akım, boşalım süresi ve boşalımlar arası geçen süre ile direkt olarak ilişkilidir. Boşalım süresini arttırılması ile, boşalım enerjisi arttığı için parça üzerinde meydana gelecek olan sıcaklıkta artacaktır. Öte yandan bekleme süresinin arttırılması ile boşalım enerjisi düşecek ve parça üzerindeki sıcaklıkta artacaktır. Literatürde tel erozyon tezgahı ve parametreleri ile yeniden katılaşma bölgesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Ortak çıkarım boşalım süresi ve bekleme sürelerinin oldukça önemli olmasıdır. Ancak ısıdan etkilenen bölge için sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bekleme süresindeki artışın yeniden katılaşma bölgesinde iyi sonuç gösterirken, ısıdan etkilenen bölge (HAZ) için olumsuz sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, ısıdan etkilenen bölgenin oluşumu için belirli bir soğuma süresinin istenmesidir. Bekleme süresinin arttırılması ile istenen soğuma süresi sağlandığı için daha kalın bir ısıdan etkilenen bölge edilir. [15-19].

Tel erozyon tezgahı prosesinin bir başka dezavantajı ise tel beslemede gecikmedir. Tel beslemede gecikme ile ilgili çalışmalar genellikle dişli geometrilerinde yapılmış olsa da [20], geometri benzerliğinden dolayı köknar ağacı geometrilerinde de meydana gelmektedir. Tel beslemede gecikmeden dolayı, istenilen profil tel ile dönülemez veya daha önce ya da daha sonraki bir çizgi yönünde kesim tamamlanarak hedef geometri üretilemez [20].

Tel erozyon tezgahı tezgahlarındaki parametreler ile alakalı olarak bir başka problem ise tel kopmasıdır. Artan voltaj değeri ile tezgahın ilerlemesi artmaktadır, ancak voltaj değerinin artması ile boşalım enerji de artmaktadır. Boşalım enerjisinin kontrolsüzce arttırılması ile,

telin kopma riski de artmaktadır. Telin kopması durumunda, yüzey pürüzlülüğü olumsuz yönde etkilenir [7].

Tel erozyon tezgahı ile köknar ağacı geometrisinin üretimi anlatılan dezavantajlar göz önünde bulundurularak yapılabilir. Prosesin avantajları ise, temel takım tel olduğu için sarf malzemesi oldukça uygundur. Proses boyunca temas olmadığından dolayı mekanik bir kuvvet oluşmadığı için, rahat fikstür tasarımları ile parça üretimi yapılabilmektedir. Tel erozyon tezgahlarının satış fiyatları göz önünde bulundurulduğunda, diğer proseslere göre avantajlıdır [7].

2.2.2. Frezeleme

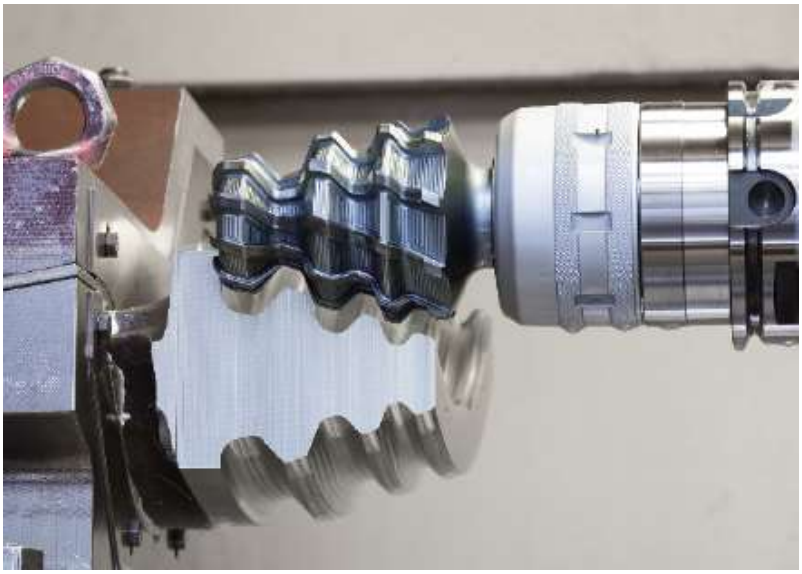
Frezeleme imalat metotları arasında en bilindik ve en sık kullanılan imalat metotlarından birisi olsa dahi, köknar ağacı frezeleme üzerine literatürde çalışmalar yok denecek kadar azdır. Yapılan çalışmalar genellikle türbin palesi üzerine değil, türbin diski üzerindeki pale için gerekli slotlar üzerinedir [8,21]. Literatürde köknar ağacı frezeleme üzerine çok sayıda yayın olmamakla beraber, takım üreticileri Resim 2.9'da gösterildiği gibi özel takımlar ile köknar ağacı frezeleme operasyonunu yapmaktadır.



Resim 2.9. Kök geometrisi frezeleme için üretilen freze takımları [22]

Üretilen takımlar ile köknar ağacı geometrisinin frezelemesi yapıldığında takım geometrisine bağlı olarak ± 30 µm üretimin yapılabildiği belirtilmiştir [23]. Yani bu geometrinin üretiminin yapılması için, prosesten daha önemli olan takım imalatının yapılmasıdır. Bilindiği üzere, takım üreticisi firmalar frezeleme operasyonu için kaba, ara

kesim ve final kesim için ayrı takımlar oluşturmaktadır. Oluşturdukları takımlar Resim 2.10'da gösterildiği gibi hedef geometrinin zıt geometrisidir.



Resim 2.10. Örnek Fir-Tree freze takımı ve operasyonu [24]

Kök geometrileri için takım tasarımı oldukça zorlayıcıdır. Ayrıca üretimi yapılan takımların kullanım sonrasında körelmesi ve bileme ihtiyacı olması bir başka problem doğurur. Dolayısı ile, freze takımının tasarlanması, hedef parçanın işlenmesi ile işlem tamamlanmamaktadır sonrasında kullanılan takımın tekrardan bilenmesi gereklidir. Tasarlanan firar kenarları ve talaş çıkış açıları çok önemli olduğu için bileme işleminin de ayrıca uyarlanması gereklidir [23]. Takım maliyetleri tasarım dışında uygun fiyatlı olduğu için tel erozyon tezgahına bir alternatif olabilecek bir metottur. Ayrıca tel erozyon tezgahına göre 0.4 μm Ra değerinden daha iyi yüzey pürüzlülüğü sağlayabilmektedir [23,25].

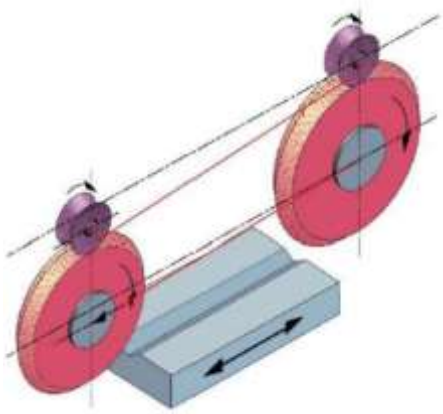
Frezeleme operasyonu, doğası gereği talaş kaldırma işlemini mekanik kuvvet uygulayarak yapmaktadır. Bundan dolayı, tel erozyon tezgahında olmayan bir mekanik yükleme bu proseste meydana gelmektedir. Bundan dolayı özel fikstür tasarımı gerekliliği vardır [7].

2.2.3. Sürünme ilerlemeli taşlama

Havacılık endüstrisinde türbin palesinin kökünün işlenmesinde sıklıkla tercih edilen proseslerden birisi de sürünme ilerlemeli taşlamadır [1]. Sürünme ilerlemeli taşlama, klasik taşlamaya göre yaklaşık 10 kat daha fazla pasoya girebilen, öte yandan tabla ilerlemesinin klasik taşlama metotlarına göre onda biri olan bir taşlama prosesidir [26]. Konvansiyonel taşlama ile olan farklılıklar sayesinde, havacılık sektörü için uygun olan 0.8 μm Ra değerlerinin altında yüzeyler üretme kabiliyetlerine sahiptir [27].

Sürünme ilerlemeli taşlama prosesi, konvansiyonel taşlamanın aksine proses esnasında bileme işlemi yapma kabiliyetine sahip aynı zamanda çok yüksek basınçlı soğutma sistemi ile parça işlemesi yapan bir prosestir. Sürünme ilerlemeli taşlama sistemleri 2 farklı tipe sahiptir. Taşlama esnasında, Resim 2.11'de gösterildiği gibi taş parça ile temasta iken aynı zamanda devamlı olarak bilenebilir, bu durumda bu prosese sürekli bilemeli sürünme ilerlemeli taşlama denmektedir. Eğer taşlama esnasında belirli aralıklar ile, örneğin 2 pasoda bir, taş tezgah içerisine konumlandırılmış bileyiciye gidip bileme yapıyor ise buna sürekli olmayan sürünme ilerlemeli taşlama denmektedir [26-28].

Sürünme ilerlemeli taşlamada çalışma prensibi hedef parça formunun zıttı olan bir bileyici ile taşın formunu alması ve parçaya o formun aktarılmasıdır. Bunun için Resim 2.12'de gösterildiği gibi hedef parça formunda bileyiciler imal edilir. Eğer formun devamlı taşa verilmesi isteniyor ise, taşın üzerine monte edilerek sürekli bilemeli proses yapılır.



Resim 2.11. Sürekli bilemeli sürünme ilerlemeli taşlama prosesi [28]



Resim 2.12. Parça özelinde hazırlanmış masa bileyiciler grubu [28]

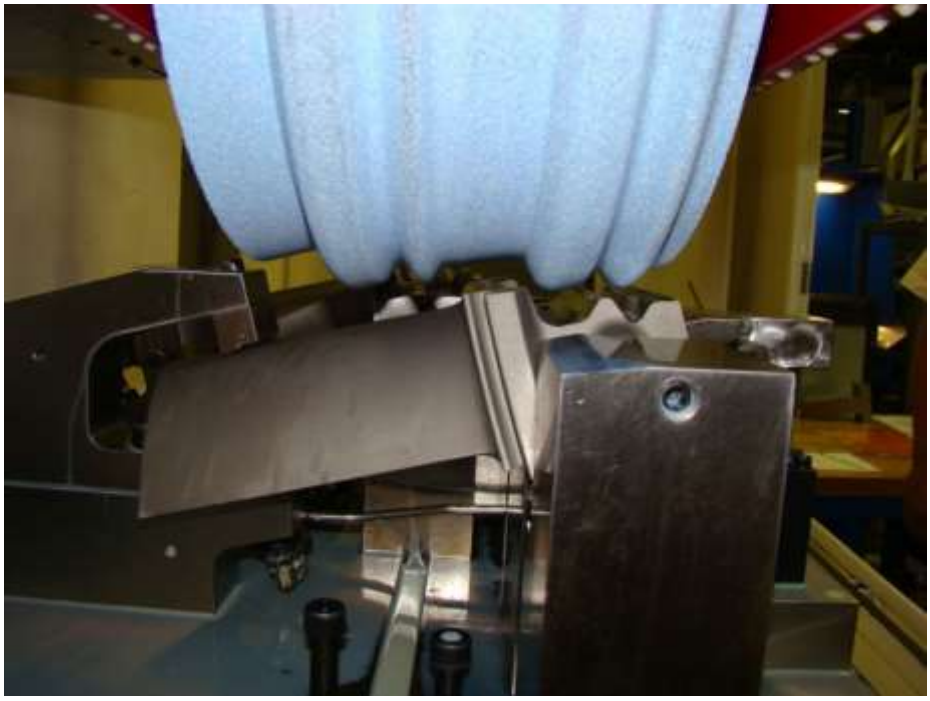
Aynı zamanda, farklı profillerde taş üretimi yapabilmek için serbest forma sahip bileyicilerde bulunmaktadır. Resim 2.13.'de gösterilen serbest formlu bileyiciler kullanarak, bileyicinin taş üzerinde belirli bir NC kod ile gezinmesi ile taşa istenilen form verilebilir. Ancak bileyici geometrisinin kısıtları ile her formun üretimi yapılamaz.

Resim 2.13.'de gösterilen serbest yüzey bileyici takımlar ile sürekli bileme operasyonları yapılamaz [28].



Resim 2.13. PA-K serbest yüzey bileyici takımı [28]

Sürekli bileme ve sürekli olmayan sürünme ilerlemeli taşlama proseslerinin her ikisinde havacılık endüstrisinde genellikle Resim 2.14'de gösterildiği gibi türbin palesinin kökünün işlenmesinde, sabit akış yönlendirici (NGV) parçalarının slotlarının işlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.



Resim 2.14. Türbin kökünün sürünme ilerlemeli taşlama prosesi ile işlenmesi [29]

Türbin palelerini işlenmesinde sıklıkla kullanılsa dahi, literatürde sürünme ilerlemeli taşlama ve türbin palesi kökü ile alakalı yayın sayısı oldukça kısıtlıdır. Proses edilmesi oldukça zor karmaşık bir sistemdir. Sistemi zorlaştıran etmenler, parametrelerin ayarlanması ve pale geometrisinin fikstürlenmesidir. Sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinin en önemli parametreleri paso derinliği, ilerleme ve taş hızıdır. Eğer sürekli bilemeli sistem kullanacak ise analiz edilmesi daha zor olan bileyici, taş dönme oranı parametresi de ilave olacaktır. Bahsedilen parametreler analiz edilerek, parça işlemede optimum yeniden katılaşma bölgesi kalınlığı, profil toleransı vb. gibi yüzey bütünlüğünü sağlayacak sonuçlar sağlanabilir [29,30]. Bu parametreler dışında, soğutucu sıvı debisi bu proseste oldukça önemlidir. Yüksek paso ve düşük ilerlemeden dolayı parça yüzeyinde oldukça yüksek sıcaklık meydana gelmektedir. Bu nedenle soğutmanın çok iyi bir şekilde yapılması gereklidir. Ancak taş yapısı gereği, boşluklu bir yapıda olduğu için sıvıyı emecektir bu nedenle analizi daha da zorlaştırır ve belirli kabuller yapılması gereklidir [30].

Literatürde genellikle sürünme ilerlemeli taşlama çalışmaları sıcaklık üzerine yapılmıştır. Sürünme ilerlemeli taşlama ve konvansiyonel taşlama için parça üzerine ısı girdisi hesaplamaları benzer bir şekilde yapılmaktadır. Eş. 2.3.'de gösterilen toplam ısı girdisi sayesinde parça üzerinde oluşacak ısı girdisi hesap edilebilir.

$$q_t = q_w + q_s + q_f + q_{ch} \quad (2.3.)\ [30]$$

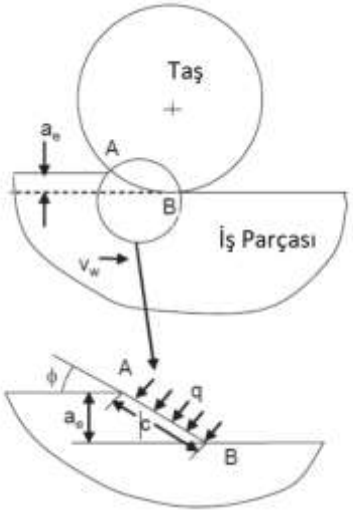
Eş. 2.3'de gösterilen q_t toplam ısı girdisini, q_w taştaki ısı girdisini, q_s hedef parça üzerindeki ısı girdisini, q_f soğutucu sıvı ile uzaklaştırılan ısı girdisini ve q_{ch} talaş ile uzaklaştırılan ısı girdisini simgelemektedir. Eş. 2.4.'de toplam ısı girdisinin formülasyonu gösterilmiştir.

$$q_t = \frac{F_t v_s}{\sqrt{a_p d_e b}} \quad (2.4.)\ [26]$$

F_t parça üzerindeki teğetsel kuvveti, v_s taşı çizgisel hızını, a_p taş ve parçanın kontak uzunluğunu ve d_e paso derinliğini ifade etmektedir. Eş. 2.3. ve 2.4. beraber incelendiğinde, parça üzerinde meydana gelecek sıcaklığın artmaması ya da kontrol altında tutulması için, taş hızı ve paso miktarı önemli ölçüde kritiktir [25-30]. Sıcaklığın kontrol altında tutulmaması ile, mikro sertlik alt yüzeylerde faz değişiminden dolayı oldukça artacaktır hatta mikro çatlaklara ve temperlenmeye neden olabilir bunlar yüzey bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyecektir. Bazı durumlarda aşırı sıcaklıktan dolayı parça yüzeylerinde oksidasyondan dolayı yanmalar meydana gelebilir [31]. Literatürde yapılan çalışmalar neticesinde, en önemli parametrelerden birisi olan ilerlemenin etkisinin faz değişimi üzerine olacağı bulunmuştur [32]. Eğer bu parametreler parça özelinde araştırılmaz ve parçaya yönelik çalışılmaz ise, alt yüzeylerde meydana gelen yapı bozuklukları yorulma dayanımlarını ve parçanın çekme basma dayanımlarını oldukça etkiler [33].

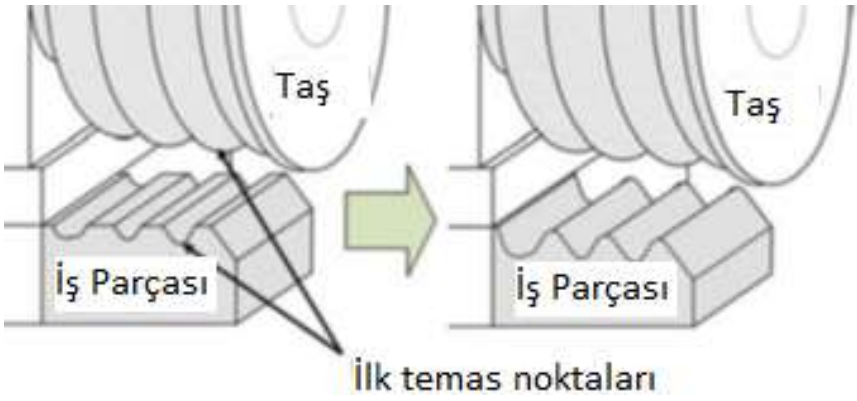
Taşlama sistemlerinde paso derinliği oldukça önemlidir. Resim 2.15'de gösterildiği gibi ısı kaynağı eğimli bir şekilde ilerlemektedir. Eğilimli olduğu için, B noktasının altına ciddi bir ısı iletimi yapılmaz ayrıca parçadan çıkan talaş ile AB boyunca ısı iletimi devam eder ve bu sayede B bölgesindeki maksimum sıcaklık azaltılır. Ancak sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerde açı 5-10 derece arasındadır. Açının büyüklüğünden ve düşük hızdaki ilerlemeden dolayı B noktasındaki sıcaklık düşüşü yok denecek kadar azdır. Sıfır derece ile

kıyaslama yapıldığında, malzeme yüzeyinde yanma olmadan sürünme ilerlemeli taşlamanın tamamlanması neredeyse imkansızdır. Bu nedenle genellikle sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde taşın parçaya girdiği ve çıktığı yüzeylerde ve alt yüzeylerde farklılıklar gözükür [26].



Resim 2.15. Taşlama sistemlerinde parça ve taş arasındaki açı [26]

Ayrıca, köknar ağacı profilinin şeklinden dolayı parça ile taşın bütün forma teması farklı zamanlarda meydana gelmektedir. Şekil 2.16'de gösterilen iç iç yarıçap bölgeleri taş ile ilk baştan itibaren temas halinde olduğu için daha uzun süre sıcaklığa maruz kalacaktır. Bu nedenle geometri tek seferde işlense bile, farklı bölgelerinde farklı oluşumlar meydana gelebilir [30].



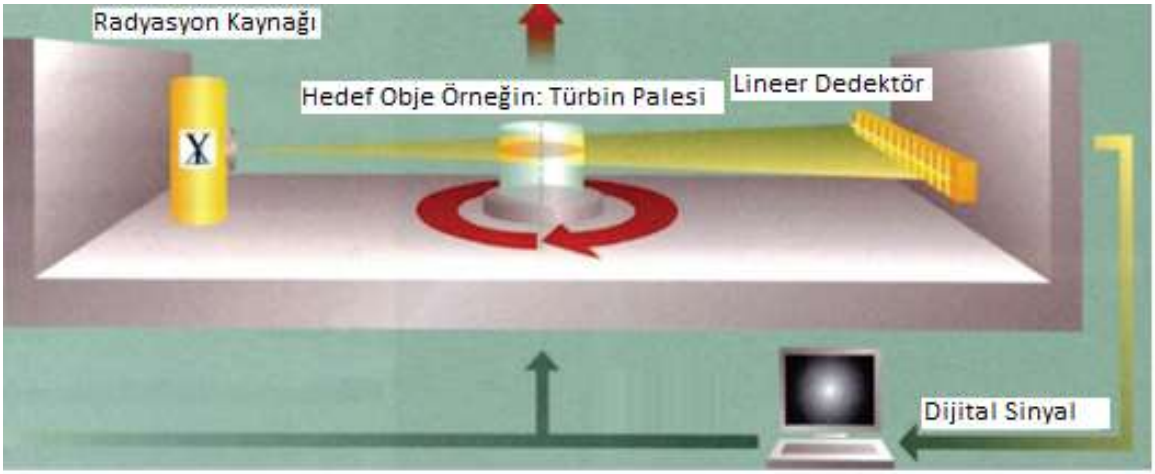
Resim 2.16. Taş ve Fir-Tree profilini ilk teması [30]

Sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde genellikle vitrifiye alüminyum oksit (Al_2O_3) taşlar kullanılmaktadır. Erişimi zor olan noktalarda kubik boron nitrit (CBN) taşlarda kullanılmaktadır. Ancak prosesin doğasında bileme operasyonu olduğu için CBN taşlar çok tercih edilmez. Proses diğer metotlar ile kıyaslandığında, çok daha hızlı bir prosestir. Ancak ilk yatırım masrafı hem tel erozyon tezgahı hem de frezeye kıyasla oldukça fazladır. Ayrıca, parça özelinde bileyici gibi takım masrafı olan bir sistemdir. Sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde, frezelemede olduğu gibi mekanik bir kuvvet oluşmaktadır. Özellikle yüksek paso değerleri nedeni ile, freze ile kıyaslandığında çok daha yüksek değerlerde mekanik kuvvetler meydana gelmektedir. Bu nedenle işlenecek parçaya göre çok özel fikstürlerin imalatı gereklidir [7].

2.3. Türbin Palesi Ölçüm Metotları

Havacılık endüstrisinde imalat kadar imalat sonrası ölçümde oldukça önemlidir. İşlenmesi istenen dar toleransların doğruluğunun ölçülebilmesi için endüstride bilinen ve kullanılan pek çok ölçüm metodu vardır. Bunların bazıları koordinat ölçme sistemleri (CMM), yapısal ışıkla tarama yöntemi ve lazer ile tarama metotlarıdır. Havacılık endüstrisinde en çok tercih edilen ölçüm metodu özel probları ile kullanılan CMM tezgahlarıdır. Ancak, sayılı noktaya dokunma, parçanın her noktasına erişim imkanın olmayışı gibi kısıtları vardır. Daha önemlisi parçanın imalat sektöründe bazen tezgah içerisinde ölçülme ihtiyaçları vardır bu nedenle probla ölüm yapan CMM teknolojisi her zaman yeterli kalmamaktadır. Dolayısı ile tomografi cihazı, yapısal ışıkla tarama ve lazer ile tarama metotları CMM'e bir alternatif olarak kullanılmaktadır [35].

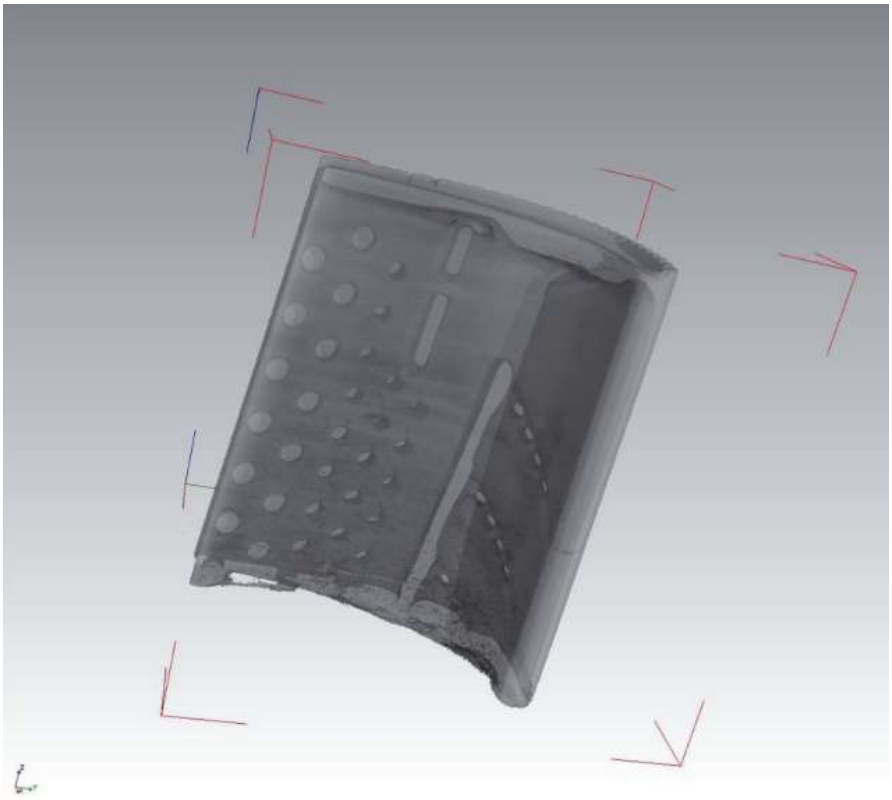
Günümüz teknolojisinde kullanılmakta olan tomografi cihazları ile kalite ölçümleri yapılmaktadır.



Resim 2.17. Tomografi cihazı çalışma mantığı [36]

Resim 2.17.'de gösterildiği gibi tomografi cihazları bir radyasyon kaynağından X-Ray ışınlarının parça üzerine iletilmesi ve parçadan soğrulmadan çıkan ışınların arka platformda duran algılayıcıya düşmesi ile parçanın görüntüsünün kesiti bilgisayar ortamına işlenerek kesit görüntü alınır. Tomografi cihazları bu ölçümü parçayı 360 derece kendi etrafında döndürürken devamlı yapar, bu sayede parçanın 3 boyutlu modeli elde edilir. Şekil 2.18.'de gösterildiği gibi tomografi sistemleri pale ölçümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle lazer ile tarama vb. metotlar yerine kullanılma sebebi boyutsal ölçümden ziyade parça iç yapısında boşluk, çatlak vb. gibi kusurların olup olmamasının incelenmesidir [37].

Lazer ile tarama sistemleri hem CMM tezgahlarına entegre edilerek kullanılabilir hem de tezgah yanına ayrıca bir sistem olarak yerleştirilebilir. Örneğin Resim 2.19'da gösterilen Nikon marka MMDX elle lazer tarama sistemi, genellikle tezgah üzerinde ölçümleri yapılabilmesi için tasarlanmış bir lazer ölçüm sistemidir. Kullanıcı parça daha tezgahta iken offset değerlerini ayarlayabilmek için, Resim 2.19'da gösterildiği gibi parçayı elle tarar ve tezgah yanına harici olarak kurulan bilgisayar ekranından parçanın hedef ölçüden ne kadar uzak ya da ne kadar içeride olduğunu görebilir [35,38-39].



Resim 2.18. Tomografi tezgahı ile taranmış bir pale [37]



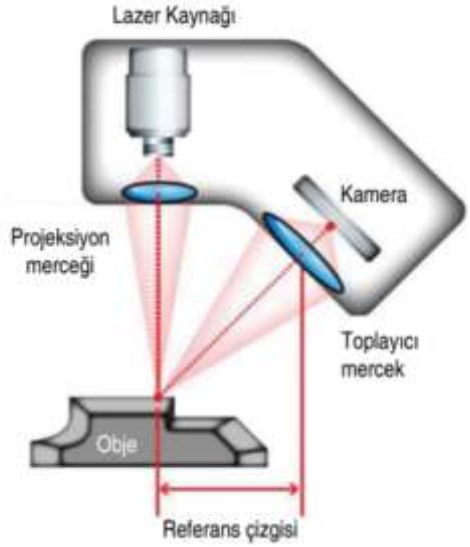
Resim 2.19. Elle lazer tarama sistemi MMDX

Ayrıca, lazer tarama sistemleri CMM tezgahlarına entegre edilerek ölçümlerde yapılabilir. Resim 2.20'de gösterildiği gibi CMM tezgahında prob yerine lazer ünitesi ile türbin kanatçığının taraması yapılmaktadır.



Resim 2.20. Lazer ile kanatçık taraması [35]

Lazer ile ölçüm sistemlerinin çalışma mantığı Resim 2.21'de gösterildiği gibi lazer parça üzerin gönderilir ve yansıyan lazerler mercek etrafında toplanır. Yansıma sırasındaki mesafe programlar sayesinde ayarlanarak lazer ölçümleri tamamlanır [35].



Resim 2.21. Lazer ile ölçüm sisteminin çalışma sistemi [35]

Ancak her ne kadar lazer sistemleri prob ile ölçüme göre kolaylık sağlasa da prob ile yapılan ölçümler kadar doğruluk miktarları yüksek değildir. Bunun nedeni lazer sistemlerinin çevresel faktörlerden oldukça etkilenmesidir. Lazer tarama sistemi lazer tarafından gönderilen lazer ışının geri yansıyıp mesafeye göre ölçüm yapmasına dayandığı için, lazer

ışının çarpacağı yüzeyin parlaklığı, çevresel ışık, oda sıcaklığı vb. gibi faktörler ölçümü etkilemektedir [35,39].

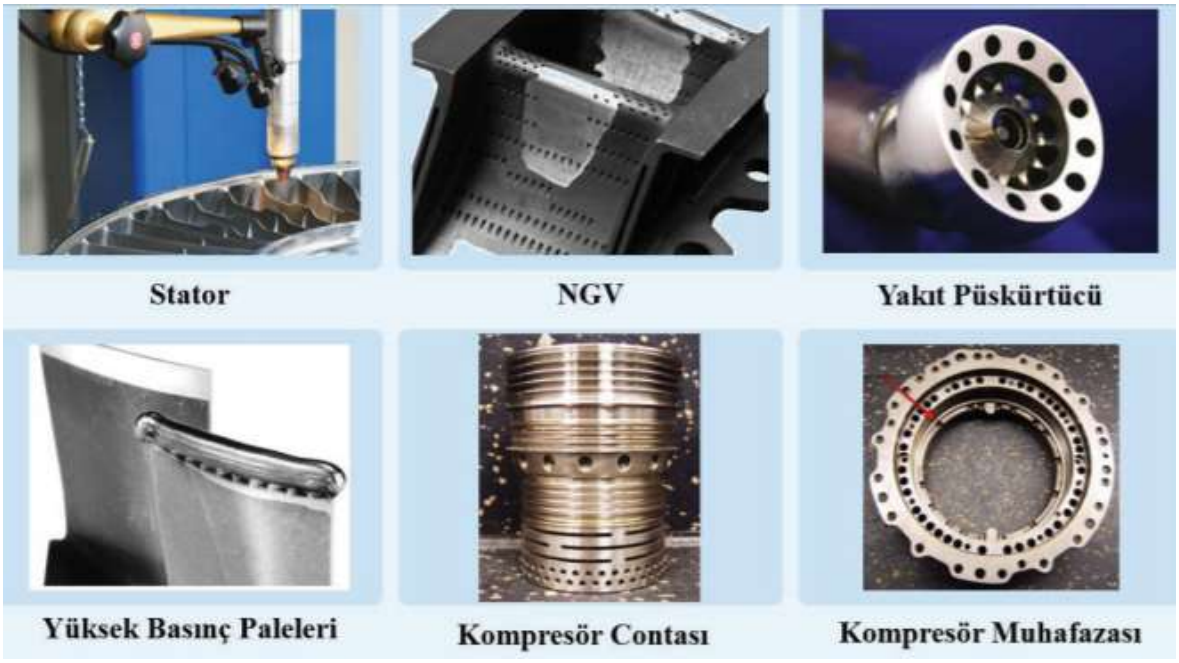
2.4. Havacılıkta Katmanlı İmalat

Katmanlı imalat alışagelmemiş bir imalat metodu olarak son yıllarda literatürde ve sektörde kendine oldukça fazla yer bulmaktadır. Katmanlı imalat döküm ve dövme proseslerinin aksine hızlı sonuç veren bir sistemdir. Katmanlı imalat Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, hedef parçanın CAD modeli katmanlı imalata hazırlanır ve üretim tamamlanır [40].



Şekil 2.1. Katmanlı imalat üretim metodu [40]

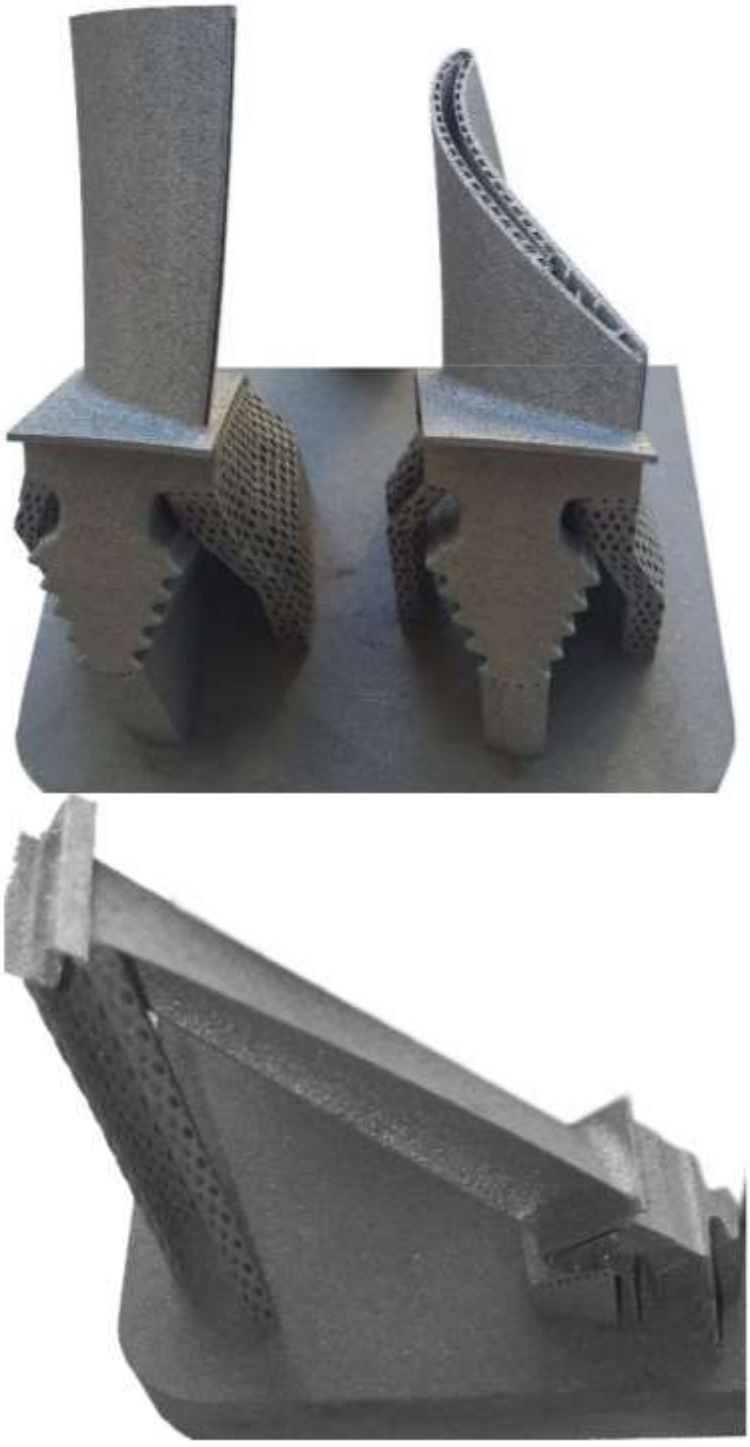
Havacılık sektöründe birçok malzeme son şeklinin yakınına dövme ve döküm malzemelerden imal edilmektedir. Ancak son yıllarda, katmanlı imalatın gelişmesi ile Resim 2.22'de gösterildiği gibi pek çok parçanın hem üretimi hem de tamir işlemleri yapılmaktadır [40,41].



Resim 2.22. Katmanlı imalat havacılık uygulamaları [41]

Türbin paleleri genellikle döküm metodu ile üretilse bile günümüz teknolojisinde Resim 2.23'de gösterilmiş türbin paleleri katmanlı imalat metodu ile üretilmektedir [42].

Türbin palelerinin üretimi katmanlı imalat ile yapılsa bile, kök bölgesinde istenilen toleranslar ve yüzey kalitesinde üretim katmanlı imalat ile yapmak mümkün değildir. Bu nedenle kök geometrisinin tekrardan ikincil bir işlem ile işlenmesi gerekmektedir.



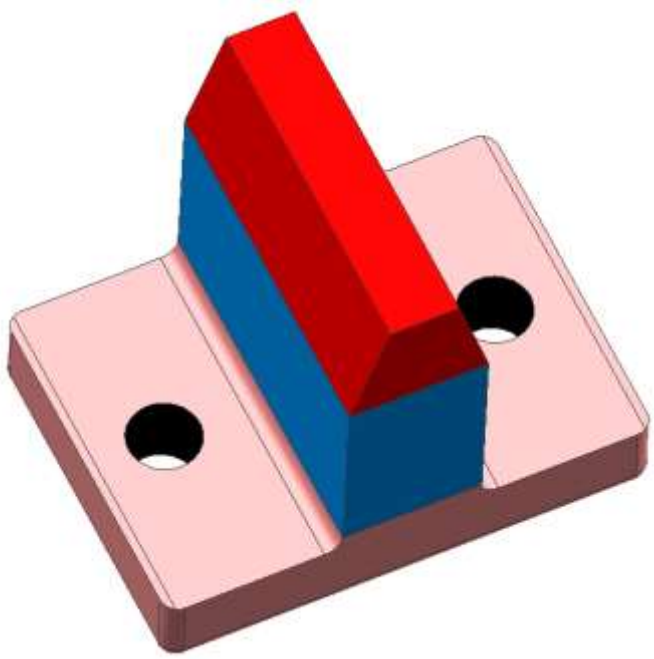
Resim 2.23. Katmanlı imalat ile üretilmiş türbin paleleri [42]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında havacılık sektöründe türbin bölgesinde sıklıkla kullanılan nikel bazlı süper alaşımlar ile çalışmalar yapılarak, sürünme ilerlemeli taşlama prosesi için hedef geometri olarak belirlenen köknar ağacı geometrisinin işlenmesinde yüzey bütünlüğü kavramları incelerek parametre optimizasyonu yapılmıştır.

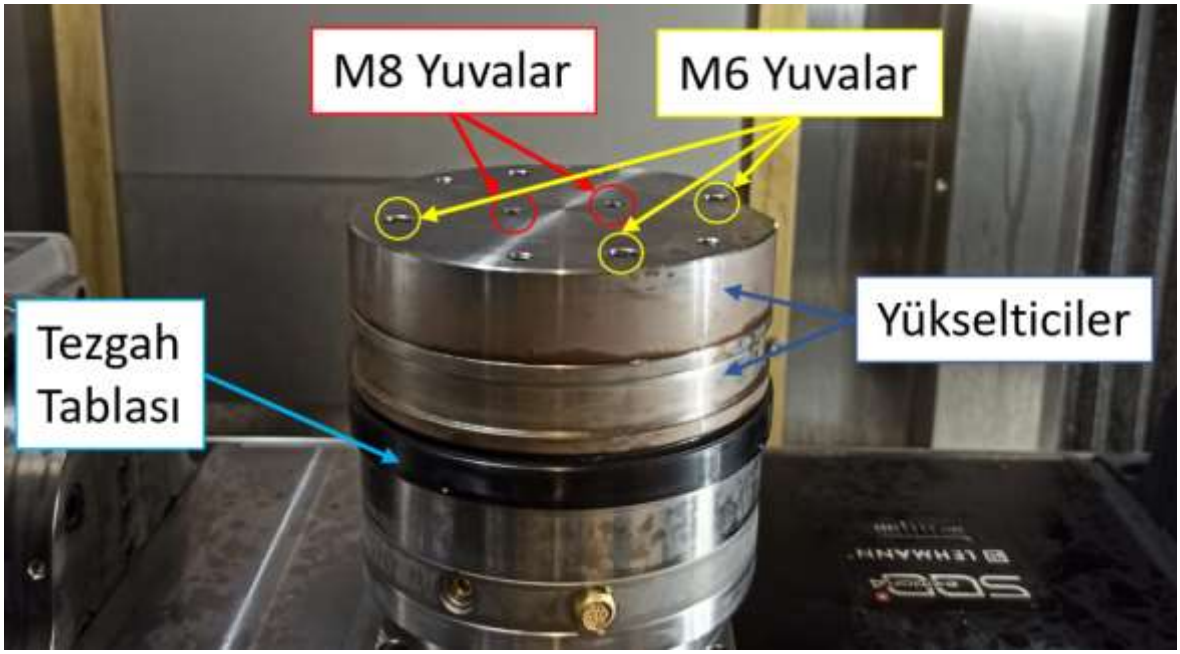
3.1. Numune Tasarımı

Bu tez çalışmasında Blohm Profimat Mc607 Sürünme ilerlemeli taşlama tezgahı kullanılmıştır. Tezgah tabla ve eksen ölçüleri göz önünde bulundurularak, mevcut köknar ağacı geometrisine uygun bileyicilerin tasarımı düşünülerek Resim 3.1.'de gösterilen numuneler tasarlanmıştır. Numunelerin kırmızı ile gösterilen alanları tezgahta işlenecek, geri kalan alanları ise sadece fikstürlemeye yardımcı olmaktadır. Kullanılan taşların sıfır boyutunda yani 400 mm çaplı olduğu düşünülerek soğutucu nozul sisteminin tablaya çarpmaması için şekil 29'da gösterilen mavi alanlar tasarlanarak parçanın yükseltilmesi sağlanmıştır.



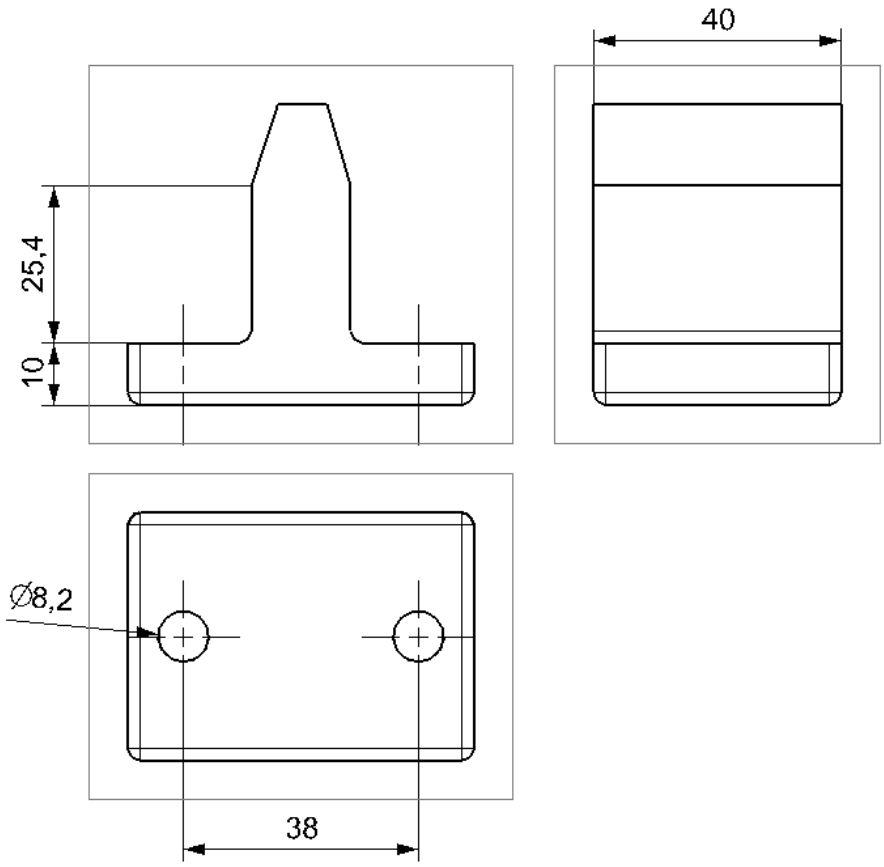
Resim 3.1. Deneyler için tasarlanan numuneler

Tasarlanan geometrilerin, tablaya her seferinde ±0.050 mm tolerans ile aynı bölgeye yerleşmesi için siyah renkle gösterilen alanlara M8 cıvatanın geçebileceği delikler açılmıştır. Numuneler için kullanılacak olan fikstür ise, Resim 3.2.'de gösterildiği gibi tezgah tablası üzerine bir yükseltici gibi tasarlanarak M6 cıvatalar ile tezgah tablasına bağlanır şekilde, üzerinde numuneler için ayrılmış M8 cıvata deliklerinin olduğu şekilde tasarlanmıştır.

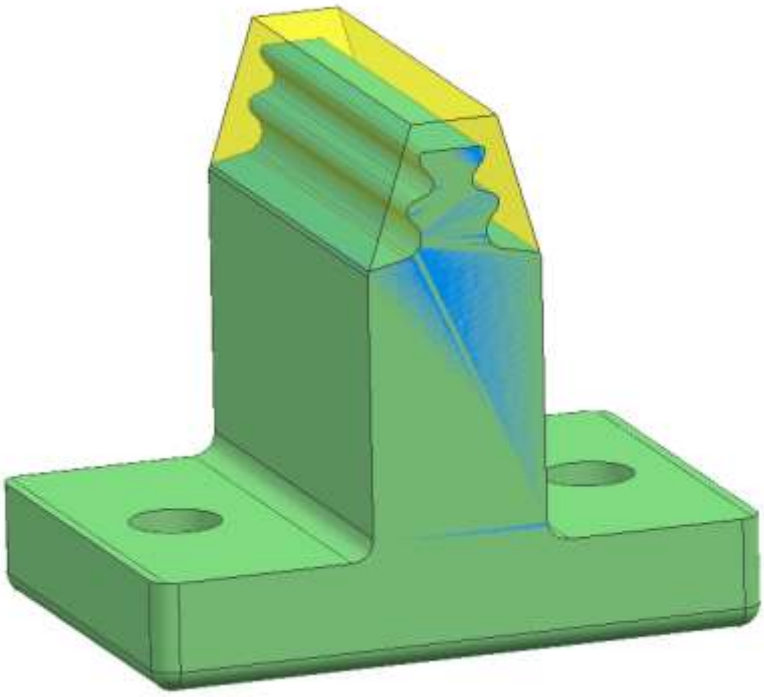


Resim 3.2. Denemelerde kullanılan fikstür

Resim 3.3.'de gösterildiği gibi parçanın tam boyu 40 mm olarak tasarlanmıştır. Bunun nedeni taşın giriş ve çıkışta farklı eğilimler gösterecek olmasından dolayı giriş ve çıkışın ayrı bir şekilde incelenmek istenmesidir. Ayrıca Resim 3.4.'de üretilen parça ve hedef parça aynı görselde gösterilmektedir.



Resim 3.3. Numunelerin ölçüleri



Resim 3.4. Üretilen numune ve hedef parça

3.2. Taguchi Deney Tasarımı

Literatür araştırması kısmında anlatıldığı gibi, sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde pek çok parametre bulunmaktadır. Ancak, literatür ve deneyimlenen tecrübe ile Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2.'de gösterilen parametreler bu deney setinde kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. L18 Taguchi tipine göre dizayn edilmiş 1.deneme grubu

Numune No	Bileme Tipi	Z Ekseni İlerlemesi(mm/dk)	Kesme Paso Derinliği(μm)	Taş Çizgisel Hızı(m/s)
1	Sürekli	300	50	15
2	Sürekli	300	250	25
3	Sürekli	300	600	35
4	Sürekli	400	50	15
5	Sürekli	400	250	25
6	Sürekli	400	600	35
7	Sürekli	500	50	25
8	Sürekli	500	250	35
9	Sürekli	500	600	15
10	Aralıklı	300	50	35
11	Aralıklı	300	250	15
12	Aralıklı	300	600	25
13	Aralıklı	400	50	25
14	Aralıklı	400	250	35
15	Aralıklı	400	600	15
16	Aralıklı	500	50	35
17	Aralıklı	500	250	15
18	Aralıklı	500	600	25

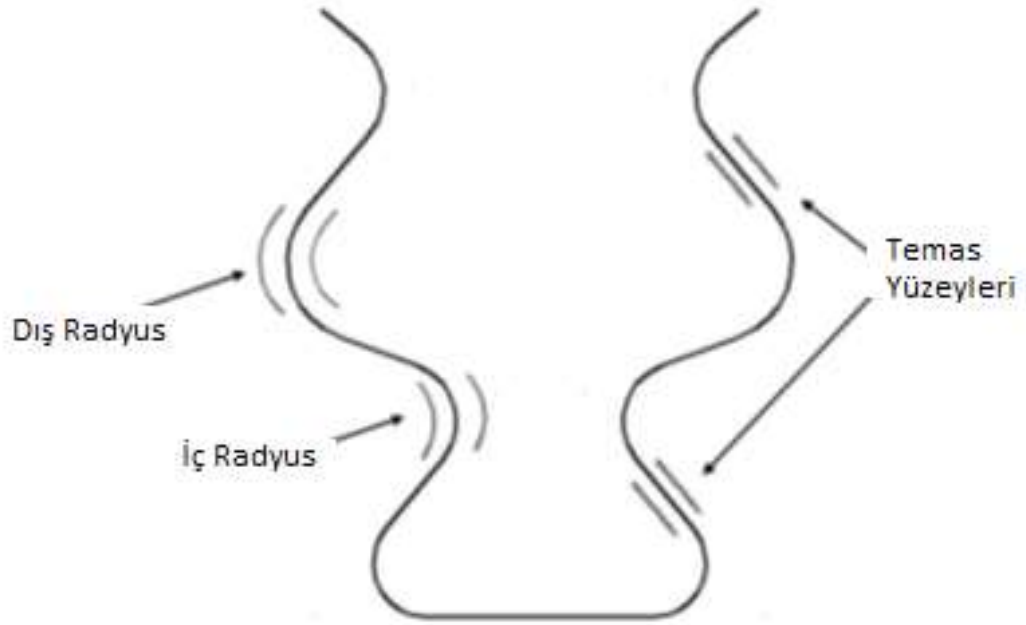
Çizelge 3.2. L9 Taguchi tipine göre dizayn edilmiş 2.deneme grubu

Numune No	Bileme Oranı	Z Ekseni İlerlemesi(mm/dk)	Kesme Paso Derinliği(μm)	Taş Çizgisel Hızı(m/s)
1	0.8	300	50	15
2	0.8	400	250	25
3	0.8	500	600	35
4	0.9	300	250	35
5	0.9	400	600	15
6	0.9	500	50	25
7	1.0	300	600	25
8	1.0	400	50	35
9	1.0	500	250	15

Deney seti 1 ile sürekli bileme ve aralıklı bileme sistemleri hem birbirlerine göre hem de kendi içlerinde Z ekseni ilerlemesinin, kesme paso derinliğinin ve taş çizgisel hızının, yüzey bütünlüğüne etkisi incelenecektir.

Deney seti 2 ile sürekli bileme sisteminde ayrı bir parametre olan bileyicinin taşa göre dönme oranının etkisi incelenmek istenmiştir.

Tez boyunca sürekli ve aralıklı bileme durumları için yapılan denemeler sonuçlarında, yüzey bütünlüğü için, yeniden katılaşan bölge kalınlığı, HAZ kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve profil ölçümleri yapılacaktır. Yapılacak ölçümlerde Resim 3.5.'de gösterilen bölgelere göre ayrı ayrı ölçümler yapılacaktır. Temas yüzeyi, türbin palesinin çalışma esnasında disk ile temasını sağlayacağı bölge olduğu için en önemli bölgedir. İç ve dış yarıçap bölgeleri ise, disk ile montajını etkileyen unsurlar olduğu için ayrıca incelenecektir.



Resim 3.5. Numunelerin ölçüm bölgeleri

3.3. Numune Üretimi

Bu tez çalışmasında kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3.'de verilen Inconel 939 alaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Inconel 939 malzemesinin yüzdece kimyasal kompozisyonu [43]

Element	**Simgesi**	**Ağırlıkça Oranı (%)**
Krom	Cr	22.5
Kobalt	Co	19.0
Karbon	C	0.15
Tungsten	W	2.0
Niyobyum	Nb	1.0
Tantal	Ta	1.4
Titanyum	Ti	3.7
Alüminyum	Al	1.9
Zirkonyum	Zr	0.1
Bor	B	0.01
Nikel	Ni	Dengeleyici

Seçilen malzeme ile EOS M290 katmanlı imalat tezgahı ile Resim 3.6.'da gösterildiği gibi numunelerin üretimi tamamlanmıştır. Hazırlanan deney tasarımlarına göre 14 numune gereklidir, tezgahta işleme sırasında olabilecek kazalardan dolayı ve testlerin tekrar edilebilirliği açısından 28 adet üretilmiştir.

Katmanlı imalat ile üretimi tamamlanan numuneler alt taştan ayrılması için Agie Charmilles CUT300Sp tel erozyon tezgahı tezgahında 0.3 mm çaplı Thermo Tex markalı bakır tel kullanılarak numuneler alt taştan ayrılmıştır.

Alt taştan ayrılan numuneler 4 saat 1160°C ve 16 saat 850°C de ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. Isıl işlemleri tamamlanmış ve kesime hazır olan numuneler Resim 3.7.'de gösterilmektedir.



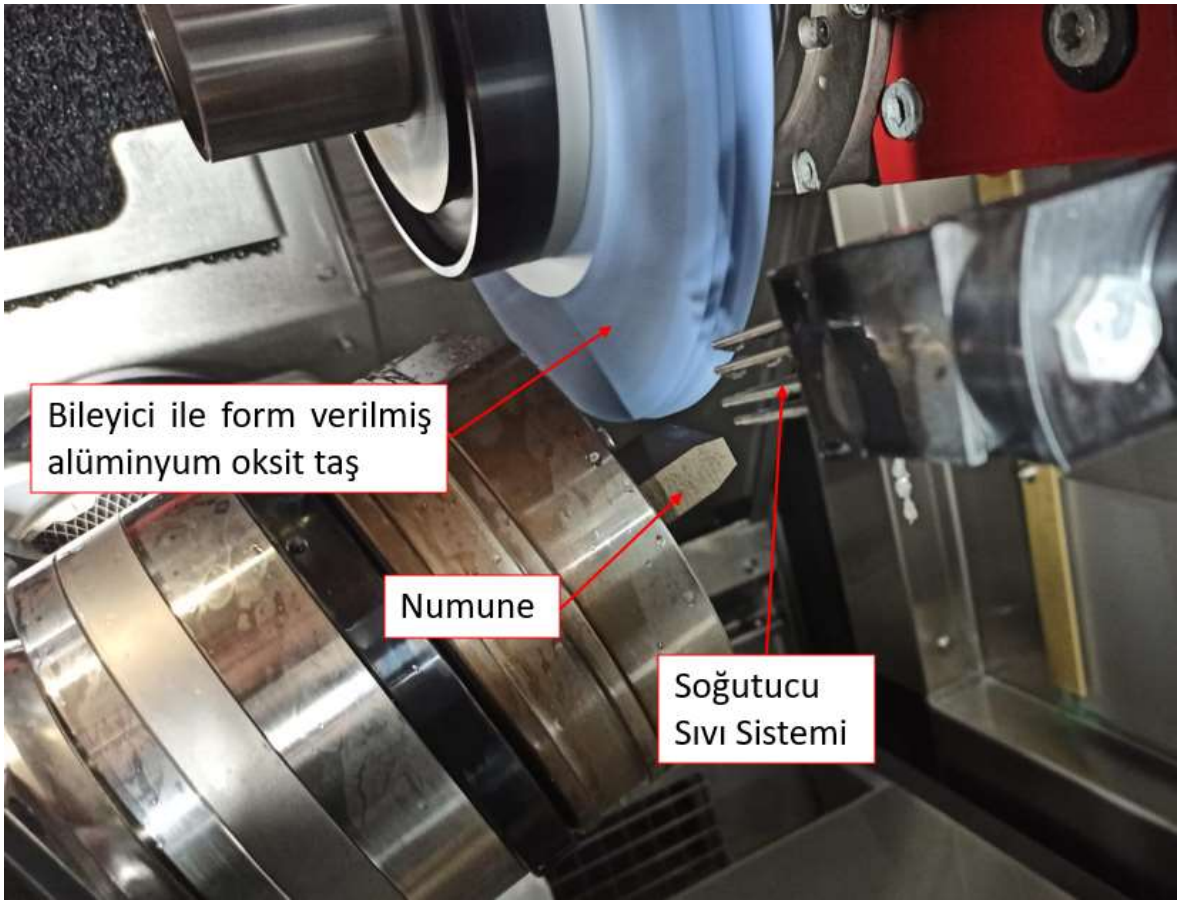
Resim 3.6. Numunelerin alt taş üzerindeki görüntüsü



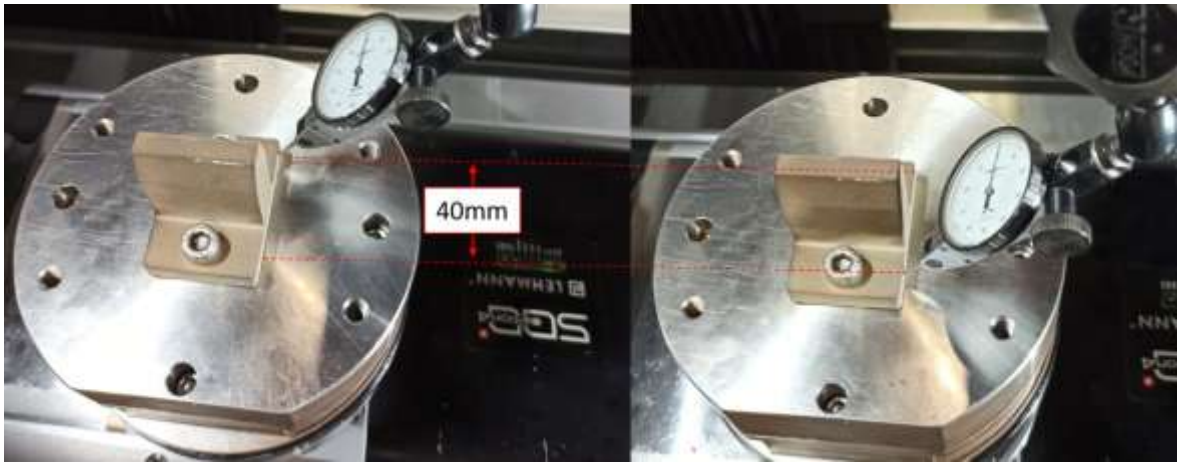
Resim 3.7. Üretimi tamamlanmış numuneler

3.4. Parça İşlemeleri ve Tezgah Konfigürasyonu

Hazırlanan numuneler Resim 3.8.'de gösterildiği gibi hazırlanan fikstüre bağlanarak işleme için gerekli hazırlıklar yapılmıştır. Tez boyunca karşılaştırılacak olan sonuçlardan birisi profile etkisini görmek olduğu için, numuneler Resim 3.9.'da gösterilen işaretli alandan indikatör yardımı ile taranmıştır. Birinci noktada indikatör ile dokunduktan sonra eksenler sıfırlanır ve 40 mm Y ekseninde kaydıktan sonra, tekrardan parçaya dokunularak açısal dönüklük ark tanjant yardımı ile hesaplanmıştır. Bağlamadan kaynaklı açısal bozukluk indikatör yardımı ile hesaplanmış ve tezgahın döner tabla eksinine eksi offset olarak girilmiştir. Bu sayede her bağlanan parça, x eksenine paralel bir şekilde işlenmiştir. İşlemelerde soğutucu sıvı tezgah konfigürasyonunun izin verdiği en yüksek olan 150 psi ile işlenmiştir.



Resim 3.8. Parça işlemesi için tezgah görseli



Resim 3.9. İndikatör yardımı ile açısal dönüklüğün giderilmesi

Parça işlemeleri Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de gösterilen numunelere göre parametrelerin ayarlanması ile tamamlanmıştır. Resim 3.10.'da gösterildiği gibi numunelerin bir tarafında bir numune işlemesi, öbür tarafında 2. Numune işlemesi yapılmaktadır.



Resim 3.10. İşlenmiş numuneler

Parça işlemesi Resim 3.11.'de gösterildiği gibi taşın parçaya aynı form ile girmesi ile gerçekleştirilmektedir.



Resim 3.11. Parça işleme anı

3.5. Taş Seçimi

Bu tez çalışmasında tezgah konfigürasyonuna uygun olması için Çizelge 3.4.'de detayları gösterilen Tyrolit Strato Ultra taş kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Denemelerde kullanılan taş özellikleri

Aşındırıcı Tipi	A	Alüminyum Oksit
Tane Boyutu	602	Oldukça İnce
Sınıfı	G	Yumuşak
Bağlayıcı Tipi	V	Vitrifiye

3.6. Kalite Ölçümleri

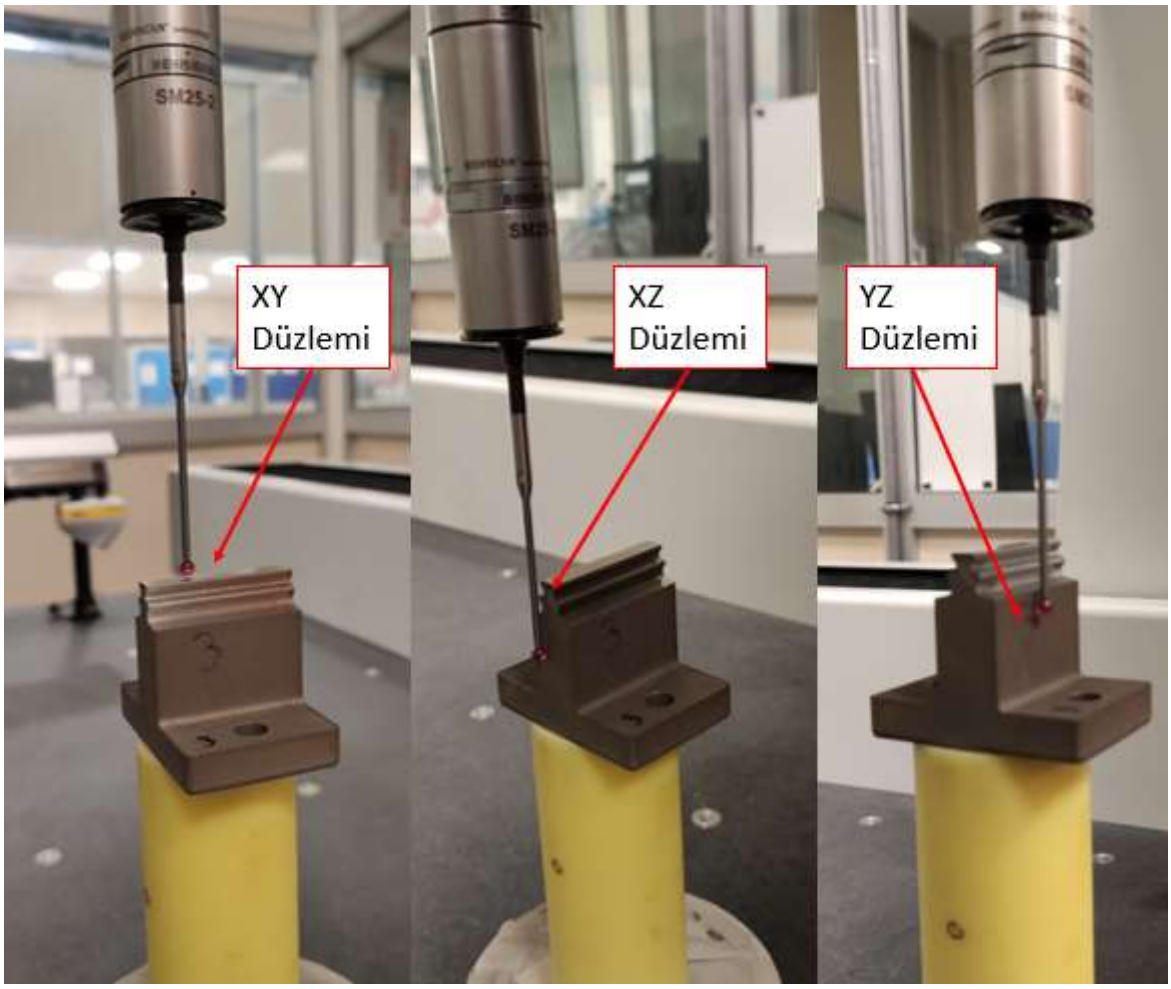
Bu tez çalışmasında işlenen numunelere sırası ile görsel muayene, CMM tezgahında profil ölçümleri, MarSurf M400 Profilometre cihazında yüzey pürüzlülüğü ölçümü, mikroskop altında yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları ölçümleri yapılmıştır.

3.6.1. Görsel muayene

İşlenen numunelerde parametreler farklılık gösterdiği için, görsel olarak herhangi bir istenmeyen unsurun varlığı ve giriş çıkışlarda yanma olup olmadığı incelenmiştir.

3.6.2. CMM ölçümleri

CFG tezgahında işlenen numunelerin, çapak alma operasyonlarından sonra CMM tezgahında, ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için Resim 3.12.'de gösterilen yüzeyler referans yüzeyler olarak program hazırlanmış ve köknar ağacı bölgesi taranmıştır.

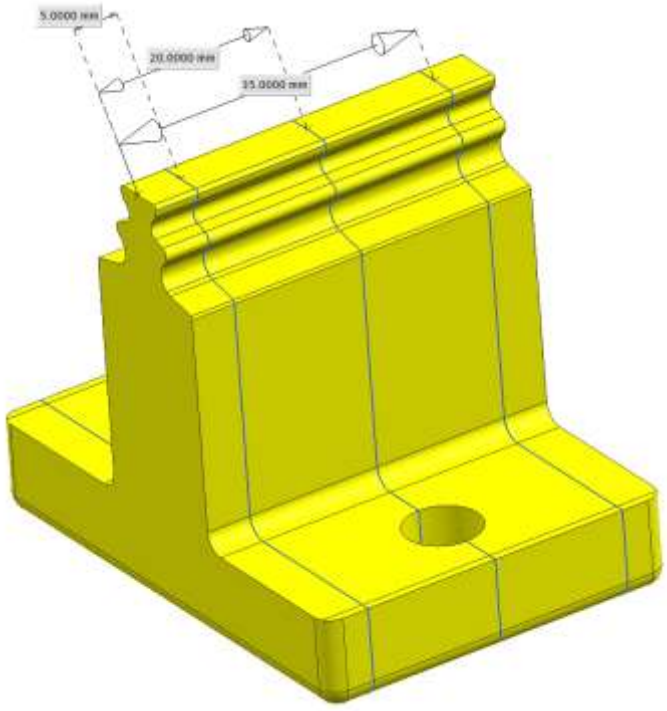


Resim 3.12. Numuneler için CMM ölçümü



Resim 3.13. CMM ölçümü

Numuneler lazer yardımı ile tarandıktan sonra taşın giriş, ortalama yüzey ve çıkış yüzeylerindeki etkisini incelemek için alınan profil kesitleri Resim 3.14'de gösterilmiştir. Bu sayede taşın girişte, çıkışta ve ara yüzeyde oluşturduğu profil farlılıkları analiz edilebilmektedir.



Resim 3.14. Lazer tarama sonucu alınan kesit bölgeleri

3.6.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Lazer tarama sonrası numuneler MarSurf M 400 cihazında Resim 3.15'de gösterildiği gibi önce disk ile temas yüzeyi oluşturacak bölgelerin ölçümü yapılmıştır. Temas yüzeylerin ölçümleri sonrasında Resim 3.16.'da gösterildiği gibi motorun çalışma esnasında türbin kökünün disk ile bir temas kurmayacak, ama kök altında bulunan düz alanların ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sırasında ISO 4287 standardından faydalanılmıştır.



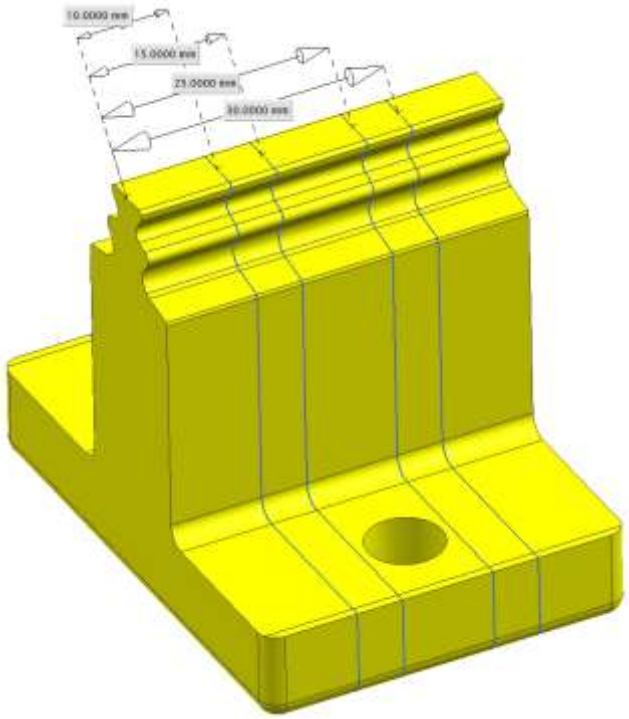
Resim 3.15. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri - 1



Resim 3.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri - 2

3.6.4. Yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarının ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonrası numuneler yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlarının ölçümleri için bakalite alınmalıdır. Giriş ve Çıkış bölgelerinde prosesin doğasından gelen sıcaklık farklılıkları olduğundan dolayı, numuneler tel erozyon tezgahı yardımı ile Resim 3.17.'de gösterilen ölçülerde bölünerek bakalite alınmıştır. Bu sayede giriş ve çıkış durumları ayrı ayrı incelenebilmiştir.



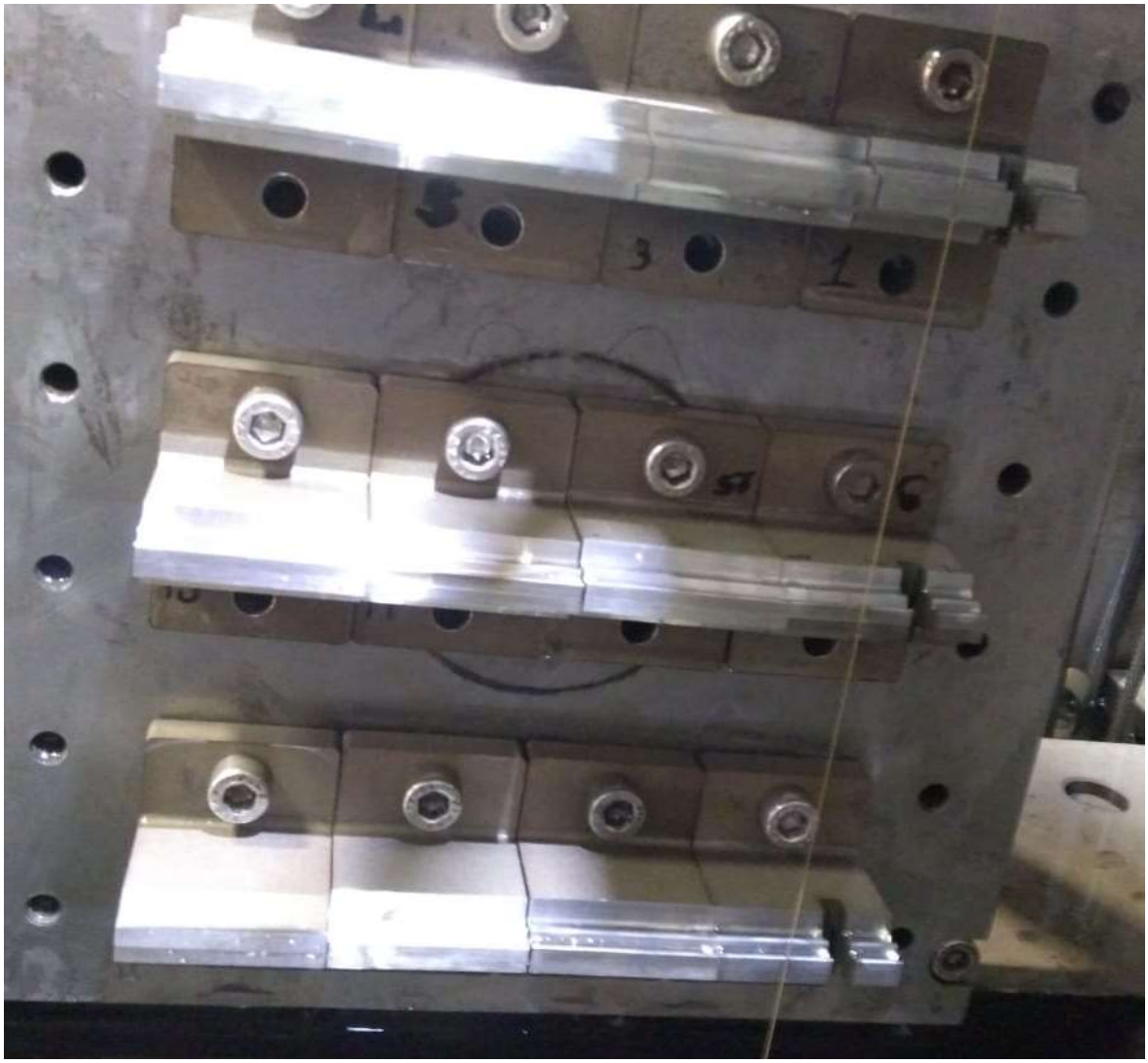
Resim 3.17. Numunelerin yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçümleri için tel erozyon tezgahı ile parçalara bölünmesi için ölçüler

Ölçüleri belirlenen numuneler tel erozyon tezgahında kesilmiştir. Kesim esnasında parçaların giriş, çıkış ve ara bölgelerinin takibinin sağlanması için Resim 3.18'de gösterildiği gibi lazer markalama yapılmıştır.



Resim 3.18. Numunelerin takibi için numaralandırma

Ölçüleri belirlenen ve lazer markalaması yapılan numuneler Resim 3.19.'da gösterildiği gibi tel erozyon tezgahında kesimler için hazırlamış olan fikstür üzerine bağlanarak, istenilen ölçülerde kesimlerin sağlanmasını sağlayacak olan program yardımı ile kesimleri yapılmıştır.



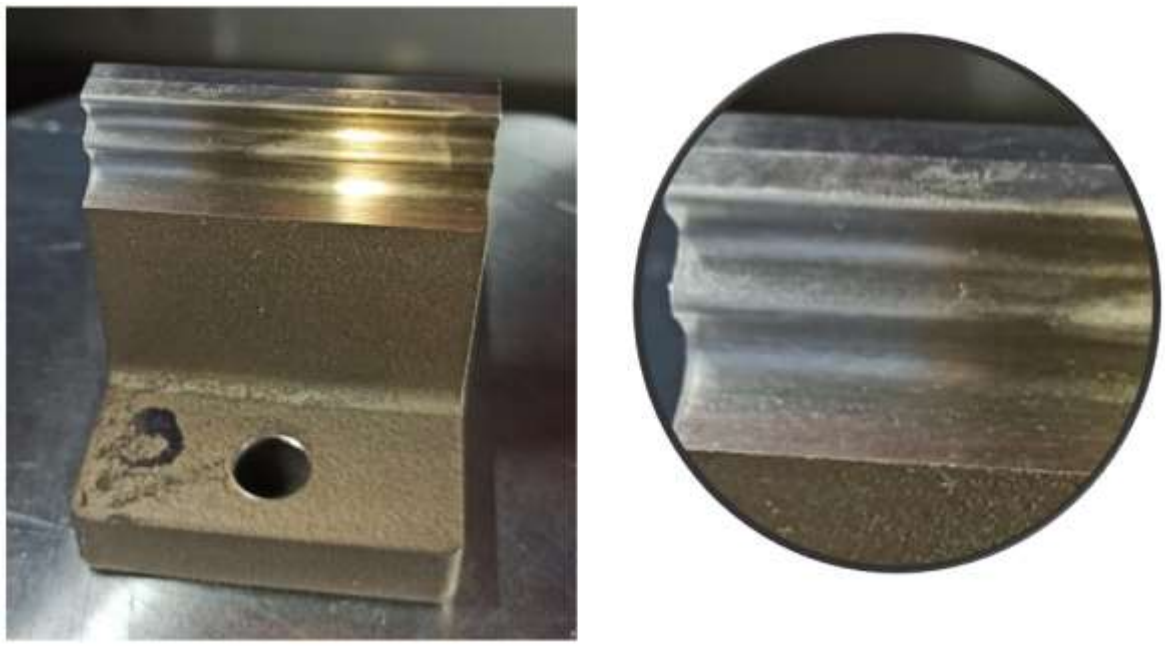
Resim 3.19. Numunelerin tel erozyon tezgahı ile kesilmesi

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Görsel Muayene Sonuçları

27 Farklı parametre ile kesilmiş numunelere öncelikle parça işlemesinden sonra görsel muayene yapılmıştır. Yapılan görsel muayenelerde yüzeyde bir çatlak ya da gözle görülür bir pürüzlülük meydana gelmemiştir.

Literatür taraması başlığı altında anlatıldığı gibi yüzeylerde yanıklar meydana gelmiştir. Deney seti 1 için sadece 9 numaralı parametre setinde Resim 4.1.'de detaylıca gösterilen bölgede yanık izi olduğu görülmüştür. Yanık bölge oksidasyona uğrayan ve diğer yüzeylere göre maviden kahverengine geçen renk geçişi ile belli olmaktadır. Ancak bu yanık bölgenin yüzeysel olup olmadığı yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçümlerinde belli olmuştur.

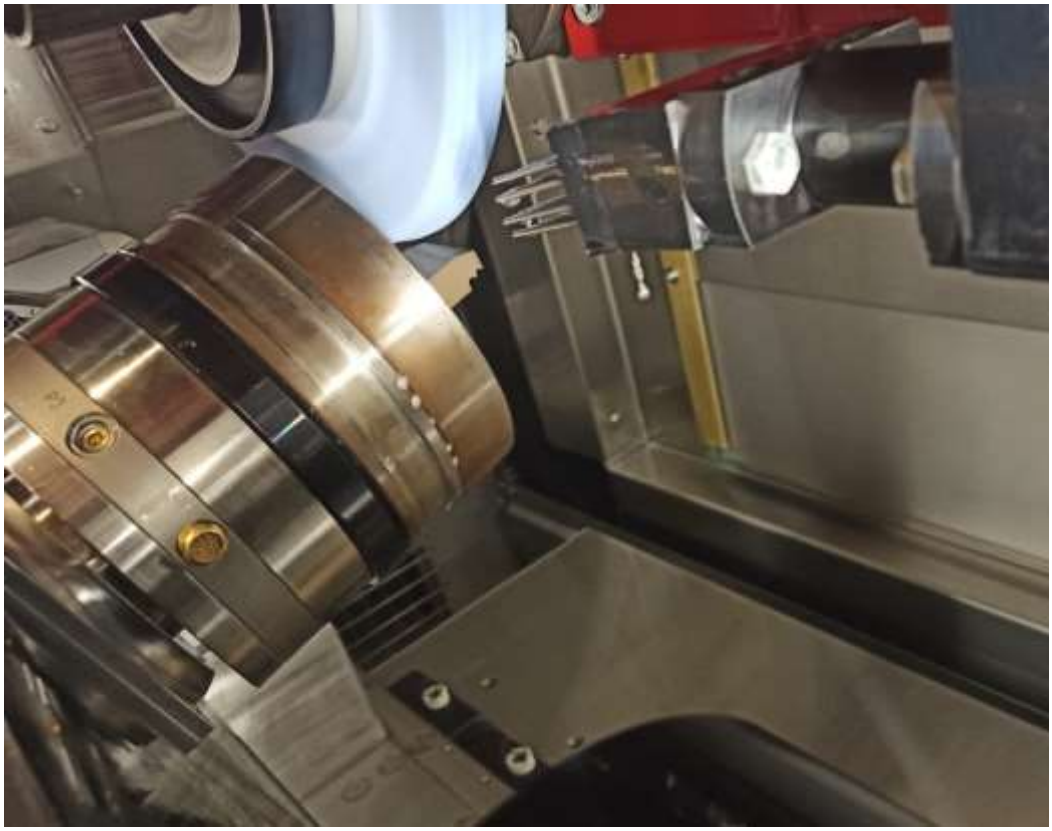


Resim 4.1. Deney seti 1 - 9 numaralı parametre yanık izi

Eş. 4.1.'de gösterilen taşlama operasyonlarında meydana gelen kritik sıcaklığın hesaplaması gösterilmektedir. Normal koşullarda Eş. 4.1.'de gösterilen taşın çıkışa doğru talaş ile attığı sıcaklık azalması ile kritik sıcaklığa yaklaşıldığı görülmektedir.

$$\theta_m = \frac{1.13\alpha^{\frac{1}{2}} v_w^{\frac{1}{2}} (u - 0.45u_{ch})}{k d_e^{\frac{1}{4}}} \quad \text{(4.1.) [26]}$$

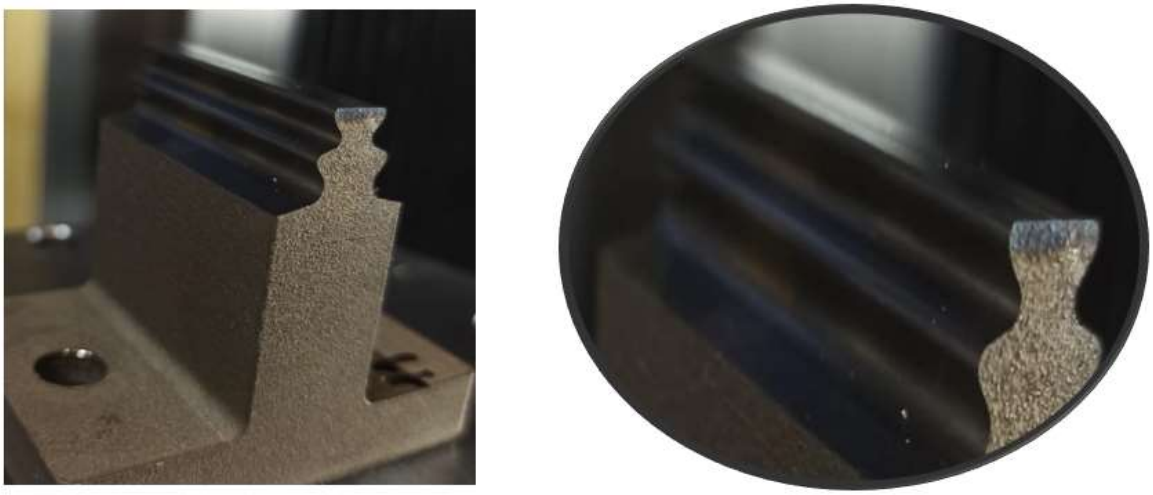
Bu nedenle çıkışa doğru parça üzerinde yanıklar olması beklenen bir durumdur. Ayrıca Resim 2.16.'da gösterilen açının artması da sıcaklığı arttıran bir etmendir. Ancak 9 numaralı numunede, literatürün aksine çıkış değil, girişte yanma meydana gelmiştir. Bunun nedeni Resim 4.2.'de gösterilen soğutucu sistemin taşın gidiş istikametinde kalması olarak yorumlanabilir çünkü 9.numune ilk deney setinde sürekli bilemeli sistemler içinde en yüksek ilerlemeye ve en yüksek pasoya sahip olanıdır. Bu nedenle nozuldan çıkan soğutucu sıvı yeterli soğutmayı sağlamamış olabilir bu nedenle kritik sıcaklığa ulaşıp, yanma meydana gelmiş olabilir. Ancak bu yanmanın alt yüzeylere etkisi yeniden katılaşan bölge ve haz ölçümlerinde belli olacaktır. Havacılık standartlarına göre, yüzeyde görünür yanık olan parça hurdaya ayrılmaktadır.



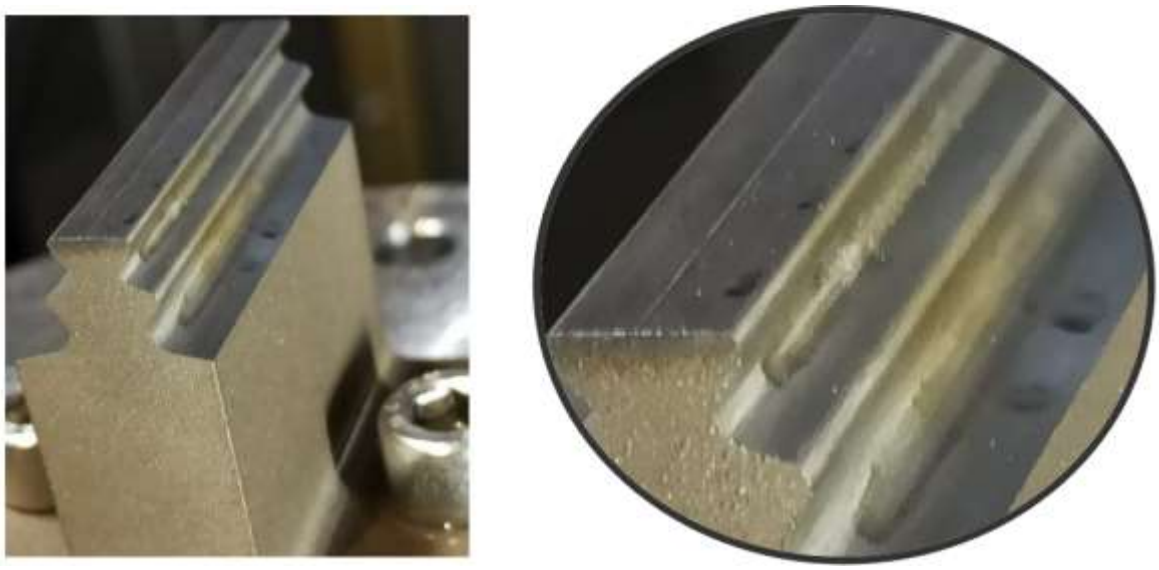
Resim 4.2. Nozul ve taş konumu

Deney seti 1'de bilemeler kapandıktan sonra sadece her 500 mikronluk pasoda bir 100 µm değerinde bileme yapılmıştır ve proses tekrar edilmiştir. Aralıklı bilemeli sistemlerde yanma

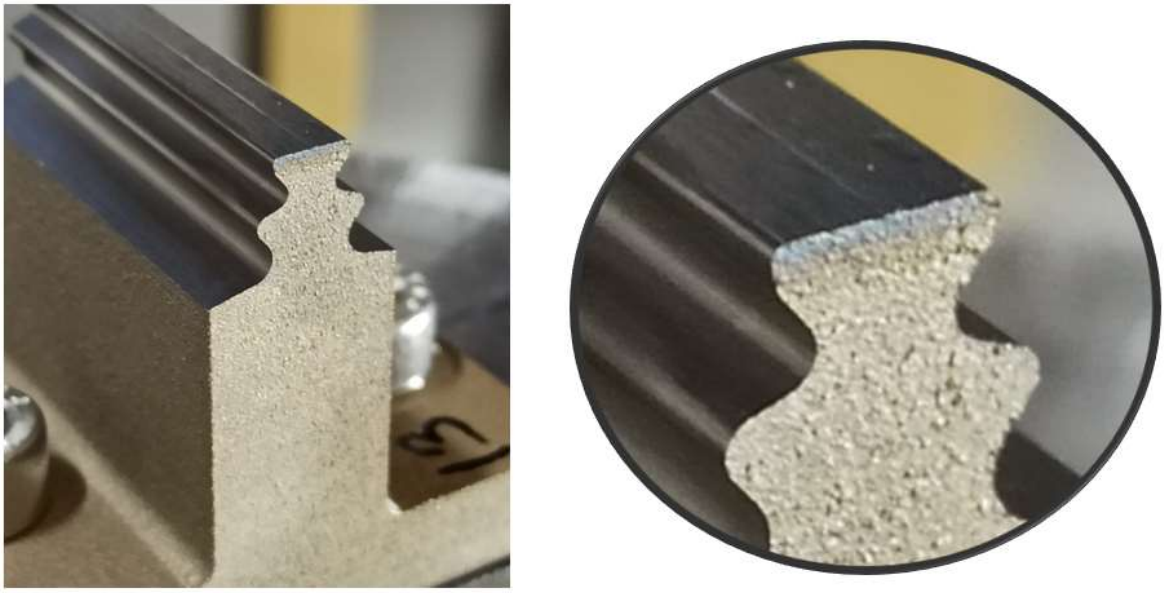
olayı sürekli bilemeli sistemlere göre çok daha sık rastlanılmıştır. Resim 4.3. - 4.8. gösterildiği üzere, parametre seti 12, 13, 14, 15, 16 ve 18'de taşın çıkış bölgelerinde ciddi yanıklar meydana gelmiştir.



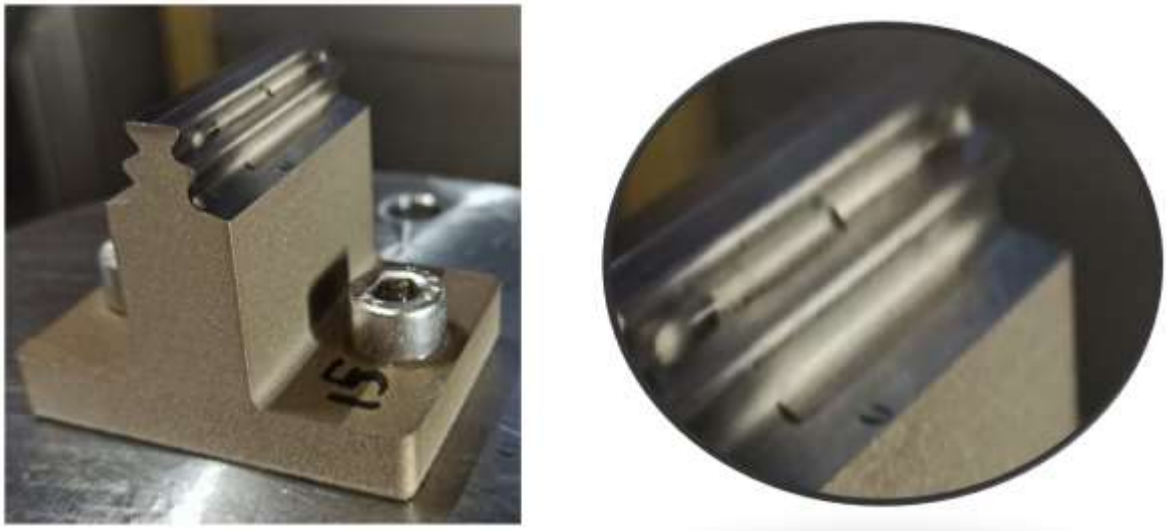
Resim 4.3. Parametre seti 12 numune görseli



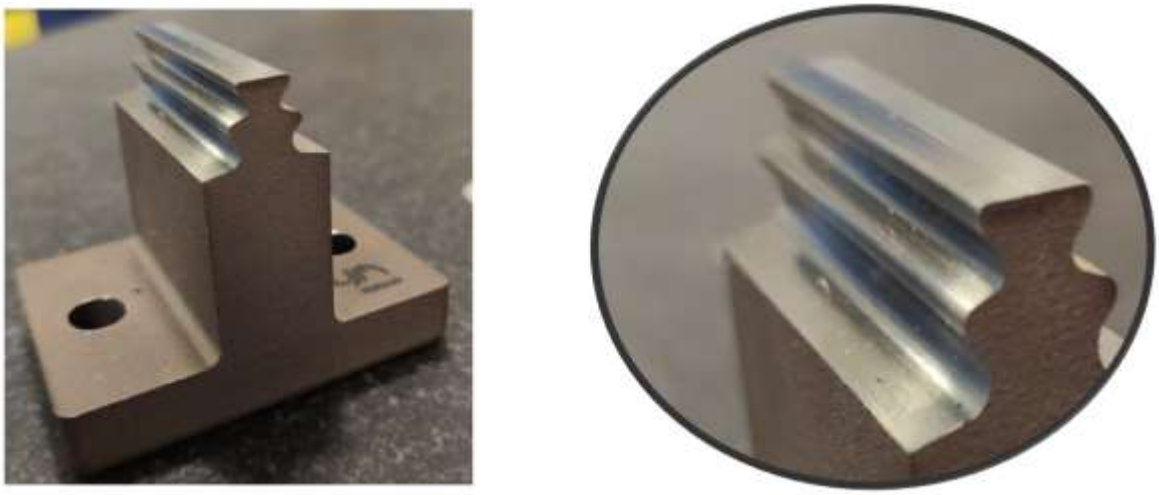
Resim 4.4. Parametre seti 13 numune görseli



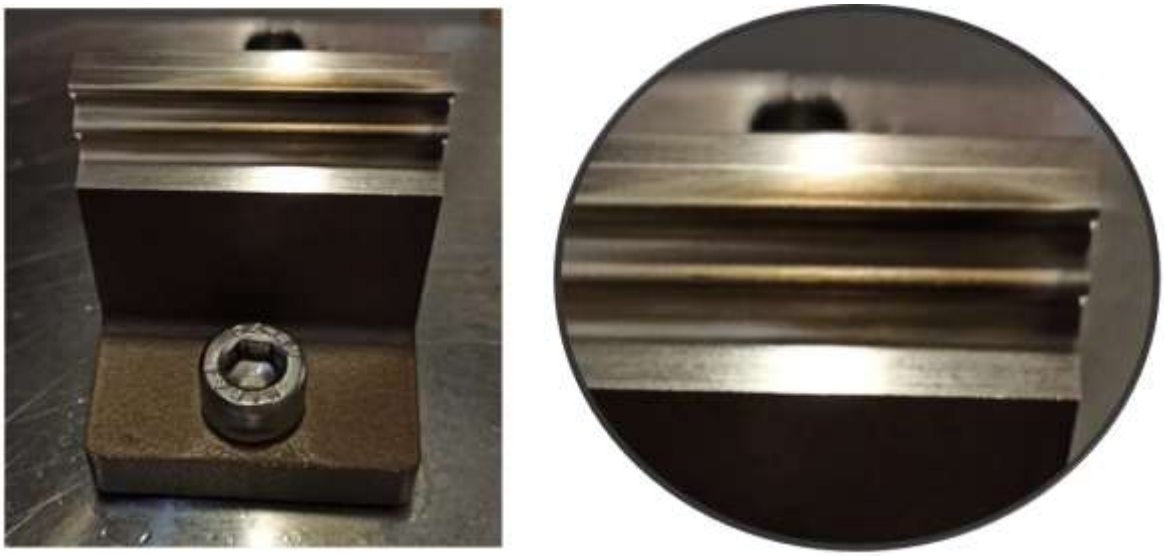
Resim 4.5. Parametre seti 14 numune görseli



Resim 4.6. Parametre seti 15 numune görseli



Resim 4.7. Parametre seti 16 numune görseli



Resim 4.8. Parametre seti 18 numune görseli

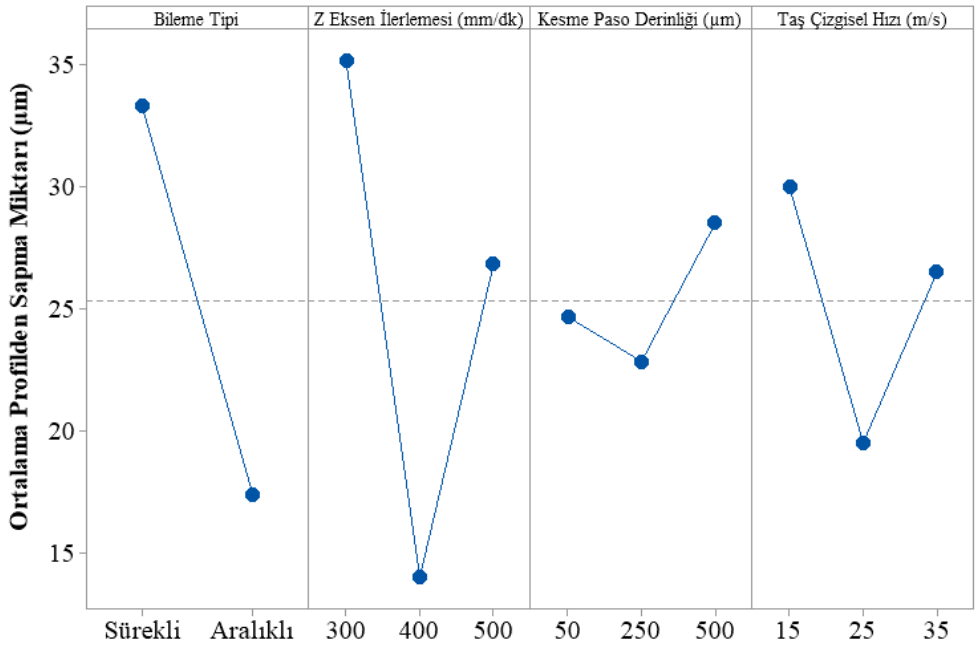
Resim 4.3. – 4.8.'de görüldüğü gibi taşın parçaya girmesinden ortalama 24.3 mm sonrasında yanma olayları gerçekleşmiştir. Yanma olayları Eş. 4.1. ile açıklanabilir, yüzeyde yanmanın meydana gelmesinin nedeni talaşla atılan ısının yetersiz kalması olarak yorumlanabilir. Ayrıca çalışmalar boyunca kullanılan Inconel 939 malzemenin ısıl iletkenliğinin oldukça düşük olmasının da yanıkların oluşumunda etkisi olduğu göz ardı edilemez.

Numunelerin ortak özelliği bileme olmadan taşlama işleminin yapılmış olmasıdır. Normal şartlarda, bileme ve taş sistemi, konvansiyonel taşlama gibi çalışmaktadır. Konvansiyonel taşlamada, taş yerine bileyici, bileyici yerine taş modellenirse sürünme ilerlemeli taşlama

prosesi için konvansiyonel taşlama ile benzerlik bulanabilir. Bu durumda, Eş. 2.3.'e bileme ve taş arasında meydana gelecek olan ısı transferi de eklenecektir. Ayrıca toplam ısıdan, taştan ayrılan bilenmiş ve uzaklaştırılmış taş parçaları da eksi bir faktör olarak etkilenecektir. Bilemeli sistemlerde, bilemenin toplam sisteme ısı olarak katkısı olsa da taştan uzaklaştırdığı körelmiş taşlar sayesinde toplam ısıyı düşürmektedir. Ayrıca, bilemenin olmadığı durumlarda, Resim 2.15.'de gösterildiği gibi çıkma açısı artmaktadır. Bunun nedeni körelmiş kesici uçların temas alanını arttırmasıdır. Artan temas alanı ile, ısı transferi daha yoğun gerçekleşeceğinden kritik sıcaklığa ulaşmak daha kolay olmaktadır. Bu nedenle yanma olayları gözlemlenmiştir.

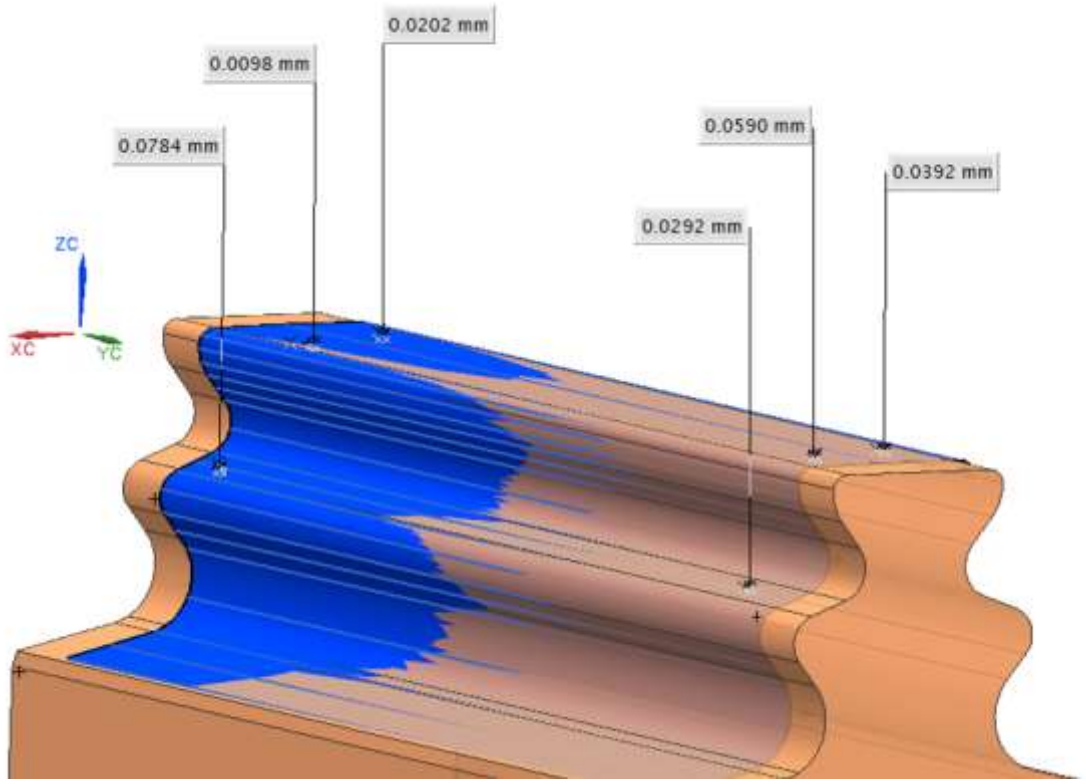
4.2. Profilden Sapma ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Deney seti 1 için yapılan denemeler sonucunda Şekil 4.1.'deki gibi profilden sapmalar görülmüştür. Profilden sapma sonuçları Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Sapma oranları hem radyus hem de düz alanlarda benzerlik göstermiştir. Bu nedenle radyus ve düz alanların ortalama değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Deney seti 1 profilden sapma miktarları

CMM lazer taraması sonuçlarında lazer taramanın doğası gereği getirdiği tolerans farklılıklarından dolayı oluşan gürültüler normalize edilerek Resim 4.9.'daki gibi tersine modelleme yapılarak profilden sapmalar incelenmiştir.



Resim 4.9. CMM ölçümlerinin normalleştirilmesi

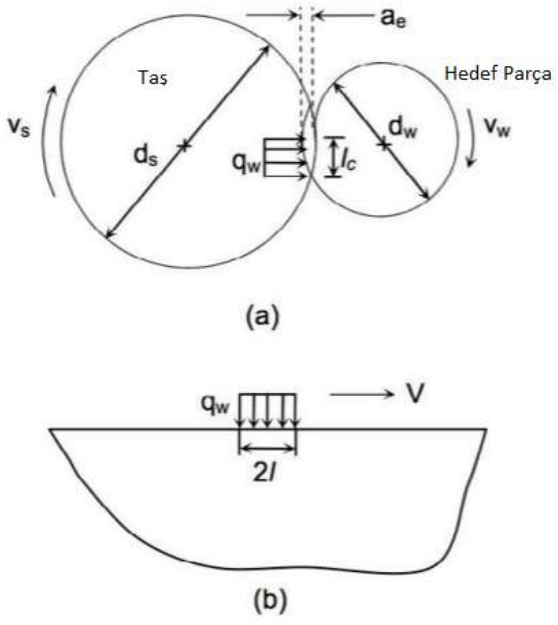
Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi taguchi metodu ile parametrelerin profilden sapmaya etkileri belirlenmiştir. Görüldüğü üzere bileme tipi profilden sapma için oldukça etkili görünmektedir. Aralıklı bileme yapılan sistemlerde profilden sapma yaklaşık 15 mikrona kadar düşmüştür. Öte yandan z eksen ilerlemesi, kesme paso derinliği ve taş çizgisel hızı için bilme tipi genel trendden bahsedilemez. Bunun nedenleri parametreler için ayrı ayrı tartışılmıştır, yapılan incelemeler ve çalışmalar sonucunda görsel muayenede görülen yanma bölgelerinden olabileceği karar verilmiştir ve çalışmalar proses esnasında meydana gelen sıcaklıkların yorumlanması ile devam etmiştir.

Talaş kaldırma sistemlerinde hem termal etkiler hem de termo-mekaniksel etkiler parça yüzeyinde sıcaklığın artışına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar ile sıcaklığın parça geometrisinde profil bozulmalarına, yüzey pürüzlülüğüne, kalıntı gerilme oluşumuna vb. şeklinde etkisi olduğu görülmüştür. Silindirik taşlama sistemleri için Resim 4.10.'de

görüldüğü gibi önemli parametrelerden birisi taşın ilerleme hızıdır. Bu çalışmada taş ilerleme hızı, tezgah konfigürasyonu nedeni ile z eksen ilerleme hızıdır.

Çizelge 4.1. Deney seti 1 profilden sapma ve yüzey pürüzlülük sonuçları

Numune No	Profilden Sapma Miktarı (μm)	Giriş Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Çıkış Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
1	43	0,855	0,955
2	47	0,929	0,686
3	23	0,901	0,821
4	10	0,586	0,716
5	20	0,665	0,516
6	25	0,861	0,91
7	21	0,696	0,675
8	27	0,845	0,868
9	84	0,93	0,907
10	66	0,363	0,633
11	25	0,944	0,738
12	7	0,73	0,901
13	3	0,871	0,885
14	13	0,349	0,335
15	13	0,371	0,718
16	5	0,41	0,718
17	5	0,744	0,682
18	19	0,939	0,918



Resim 4.10. Konvansiyonel taşlama benzetmesi

$$\theta_m = \frac{1{,}595 q_w \alpha^{1/2} l^{1/2}}{k V^{1/2}} \quad (4.2.)\ [26]$$

Konvansiyonel taşlama sistemlerinde kritik yanma için sıcaklık hesaplaması yapılırken Eş. 4.2.'de gösterilen maksimum sıcaklık eşitliğinden faydalanılır. Maksimum sıcaklık Eş. 4.2.'de görüldüğü üzere Z ekseni ilerleme hızı, bir bölen olarak bulunmaktadır. Bir başka deyiş ile, Z eksen ilerleme hızı arttıkça, maksimum sıcaklık değeri düşmektedir. Ayrıca ilerleme hızı arttıkça, taşın malzeme ile temas süresi işleme süresi boyunca azalmaktadır, bu nedenle parçaya aktarılan ısı miktarı düşmektedir ve maksimum sıcaklıkta azalmaktadır. Taşın temas süresinin azalması ile beraber, sürtünmeden kaynaklı meydana gelecek olan ısı azalacağı içinde maksimum sıcaklıkta düşüş olacaktır. Maksimum sıcaklığın düşmesi ile, parça yüzey ve alt yüzünde bozulmalar azalacağı için profilde sapmalarda azalacaktır. Bu nedenle Taguchi metodu sonucu görülen 300 mm/dk'dan 400 mm/dk'ya artan z eksen ilerlemesi ile beraber profilden sapma değerleri de düşmektedir. Düşük ilerleme değerlerinde maksimum sıcaklık değerinde artış olduğu için parça yüzeyinde yanmalar meydana gelmektedir. Bu da profilden bozulma miktarını arttırmaktadır. Ancak sıcaklık hesapları için sadece Eş. 4.2.'de gösterilen formülasyon yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, parça üzerine aktarılan sıcaklığında hesaplanması gereklidir.

$$q_w = \frac{\varepsilon u v_w a_e b}{l_c b} = \frac{\varepsilon P}{l_c b} \quad (4.3.)\ [26]$$

Eş. 4.3.'de gösterilen parça üzerine aktarılan total ısı girdisinin doğrudan ilerleme miktarına bağlı olduğu görülmektedir. Eş. 4.3.'den görüldüğü üzere, ilerlemedeki artış parça üzerine aktarılan ısı miktarını da arttırmaktadır. Yani her ne kadar Eş. 4.2.'de anlatıldığı gibi ilerlemenin artması ile total ısı girdisi düşse de aynı zamanda sıcaklık miktarını arttırmaktadır. Bu nedenle 400 mm/dk'dan sonra 500 mm/dk'ya arttırmak tekrardan sıcaklığı attıran bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle profilden bozulmalar meydana gelmektedir.

Kesme paso derinliği parametresi ise, aynı ilerleme gibi değişken bir özellik göstermektedir. Bunun nedeni ise aynı ilerleme gibi, artan sıcaklık ile bağlantılıdır. Eş. 4.3.'de gösterildiği gibi artsa paso miktarı ile, parça üzerine aktarılan ısı girdisi düşmektedir. Bu nedenle bozulma miktarı çok daha aza indirilmektedir. Bu nedenle 50 mikrondan 250 mikrona

çıkartılma ile ısı girdisi azaldığı için, profilden sapma miktarı oldukça azaldığı görülmektedir. Ancak Eş. 4.2. incelendiğinde, artan paso miktarının temas uzunluğunu arttırması ile, maksimum sıcaklık miktarının da arttığı görülmektedir. Bu nedenle 250 mikrondan 500 mikrona çıkan paso değeri ile profilde bozulmalar tekrardan artmaktadır. Ayrıca sıcaklıktan bağımsız olarak, artan paso miktarı ile taşın aşınma hızı da artmaktadır. Artan taşın aşınma hızı, taş üzerindeki profilde bozulmalar meydana getirmiştir. Dolayısı ile, taş profilindeki bozulmalar direkt olarak geometriye yansımıştır. Bunun olumsuz etkisinin giderilmesi için bileme miktarı değiştirilebilir, artan taş hızı ile beraber, artan bileme miktarı toplam yükü arttıracağı için bileyici ömrünü negatif olarak etkilemektedir. Bu nedenle bu çalışmada bileme miktarı 0.0005 mm olarak sabit tutulmuştur.

Taş çizgisel hızının profilden sapmaya olan etkisi diğer iki parametre gibi belirli aralıklarda farklı sonuçlar sergilemektedir. Bunun nedeni ise sıcaklık hesaplamalarında etkili olan ve Eş. 4.4.'de gösterilen termal numara hesaplamasıdır.

$$\theta_m = \frac{\beta \varepsilon q}{(k\rho c)^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{l_c}{v_w}\right)^{1/2}$$

$$\beta = \begin{cases} 1{,}02L^{0{,}03} & 0{,}1 \leq L \leq 5 \\ 1{,}06 & L > 5 \end{cases} \quad Kararlı\ Durum$$

$$\beta = \begin{cases} 1{,}02L^{0{,}03} + 0{,}23L^{-0{,}37} & 0{,}1 \leq L \leq 5 \\ 1{,}06 + 0{,}23L^{-0{,}37} & L > 5 \end{cases} \quad Geçiş\ Durumu \qquad (4.4.)\ [26]$$

Sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde çok yüksek basınçlı soğutucu sıvının uygulanması ve taşın konvansiyonel taşlara göre çok daha fazla gözeneklere sahip olmasından dolayı maksimum sıcaklık hesaplamalarında Eş. 4.4.'de gösterilen formülasyonu kullanılmaktadır. Eş. 4.2. ve 4.3.'de gösterilen denklemler sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde konvansiyonel taşlama kabulü yapılarak kullanılmaktadır. Eş. 4.4.'de gösterilen β bir katsayı olarak denklemlere eklenmektedir ve L ile gösterilen termal sayısına bağlıdır. Termal sayısı Eş. 4.5.'de gösterilmektedir.

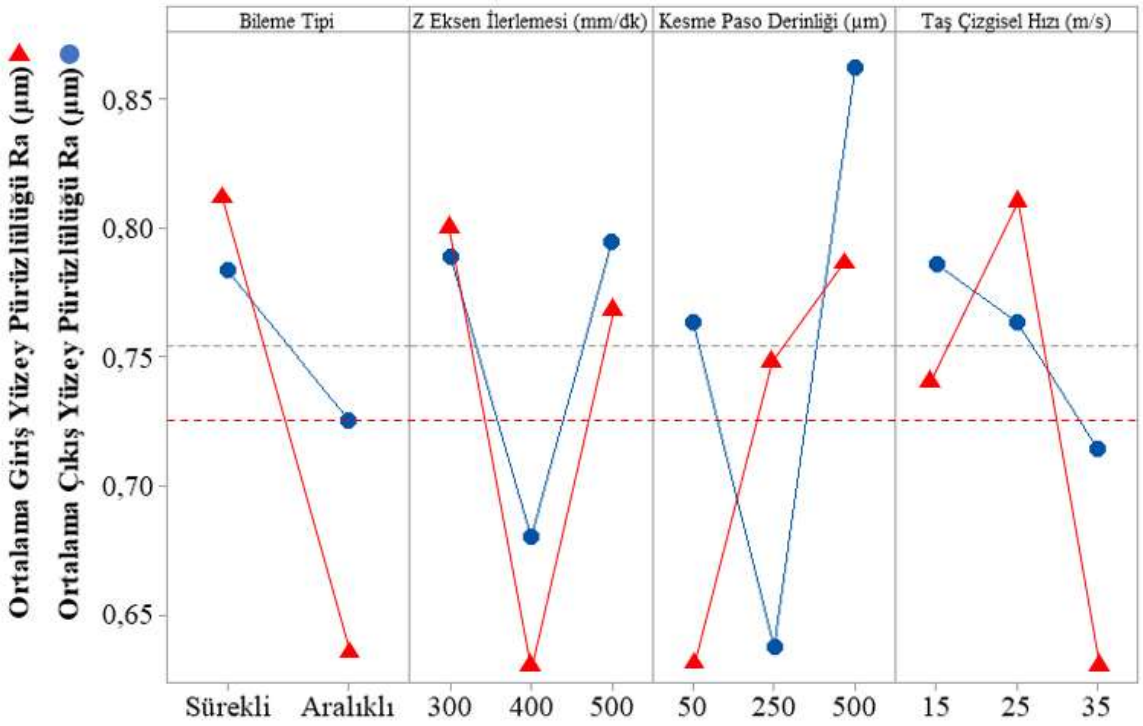
$$L_C = \frac{v_s l_c}{2\alpha} \qquad (4.5.)\ [26]$$

Eş. 4.5.'den görüldüğü üzere, taşın dönme hızı arttıkça termal sayısı artmaktadır. Isı akışı geçişli olarak kabul edilirse, taş hızı arttığı için β miktarı, L 5'den küçük olması durumunda düşecektir. Bir başka deyiş ile, Eş. 4.4.'den görüldüğü üzere maksimum sıcaklıkta düşme gerçekleşecektir. Taş hızının 15 m/s'den 25 m/s'e çıkması ile profilden sapma miktarının azalmasının nedeni bu şekilde sıcaklığın düşüşü ile açıklanabilir. 25 m/s'den 35 m/s'e arttırılması ile tam tersi bir durum gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise, artan taş hızı ile, taş ve bileyici arasındaki ısı akışının etkilenmesidir. Artan taş hızı ile, bileyici ve taş arasında çok daha yüksek bir ısı girdisi elde edilir. Bu nedenle bu etki total sisteme yansımaktadır. Bu nedenle profilde bozulma olabilmektedir.

Taşın parçaya girdiği ve çıktığı kısımlarda sıcaklık hesaplamalarında aynı eşitlikler kullanılsa da literatürde sıklıkla ortaya çıkmıştır ki yanma genellikle kesim yolunun ortasında veya taşın parçadan ayrıldığı noktada meydana gelmektedir [32-85]. Oluşan yanma olayı alt yüzeylerde faz dönüşümüne sebep olduğu için üst yüzeyleri de etkilemektedir. Özelikle artan sıcaklıkla beraber yeniden katılaşma yüzeyinin oluşmasından dolayı, yüzey direkt olarak etkilenmektedir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü parçanın hem giriş hem de çıkış noktalarından ölçülmüştür. Ölçümlerde tarama aralığı 8 mm olarak ayarlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Çizelge 4.1.'de gösterildiği gibi tamamlanmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü için, hem düz hem de tepe yüzeylerde benzer trendler görülmüştür. Bu nedenle oturma yüzeylerinden örnekler alınarak grafikler oluşturulmuştur.

Şekil 4.2.'den görüldüğü üzere, boyutsal sapmada olduğu gibi parametreler her zaman genel bir trend sergilememektedir. Z eksen ilerlemesi hem giriş hem de çıkış bölgelerinde profil sapmasındaki gibi 300 mm/dk'dan 400 mm/dk'ya azalarak 400 mm/dk'dan 500 mm/dk'ya artarak devam etmiştir. Bunun nedeni profil sapmasında anlatılan sıcaklık değişimleridir. Resim 4.1., 4.7. ve 4.8.'de gösterildiği gibi 500 mm/s ile yapılan denemelerde yanıklar meydana gelmiştir. Buda bu durumun ikincil bir kanıtıdır. Ancak yanıklar yüzeylerde sadece



Şekil 4.2. Deney seti 1 giriş ve çıkış bölgesi yüzey pürüzlülüğü

kozmetik yanıklar olabilir. Bu nedenle yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçümleri sonrasında kesin yargılara varılabilir. Z eksen ilerlemesinin 400 mm/dk'dan 500 mm/dk'ya kadar arttırıldığında yüzey kalitesinin bozulmasının bir başka nedeni ise, ilerlemenin aşırı fazla oluşundan dolayı, tıkanan taşın tekrar bilenmesine fırsat verilmeden yeni yüzeyin kesilişidir.

Kesme paso derinliğinde ise giriş bölgesinde artan paso miktarı ile lineer bir artış ile yüzey pürüzlülüğünü de arttırmaktadır. Bunun nedeni sıcaklık oluşumları dışında, artan paso miktarı ile sürünmenin ve taştaki aşınmanın artması ile profilin bozulmasıdır. Deney setlerinde sabit bileme miktarı kullanıldığı için bu durum incelenememiştir. Çıkış bölgesi gözlemlendiğinde, artan paso miktarı ile başta yüzey kalitesinde iyileşme yaşansa da sonrasında ciddi anlamda artma meydana gelmiştir. Bunun nedeni, literatürde araştırıldığı gibi çıkış bölgelerinde yanma olayının gerçekleşmesidir. Numunelere yapılan görsel muayenelerde çıkış bölgesinde genellikle yanma gözlemlenmiştir. Bunun nedeni taşın parçadan ayrıldığı sırada anlık olarak, parçanın temas alanının ani bir şekilde sıfıra yaklaşmasıdır. Bu nedenle Eş. 4.5.'de gösterilen termal numaranın aniden aşırı büyümesi sonucunda yanma gerçekleşmektedir. Yapılan yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçümlerinde ise, çıkış bölgesinde ciddi anlamda yeniden katılaşan bölge oluşumunun artması da göz önünde bulundurulunca, yüzey pürüzlülüğün bu denli bozulması beklenen bir durumdur.

Temas alanının aniden değişmesi ise artan paso miktarı ile artan temas alanının birden düşmesi ile olmaktadır.

Taş çizgisel hızının etkisi giriş ve çıkış bölgelerinden farklıdır. 15 m/s'den 25 m/s'e çıkan taş hızında, giriş bölgesinde yüzey pürüzlülüğü artmaktadır bunun nedeni termal sayısı olarak açıklanabilir, öte yandan çıkış bölgesinde ise aynı değer artışında, yüzey kalitesinin düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni girişte henüz daha yeni bilenen taşın formunun oturmamış olması ve yüzeye istenen kaliteyi verememesidir. Ancak çıkışa doğru formu oturan taş sayesinde yüzey kalitesi daha iyi sağlanmıştır. 25 m/s'den 35 m/s'e artan taş hızı ile düşen yüzey pürüzlülüğü bu şekilde açılanabilir.

Hem profilden sapma miktarları hem de yüzey pürüzlülükleri için ortak eğilim gösteren tek parametre bileme tipidir. Sürekli bilemeli sistemlerde, aralıklı bilemeli sistemlere göre profil ve yüzey kalitesi çok daha kötü çıkmaktadır. Sürekli bilemeli sistem taşın giriş ve çıkışı arasındaki profil farklılığı 84 mikrona, yüzey pürüzlülükleri ise giriş ve çıkışta 0.929 µm Ra ve 0.910 µm Ra gibi değerlere neden olmuştur. Aralıklı bilemeli sistemin sürekli bilemeli sisteme göre daha iyi performans göstermesinin 3 farklı nedeni vardır. Bunların ilki temel olarak sıcaklık oluşumudur. Total sıcaklık oluşumunu aralıklı bilemeli sistemlerde, soğutucu sıvı ve talaş ile uzaklaştırılan, taş ile ayrılan ve parçada kalan sıcaklık şeklinde ayırabilir. Ancak sürekli bilemeli sistemlerde devamlı taş ve bileyici temas halinde olduğundan dolayı, taşlama esnasında hem parça ve taş arasında sürünme ilerlemeli taşlama hem de bileyici ile taş arasında konvansiyonel silindirik taşlama meydana gelmektedir. Bu nedenle total sıcaklığa bileyici faktörü de etkilenmektedir. Bu nedenle sıcaklık çok daha fazla artmaktadır. Buda yüzeye profil bozukluğu, yüzey pürüzlülüğü vb. olarak yansımaktadır.

İkinci bir neden ise, bilemeli sistemlerde taşlama esnasında temas yüzeyi oluşturulan tek alan taş ve parça yerine, taş, parça ve bileyicidir. Çalışmalar esnasında bileyicili sistemlerin denemelerinde pek çok kısımda farklı frekanslarda sesi ayırt edilebilecek tırlamalar meydana gelmiştir. Tırlama sonucu profile ve yüzey pürüzlülüğü meydana gelmiştir. Sesle kontrol sırasında, aralıklı bileme sisteminde tırlama meydana çok daha az gelmiştir. Bu konu için ses ile kontrol yetersizdir, ancak bu çalışmada tırlama incelenmemiştir. Tırlama proses parametrelerinin optimizasyonu için ayrıca çalışması gereken oldukça detaylı bir konudur.

Son olarak, sürekli bileme yapıldığında, taşın kendini bileyerek keskin kesici uçlar üretmesine izin verilmez. Bunun yerine bileyicinin bilemesinden dolayı formun oturmadığı kesici uçlar elde edilir. Sürekli bileme sayesinde tek seferde çok daha fazla pasoya girilmeye olanak sağlasa bile, taşın kendini bilemesine müsaade edilemediği için, yüzeye olumsuz sonuçlar yansımaktadır.

Sürekli bilemeli sistemler her ne kadar aralıklı bileme sistemlerine göre daha kötü özellikler sergilese bile, sürünme ilerlemeli taşlama sistemini özel kılan bir özellik olduğu için sürekli bileme sisteminin iyice anlaşılması gereklidir. Deney seti 1'de taşın ve bileyicinin birbirine göre dönme oranları 0,7 olarak sabit tutulmuştur. Bunun nedeni bileyici ömrünü korumaktır. Bileyici sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerindeki en temel takımdır. Yapılan denemeler ve tezgah ile elde edilen tecrübeler sonucunda 0,7 oranının bileyici ömrü için en iyisi olduğu kanaatine varılmıştır. Bilemenin sürekli olduğu sistemler, konvansiyonel silindir taşlama sistemleri gibi çalışmaktadır. Aralarında tek bir fark bulunmaktadır, bu proseste, taş parça konumunda, bileyici ise taş konumunda çalışmaktadır. Deney seti 2'de farklı bileme oranları kullanılarak, Çizelge 4.2.'de gösterilen profilden sapma sonuçları elde edilmiştir.

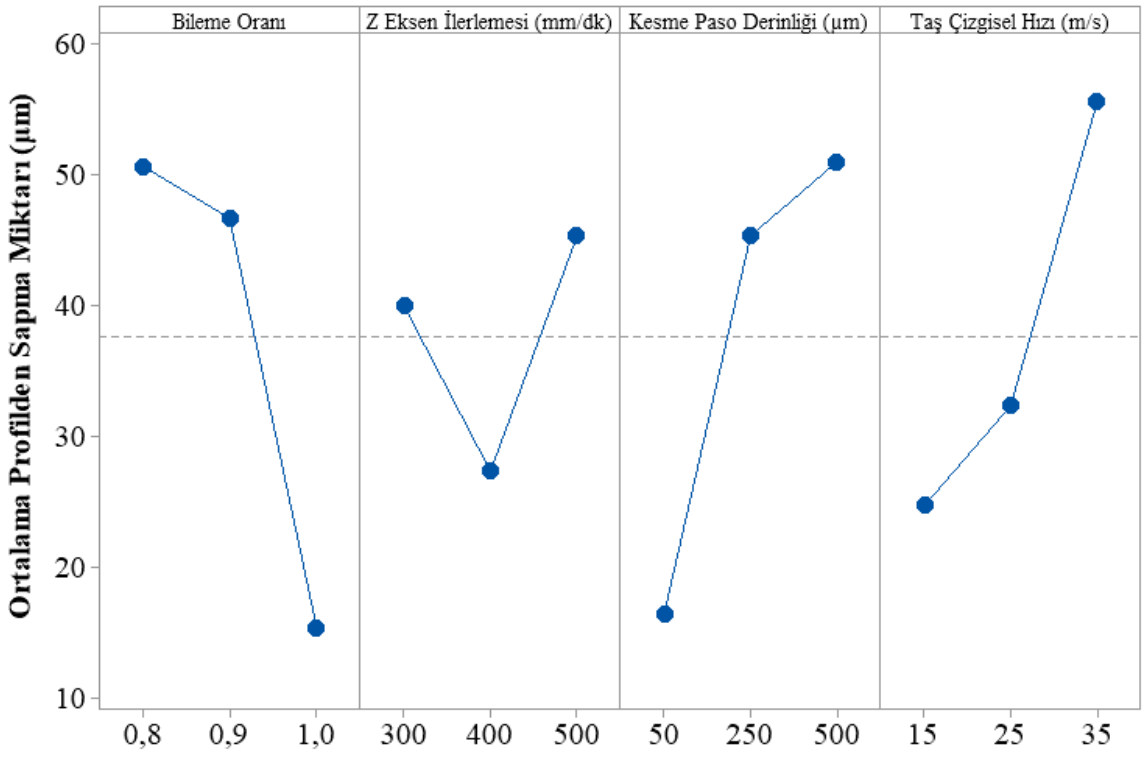
Sonuçlara göre hazırlanan taguchi metodu göre parametrelerin ve bileme oranlarının profilden sapma etkisi Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2.'de giriş ve çıkış bölgelerindeki yüzey pürüzlüklerinin sonuçları verilmiştir. Çizelge sayesinde 2.deney seti içinde deney seti 1'de yapılan araştırmalar yapılmıştır.

Seçilen bileme oranları için her ne kadar 0.7 bileyici ömrü için en iyisi olduğu söylenmiş olsa da tam kat sayı bileme miktarının bileyici ve taşın aynı frekansta dönmesini sağlayacağı için, titreşimin önüne geçileceği düşünerek 0.8 0.9 ve 1.0 değerleri üzerine çalışılmıştır.

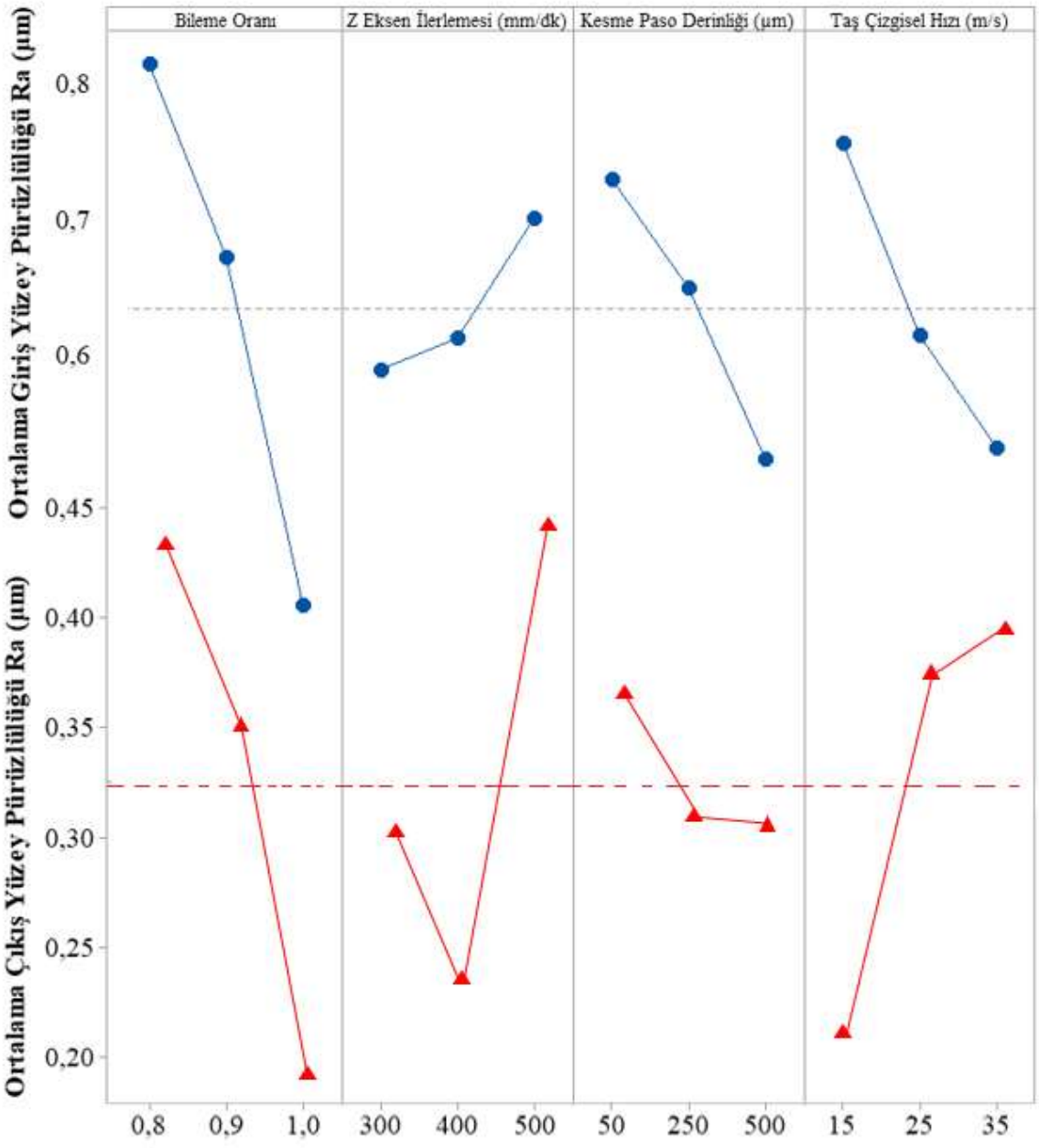
Çizelge 4.2. Deney Seti 2 profilden sapma ve yüzey pürüzlülük sonuçları

Numune No	Profilden Sapma Miktarı (µm)	Giriş Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	Çıkış Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
1	19	0,988	0,33
2	43	0,788	0,373
3	90	0,668	0,595
4	75	0,54	0,376
5	37	0,662	0,122
6	28	0,815	0,554
7	26	0,24	0,192
8	2	0,387	0,211
9	18	0,62	0,174



Şekil 4.3. Deney seti 2 profilden sapma

Şekil 4.4. giriş ve çıkış bölgelerindeki yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine göre hazırlanan taguchi metodu sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.4. Deney seti 2 giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüğü

Deney seti 2'de bileme oranları değiştiği için öncelikli olarak tezgahta parça işlemesi sırasında, tırlama sesleri kontrol edilmiştir. Profil sapmalarından ve yüzey pürüzlüklerinden görüldüğü gibi, tırlama miktarı tam sayıda oldukça düşmektedir.

Ayrıca bileme miktarının artması ile Eş. 4.5.'de gösterilen termal numarası artmaktadır. Bu nedenle parça üzerindeki sıcaklıkta artmaktadır. Ancak artan sıcaklık ile yüzey pürüzlülüğü azalmaya devam etmiştir.

Kesme paso derinliği artan bileme oranları ile beraber, deney seti 1'in aksine, yüzey pürüzlülüğünde iyileşmeye neden olmuştur. Bunun nedeni parçadan ayrılan talaş yoğunluğunun artması sonucunda, bileyicinin yeterli yaklaşmayı sağlayamaması ve kopan talaşların taş üzerinden uzaklaştırılamamasıdır. Bu durum freze ve torna takımlarında yığıntı talaş olarak ortaya çıkmaktadır. Yığıntı talaş olumu nedeni ile, yüzey pürüzlülüğü artan paso ile daha iyi bir hale gelmektedir. Çıkış bölgesinde 400 mm Z eksen ilerlemesi ile yapılan kesimde yığıntı talaşın kararlı bir halde oluşundan dolayı yüzey daha iyi olduğunu, ancak giriş bölgesinde yığıntı talaşın kararlı bir yapıda olmaması sonucu yüzey bozulmuştur. Çalışmalarda bu durumun anlatıldığı gibi yığıntı talaş olmasını düşündüren neden, denemelerde tezgahın çekmiş olduğu akımdır. 500 mm ile yapılan denemelerde çıkış bölgesinde ciddi bir vuruntu sesi ile birlikte tezgahın çektiği akımın anlık olarak ciddi bir şekilde yükseldiği görülmüştür. Ancak yığıntı talaşın oluşumunu incelemek için, taşın tahribatlı olarak incelenmesi gereklidir. Kullanılan taşların spesifikasyonları ve tedarik süreçlerinin uzunluğu nedeni ile bu tez çalışmasında bu çalışma yapılmamıştır. Ancak artan Z eksen ilerlemesi ile girişte düzenli olarak yüzey kalitesinin bozulmasına, çıkış tarafında ise yığıntı talaş kararlı halden uzaklaşmasından dolayı taş ve parça arasından ayrılmışı ile özetlenebilir.

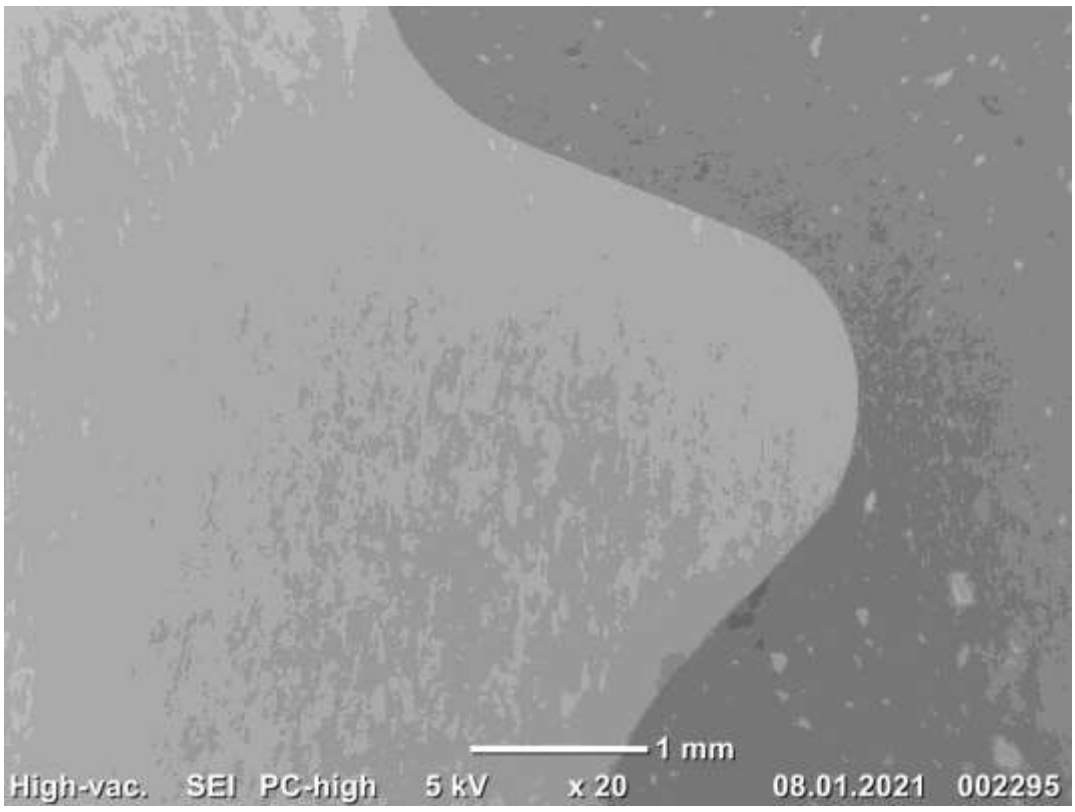
4.3. Yeniden Katılaşan Bölge ve Isıdan Etkilenen Bölge Ölçümleri

Profil ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılan numuneler Resim 4.11'de gösterildiği gibi tel erozyon tezgahı metodu ile parçalara ayrılmıştır. Numuneler için giriş, çıkış ve taşın ara kesim bölgeleri için 3'e bölünmüştür. Bölünen numuneler yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçümleri için bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler üzerinde ticari adı Kalling's No.2 ve Schantz olan dağlayıcılar ile dağlanmıştır. Bahsedilen dağlayıcılar genellikle nikel bazlı alaşımlarda mikro yapı incelemelerinde kullanılmaktadır. Numunelerin 6 adeti Schantz ile dağlanması sonucunda, Kalling's No.2'nin çok daha iyi görüntü verebileceğine karar verilmiştir.



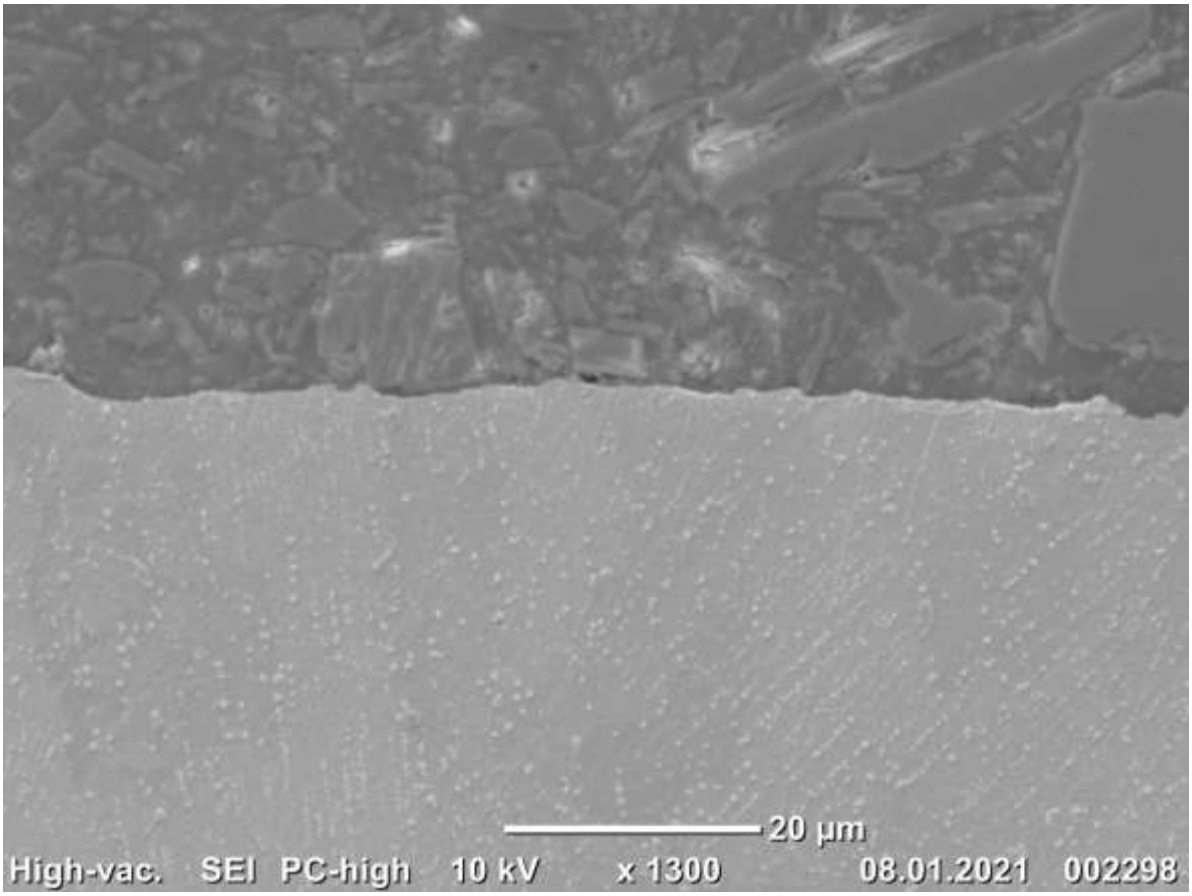
Resim 4.11. Bakalite alınacak numuneler

Detayları Çizelge 4.3.'de verilen Kalling's No.2 dağlayıcısı ile daldırma metodu ile numuneler dağlanmıştır. Dağlanan numuneler Resim 4.12'te gösterildiği gibi SEM ile incelenmiştir. Numunelerde radyus bölgeleri ve disk ile temasa geçecek olan düz bölgeler incelenmiştir.



Resim 4.12. Taşlama yapılmış numuneler için SEM görüntüsü

Dağlanan numunelerde yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölge için daldırma metodunda zaman optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda 24 saniyelik daldırma ile resim 4.13 ve 4.14'te görüldüğü gibi yeniden katılaşan bölgeler SEM ile net olarak belirlenmiştir.



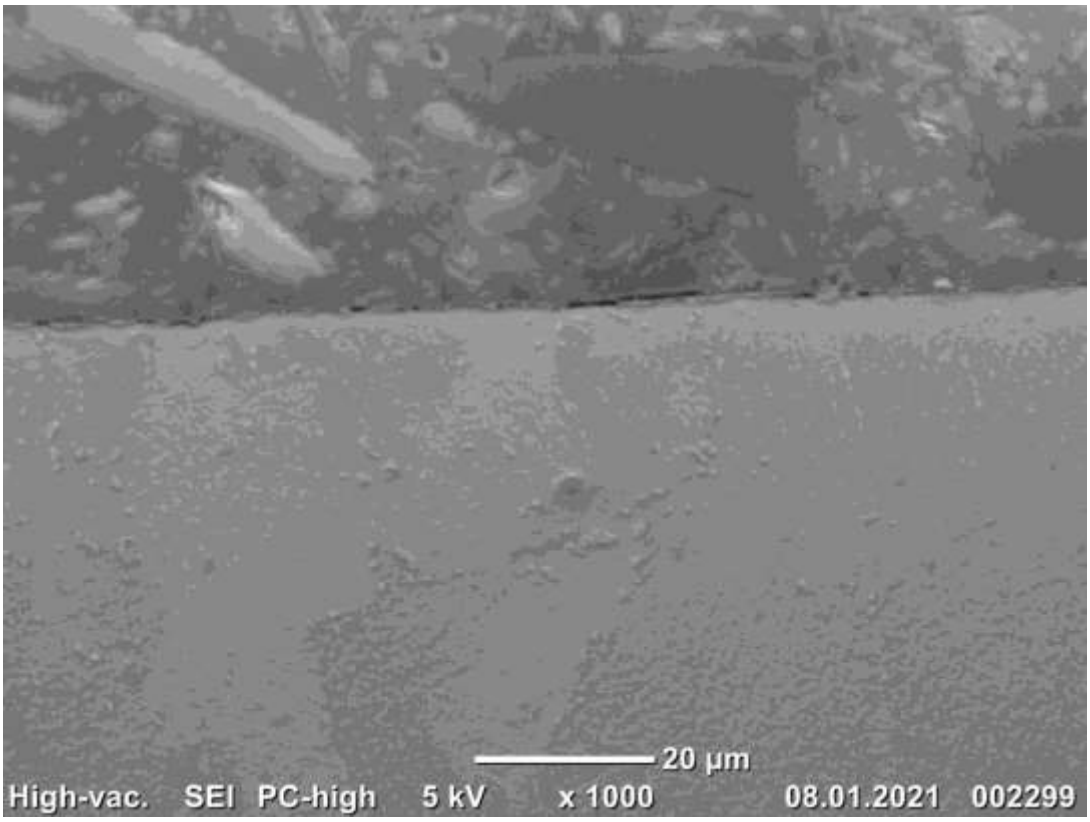
Resim 4.13. Yeniden katılaşan bölge için SEM görüntüsü

Literatürde yeniden katılaşan bölge ölçümlerinde SEM ve optik mikroskop kullanımı ile kontrast farkından faydalanılarak bölgelerin kalınlık ölçümleri yapılmaktadır. İncelemelerde beyaz film tabakası ile görüntülenen kısım yeniden katılaşan bölge olarak belirlenmiştir. Yeniden katılaşan bölgenin alt yüzeyinde, ana malzemeden daha açık bir renk ile ayırt edilen bölge ise ısıdan etkilenen bölge olarak tespit edilir.

Resim 4.13'de gösterilen dış radyus bölgesinde ince beyaz tabaka ile yeniden katılaşan bölge, alt yüzeyinde ana malzeme gözükmektedir. Literatürde yeniden katılaşan bölge ölçümleri genellikle devamlı benzer kalınlık ile devam eden bölgelerden yapılmaktadır.

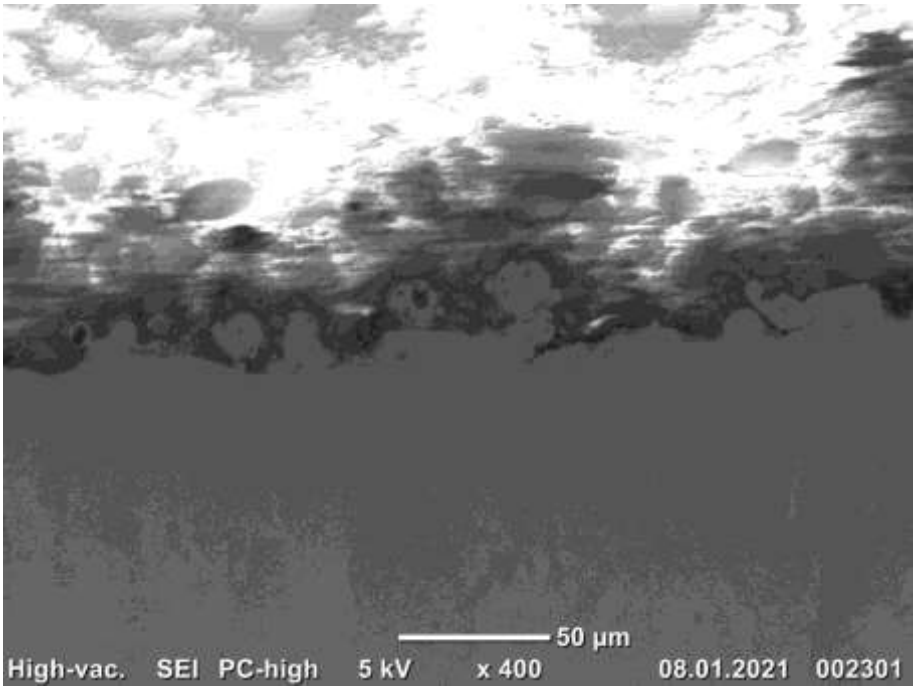
Resim 4.13’te ince beyaz tabakanın her bölgede aynı kalınlık ile ilerlemediği belli olmaktadır. Bu nedenle Resim 4.14’te gösterilen ve benzer kalınlık ile devam eden yeniden katılaşan bölgelerin incelenmesi tercih edilmiştir.

Resim 4.14’te numunelerin disk ile temasa geçen bölgelerinin incelemesi yapılmıştır. İnce beyaz tabaka olan kısım yeniden katılaşan bölgedir. Ayrıca, Resim 4.13’te ısıdan etkilenen bölge belli olmaz iken, Resim 4.14’te yeniden katılaşan bölge ve ana malzeme arasında açık gri renk ile gözüken bölgenin ısıdan etkilenen bölge olduğu belirlenmiştir.



Resim 4.14. Yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölge için SEM görüntüsü

Resim 4.14’te belirlenen devamlı benzer kalınlık ile ilerleyen yeniden katılaşan bölgeye Resim 4.14’te gösterildiği gibi odaklanarak inceleme yapılmıştır. SEM ile yapılan incelemeler sonucunda, bakalite alınan numunelerde parlatma esnasında sıvanmanın meydana geldiği bu nedenle, Resim 4.15’de gözüktüğü gibi sıvanma yapılmış gibi katılaştığı gözlenmiştir.

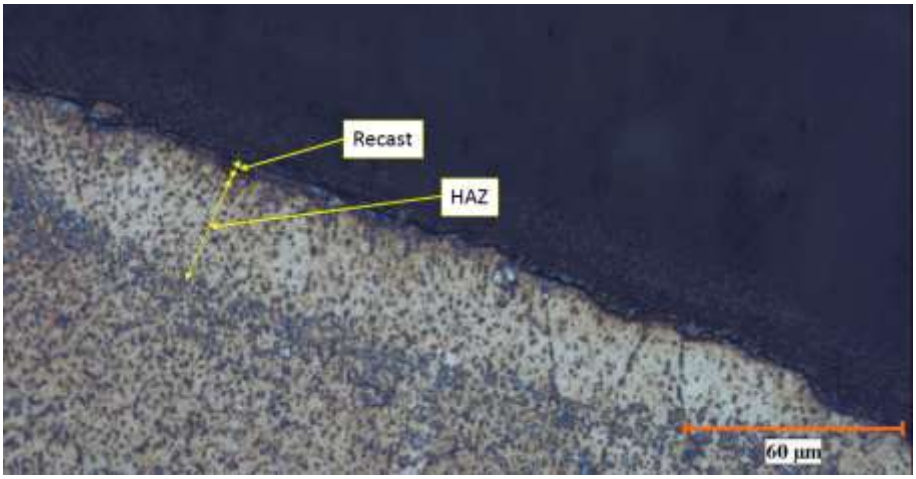


Resim 4.15. Yeniden katılaşan bölgenin parlatma sonrası sıvanma biçiminde gözlemlenmesi

SEM incelemeleri ile birlikte optik mikroskop altında ölçümlerde yapılmıştır. Resim 4.16'de yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölgelerin kalınlık ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Kalling's No.2 solüsyonunun kimyasal içeriği

Bileşen Adı	Miktarı
Bakır (II) Klorür	5 gram
Hidrolik Asit	100 ml
Etanol	100 ml



Resim 4.16. Dağlama sonrası örnek yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölge görüntüsü

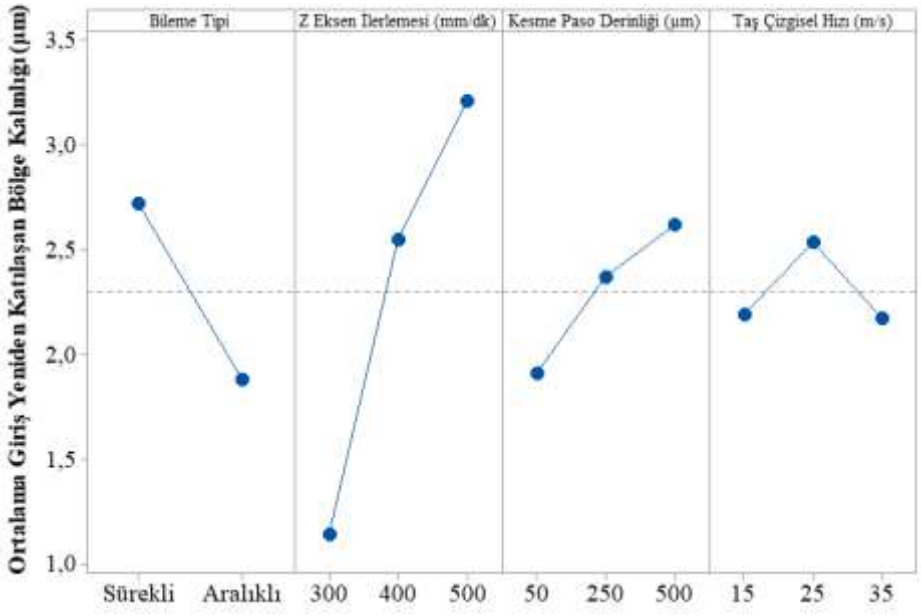
Çizelge 4.4. Deney seti 1 için yeniden katılaşan bölge ve HAZ ölçüm sonuçları

Numune No	Giriş Bölgesi Yeniden Katılaşan Bölge Kalınlığı (µm)	Giriş Bölgesi HAZ Kalınlığı (µm)	Çıkış Bölgesi Yeniden Katılaşan Bölge Kalınlığı (µm)	Çıkış Bölgesi HAZ Kalınlığı (µm)
1	1,48	13,4	3,1	25,66
2	2,39	4,14	3,63	26,53
3	0,55	4,83	8,23	32,81
4	3,3	3,72	4,95	5,6
5	3,51	23,8	7,57	45,42
6	5,05	35,45	18,35	57,2
7	2,3	27,23	6,46	55,31
8	2,7	27,43	7,75	55,9
9	3,15	4,96	33,1	89,13
10	0,69	9,3	1,67	29,86
11	1,15	58,64	2,76	49,46
12	0,55	28,66	5,56	52,56
13	1,036	36,8	1,15	37,6
14	1,4	33,85	5,43	43,94
15	0,98	37,8	6,72	50,94
16	2,62	25,14	2,77	76,26
17	3,06	15,3	3,2	25,08
18	5,4	21,3	5,7	60,08

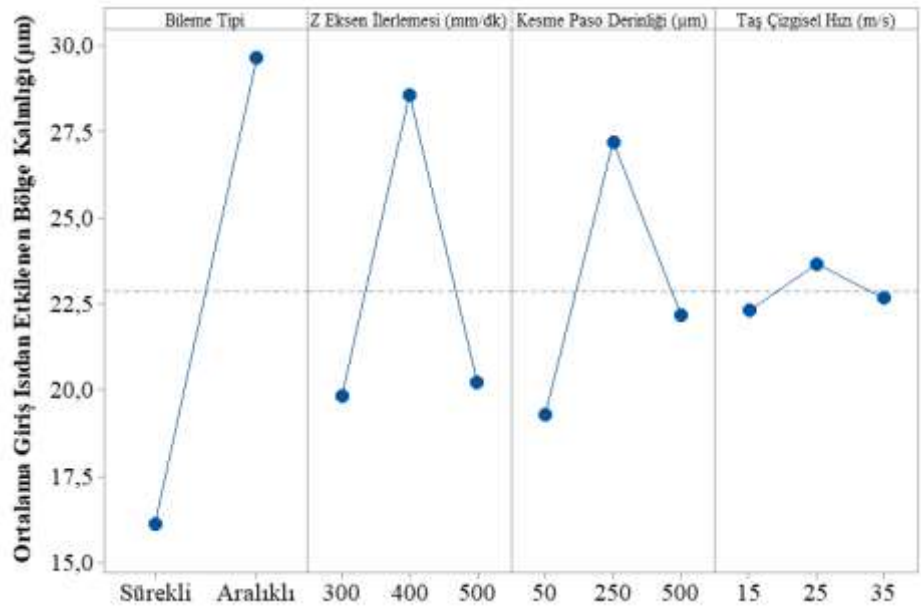
Dağlama sonrası yapılan ölçümler sonrasında, giriş bölgesinin, parça ortası ile beraber benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ancak çıkış bölgesinin hem giriş hem de parça ortasından çok daha farklı yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları içerdiği görülmüştür. Dağlama sonrası yapılan ölçümler sonrasında, giriş bölgesinin, parça ortası ile beraber benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ancak çıkış bölgesinin hem giriş hem de parça ortasından çok daha farklı yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları içerdiği görülmüştür. Bu nedenle ölçümlerin sonuçlarında giriş ve orta bölgelerin birlikte ortalamaları alınmış, çıkış bölgesi ise ayrıca değerlendirilmiştir. Çizelge 4.4.'de yapılan ölçümler ile giriş ve çıkış bölgelerinde meydana gelen yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları verilmiştir.

Yeniden katılaşma bölgesi ana malzeme üzerinden talaş kaldırılırken lokal olarak sıcaklığın ergime sıcaklığının üzerine çıkmasından dolayı meydana gelen yapıdır. Bu kısımda, ergime noktası üzerine çıkan malzeme ergiyerek tekrardan katılaşarak malzeme üzerine yerleşir. Yapı olarak ana malzemeden çok daha farklı bir yapıya sahiptir. Havacılık, otomotiv, nükleer sanayi vb. yerlerde yeniden katılaşan bölge kalınlığı oldukça düşük istenmektedir.

Özellikle hareketli parçalarda, bunun nedeni ana malzemede farklı özellik gösteren bu yapının ana malzemeye göre çok daha gevrek olmasıdır. Gevrek oluşundan dolayı, yorulma durumlarında ilk çatlağın meydana geldiği ve hızlıca ilerleyerek yorulma ömrünü tamamlanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle köknar ağacı gibi türbin kısmında en yüksek yüklemelere maruz kalan parçada yeniden katılaşan bölge minimum düzeyde istenmektedir.



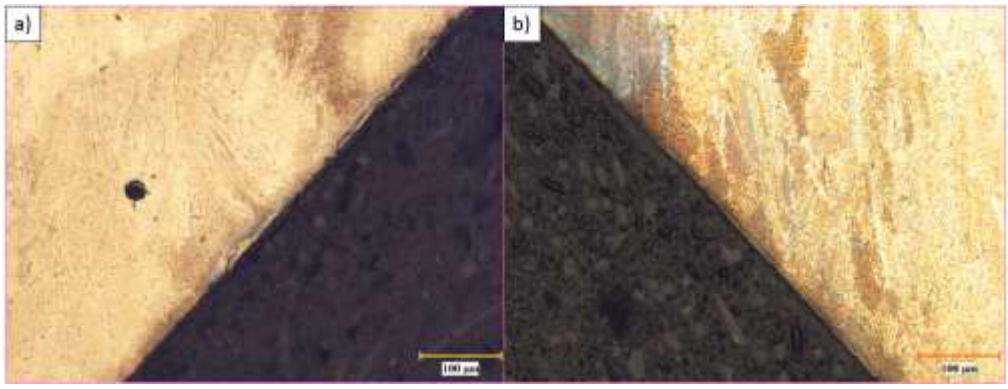
Şekil 4.5. Deney seti 1 giriş yeniden katılaşan bölge kalınlığı ölçümleri



Şekil 4.6. Deney seti 1 giriş HAZ kalınlığı ölçümleri

CFG prosesinde aşırı yüksek sıcaklıklara çıkıldığı için parametre çalışmalarının çok iyi bir şekilde yapılması gereklidir. Aşırı yüksek sıcaklıklara çıkılması ile sadece yeniden katılaşan bölge oluşmamaktadır. Ayrıca, bir kaynak ya da lazer ile işleme operasyonlarında olduğu gibi, ısıdan etkilenen bölgenin oluşmasına neden olmaktadır. Isıdan etkilenen bölgenin oluşması için parçanın ergime noktasına ulaşmadan, belirli bir süre boyunca yüksek sıcaklıklarda beklemesi ve sonrasında aniden soğuması ile meydana gelen kısımdır. Sonucunda tane yapıları irileşerek ya da incelerek değişime uğrar. Inconel gibi nikel esaslı malzemelerde ısıl iletkenlik düşük olduğu için ısıdan etkilenen bölgenin genişliği artmaktadır. Artan HAZ bölgesi malzemenin tane yapısını değiştirdiği için, dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle havacılıkta, yeniden katılaşan bölge için olduğu gibi HAZ içinde parça özelinde belirlenmiş sınırlandırmalar vardır. Sonuç olarak yeniden katılaşan bölge kalınlığı incelendiği gibi HAZ kalınlığında incelenmesi gereklidir.

Yeniden katılaşan bölge ve HAZ yapıları parça üzerinde devamlı aynı kalınlıkta gözükmez, genellikle ya sürekli devam eden yapılar halinde ya da bölgesel olarak görülen yapılar olarak meydana gelmektedir. Bu çalışmada Resim 4.17.'de gösterildiği gibi devamlı olan yeniden katılaşan bölge ve HAZ yapıları değerlendirilmiştir. Resim 4.17.a'da devamlı olmayan, 4.17.b'de devamlı yeniden katılaşan bölge oluşumu gösterilmiştir. Değerlendirmeler yapılırken, düz alanlardan alınan görüntüler değerlendirilmiştir. İç ve dış yarıçap bölgelerinde, diğer alanlara göre çok daha fazla yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınları görülmüştür. Bunun nedeni Resim 2.17.'de gösterildiği gibi taş ve parçanın konumlandırılmasından ve hedef geometrinin istenen profilinden dolayı radyus bölgelerinin parça işlemesinde diğer alanlara göre taş ile temas halinde olma durumunun daha uzun sürmesidir. Ayrıca Resim 4.18.'de görüldüğü gibi, iç radyus bölgelerine meydana gelen yeniden katılaşan bölge ve HAZ oluşumları bölgesel olarak meydana gelmiştir, yani sürekli devam eden bir görüntü yoktur. Bu nedenle düz bölgeler değerlendirilmiştir.



Resim 4.17. Örnek devamlı yeniden katılaşan bölge ve HAZ



Resim 4.18. Örnek yarıçap bölgelerindeki yeniden katılaşan ve ısıdan etkilenen bölge oluşumları

Şekil 4.5.'de giriş bölgesindeki yeniden katılaşan bölge oluşumuna etki eden parametreler ve Şekil 4.6.'da giriş bölgesindeki HAZ oluşumuna etki eden parametreler, Taguchi metodu ile incelenmiştir. Yeniden katılaşan bölge ölçümleri sonuçlarına göre, bileme tipi, Z eksen ilerlemesi ve kesme paso derinliği parametreleri sabit bir trend sergilemiştir. HAZ için aynı durum söylenemez.

Z eksen ilerleme parametresi, profilden sapma ve giriş bölgesindeki yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde 400 mm/dk'dan 500 mm/dk'a arttırıldığında ortaya çıkarttığı trendin aynısını yeniden katılaşan bölge kalınlığı içinde sergilemiştir. Bunun nedeni Eş. 4.3. üzerinden anlatılan parça üzerindeki toplam ısının ilerlemenin artması ile devamlı artmasıdır. Bu

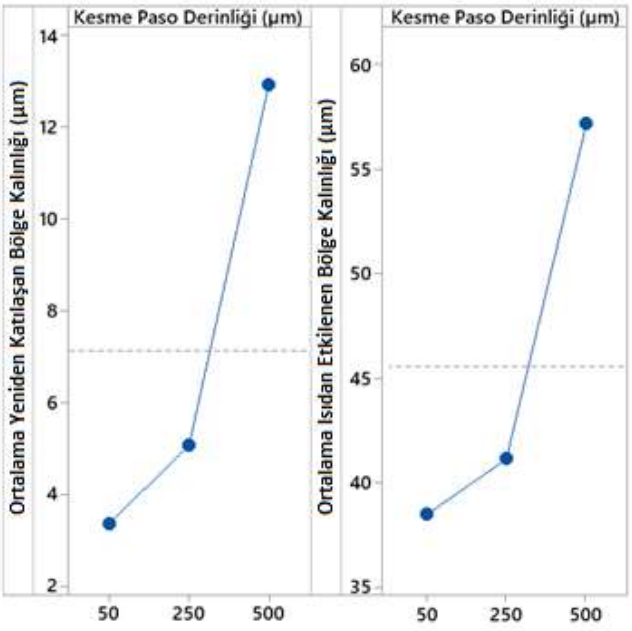
nedenle artan z eksen ilerlemesi ile yeniden katılaşan bölge kalınlığı da düzenli olarak artmıştır. Ancak, ısıdan etkilenen bölge için aynı durum söz konusu değildir. Benzer eğilim 300 mm/dk'dan 400 mm/dk'ya artan z eksen ilerlemesinde de için görülmüştür, ancak 400 mm/dk'da 500 mm/dk'ya artan Z eksen ilerlemesinde HAZ kalınlığının düşmesi bu analiz ile beklenmektedir. Bunun nedeni yeniden katılaşan bölge ve HAZ oluşumlarının belirli bir ısıya kadar doğru orantılı bir eğilim göstermesi ancak ergime noktasının üzerine geçilmesi ile, yeniden katılaşan bölge kalınlığının artması beklenen bir durumdur. Öte yandan, ergime noktasının üzerine geçilmesi ile, ana malzemenin ısıl iletkenliğinin düşük olmasından dolayı HAZ kalınlığının artmaması hatta düşmesi oldukça beklenen bir sonuçtur çünkü ergime noktası üzerine çıkıldıkça HAZ yerine yeniden katılaşan bölgenin kalınlığı artma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle artan Z eksen ilerlemesi belirli bir sıcaklığa ulaştırılmasından sonra, HAZ kalınlığında düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca, HAZ oluşumu için artan ani sıcaklığın, soğuma hızına bağlı olarak HAZ kalınlığı da değişmektedir. Artan ilerleme hızı ile, soğuma hızı da artmaktadır. Bu nedenle HAZ kalınlığı düşebilmektedir.

Kesme paso derinliği, yeniden katılaşan bölge kalınlığı için devamlı doğru orantılı bir trend sergilemiştir. Bunun nedeni Eş. 4.2. ile açıklandığı gibi artan paso miktarı ile parça üzerinde oluşacak olan sıcaklığın artmasıdır. Bu nedenle paso miktarı arttıkça yeniden katılaşan bölge değeri de artmaktadır. Ayrıca, profilden sapma kısmında anlatıldığı gibi artan paso ile taş ve parça temas bölgesindeki açıda artmaktadır. Dolayısı ile, ısı transferi ile aktarılan ısı miktarı da artmaktadır ve sıcaklıkta doğru orantılı olarak artarak yeniden katılaşan bölge miktarını arttırmaktadır. Dahası, düşük paso miktarları ile yeniden katılaşan bölge değerinin az çıkmasının sıcaklığın düşük olmasından başka, her küçük pasoda, ergiyen ve yeniden katılaşan bölgenin uzaklaştırılması da örnek verilebilir. Öte yandan HAZ kalınlığı için 50 mikrondan 250 mikrona çıkan paso değeri ile artmasına rağmen, 250 mikrondan 500 mikrona çıkan paso değerini HAZ kalınlığını düşürdüğü görülmüştür. Artış, yeniden katılaşan bölge açıklamasında olduğu gibi artan sıcaklıktan dolayı kaynaklanmaktadır. 500 mikrondaki durum ise, Z eksen ilerlemesi ile benzerlik göstermektedir, artan yeniden katılaşan bölge kalınlığı ile HAZ kalınlığında düşüş meydana gelmiştir. Son olarak, işlenen malzemenin ısıl iletkenliğinin düşük olduğu düşünüldüğünde, 500 mikron gibi ciddi bir paso miktarında, ısının iletimi HAZ kalınlığını arttırmak için yeterli olmamıştır.

Taş çizgisel hızı hem yeniden katılaşan bölge hem de HAZ kalınlığı için benzer bir durum sergilemiştir. Bunun nedeni profilden sapma ve yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi, taş hızının direkt olarak termal sayıyı etkilemesidir. Bu nedenle değişken bir etki göstermektedir. Ancak diğer parametreler ile kıyaslandığında, taş hızının 15 m/s ile 35 m/s olması arasında ciddi bir farklılık meydana gelmemiştir.

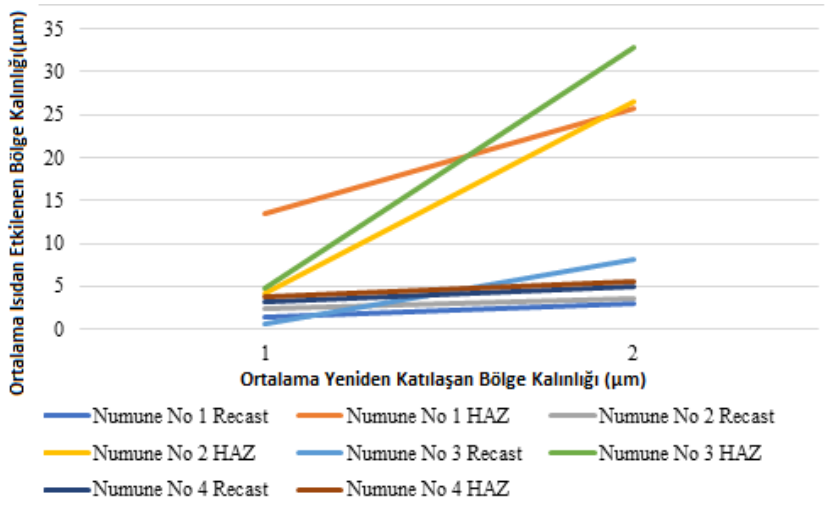
Bileme tipi, diğer incelemelerde olduğu gibi yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığı için oldukça önemli bulunmuştur. Yeniden katılaşan bölge kalınlığı sürekli bilemeli sistemlerde aralıklı bilemelere göre çok daha fazla artmaktadır. Bunun nedeni daha önce açıklandığı gibi, sürekli bilemeli sistemlerde sisteme ekstradan bir ısı girdisinin ekleniyor oluşudur. HAZ kalınlığı için ise, tam tersi bir durum vardır. Aralıklı sistemler ile yapılan işlemelerde HAZ kalınlığı sürekli bilemeli sistemlere göre daha fazla artmaktadır. Bu durum her ne kadar sıcaklığın artmasından dolayı beklenmeyen bir durum yaratsa bile, bileme tipinin sürekli ya da aralıklı olmasına bakmaksızın, malzemede HAZ oluşması için gerekli sıcaklığa ulaşıldığını ve aralıklı sistemlerde toplam sıcaklığın daha düşük olmasından dolayı yeniden katılaşan bölge kalınlığının düşmesi ve yerini HAZ kalınlığı olarak bırakması olarak yorumlanabilir.

Taşın çıkış bölgesi için tel erozyon tezgahı ile kesimlerin yapıldığı numuneler en dış yüzeyden içeriye 10 mm kalınlığında olacak şekilde kesilmiştir. Numuneler bakalite alındıktan sonra yüzeyleri yaklaşık 50 mikron kadar parlatılmıştır, yani en dış yüzeyi 50 mikron kadar içerisinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 4.4.'de verilmiştir. Diğer kısımlarda yapıldığı gibi, bu kısımda her parametreyi Taguchi metodu ile incelemek çok anlamlı değildir, çünkü taşın çıkış bölgesinde yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlına etki eden tek parametre taşın çıkış açısıdır, yani kesme paso derinliğidir. Şekil 4.9.'da gösterildiği gibi artan paso miktarı ile artan açı miktarından dolayı sıcaklık artmakta ve sonucunda yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığı da artmaktadır.



Şekil 4.7. Deney seti 1 çıkış yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığı ölçümlerine paso miktarının etkisi

Artan paso ile çıkışta yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığının artışının tespiti ile görsel muayenedeki yanıklar tekrardan değerlendirilmiştir. Deney seti 1'de görsel muayenede 9, 12, 13, 14, 15, 16 ve 18'de çıkış bölgesine yakın yanıklar görülmüştür. Çıkış bölgesindeki HAZ kalınlıklarının karşılaştırılması sonucunda, 89 mikronluk ölçüsü ile en kalın HAZ bölgesine sahip bölgenin 9 numaralı numune artından 18 ve 16'nın geldiği görülmüştür. Yanık görülen bölgelerde ısının gerçekten aşırı derece yükseldiği görülmüştür. Ancak numune 13'de HAZ kalınlığı diğer numunelerindekine benzer gelmesine rağmen yanık oluşmuştur. Yanmanın meydana gelmesi her zaman, sıcaklığın faz dönüşümüne etki edecek seviyeye geldiğini kanıtlamaz, numune 13'deki gibi oksidasyona sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle HAZ kalınlığı, diğer numunelere benzer bulunsa da yanık oluşumu oksidasyon sonucu yanma olarak yorumlanabilir. Buda numune 13 gibi istisnalar dışında, yanık bölge ile karşılaşıldığı zaman yüksek ihtimalle sıcaklığın çok yükseldiğini kanıtlar bir durumdur. Şekil 4.10'da deney seti 1'de kullanılan ilk 4 numune için giriş ve çıkış bölgelerinde yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığındaki genel artma trendi gösterilmiştir.



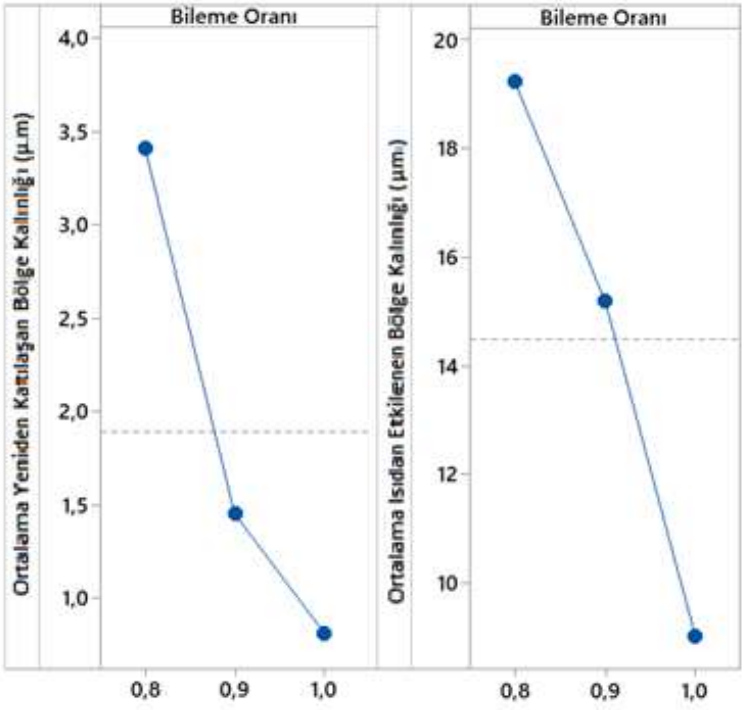
Şekil 4.8. Deney seti 1 ilk 4 numune giriş ve çıkış bölgeleri yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları

Deney seti 2'de farklı bileme oranları denenmiştir. Denenen bileme oranlarına göre ölçülen yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları Çizelge 4.5.'de gösterilmiştir. Bileme oranlarının etkisi değerlendirildiği için taguchi metodunda bileme oranlarının yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlığına etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.5. Deney seti 2 yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları sonuçları

Numune No	Giriş Bölgesi Yeniden Katılaşan Bölge Kalınlığı (µm)	Giriş Bölgesi HAZ Kalınlığı (µm)	Çıkış Bölgesi Yeniden Katılaşan Bölge Kalınlığı (µm)	Çıkış Bölgesi HAZ Kalınlığı (µm)
1	2,175	20,41	6,135	26,43
2	6,98	19,05	1,05	23,21
3	1,09	18,26	1,23	27,21
4	3,06	21,26	3,26	21,77
5	0,46	8,41	2,51	14,94
6	0,83	15,92	6,3	32,13
7	0,83	7	1,62	9,2
8	0,775	12	2,35	18,25
9	0,825	8,04	1,1	11,3

Şekil 4.11.'de gösterildiği gibi artan bileme oranı ile yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarında düşüş görülmüştür.



Şekil 4.9. Deney seti 2 bileme oranlarının yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarına etkileri

Bilemi sistemi daha önce bahsedildiği gibi sürünme ilerlemeli taşlama sistemlerinde taş ve parça arasında bir işleme yaparken, bileyici ve taş arasında da konvansiyonel olarak nitelendirebileceğimiz bir taşlama işleminin olmasıdır. Konvansiyonel taşlama sistemlerine benzetilen bu sistemde, bileyici ve taş tezgah içerisindeki konumlarının tam tersi gibi davranılarak incelenmesi gerekir, yani taşın parça, bileyicinin ise taş gibi modellenmesini gerektirir. Bu nedenle artan bileme oranı ile bileyicinin çizgisel hızında artış olacaktır, dolayısı ile ilerlemesindeki hızda da artış gerçekleşecektir. Bu durumda Eş. 4.3. göz önünde bulundurulduğunda, artan ilerleme hızı ile taşa aktarılan ısınında artması beklenmektedir. Dolayısı ile parça üzerine aktarılan ısıda yükselmektedir. Bir başka deyiş ile Eş. 2.3.'ün sağ tarafına bileyiciden taşa aktarılan pozitif bir ısı kaynağı eklenmektedir. Aynı zamanda bileyicini kullanılması ile eşitliğin sağ tarafına negatif bir ısı kaynağı olan taştan uzaklaştırılan taş parçacıkları da eklenecektir tıpkı parçadan uzaklaştırılan talaşlar gibi. Bileme oranı arttıkça taştan uzaklaştırılan taşlar ile ısı kaynağında bir düşüş yaşanmaktadır, bu sayede toplam ısıda düşüş olması beklenmektedir. Ayrıca, artan bileme oranı ile, bileme miktarı artmaktadır. Dolayısı ile düşük bileme oranlarına göre daha çok keskin uç elde edilir, bundan dolayı parça ile taş arasındaki temas alanında azalmalar başlamaktadır ve toplam sıcaklık düşmektedir. Son olarak, bilemenin artması ile soğutucu sıvının taş içerisindeki gözeneklere dolma oranı artacaktır, bir başka deyiş ile bilemenin artması ile taşın soğutması

çok daha iyi olmaktadır. Bütün bunlardan dolayı bileme oranın arttırılması ile parça üzerindeki maksimum sıcaklık düşmüş ve parça üzerindeki yeniden katılaşan bölge ve haz oranlarında ciddi düşüşler meydana gelmiştir.

Çıkış bölgesindeki yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları ise, deney seti 1'de olduğu gibi artmaktadır. Bu durumda genel trend olarak, parametrelere bakılmaksızın çıkış bölgesinde sıcaklığın arttığı kanıtlanmıştır. Deneyler arasında sadece 2.numunede bu durumun tersini gösteren bir yeniden katılaşan bölge kalınlığına rastlanılmıştır. Ancak yapılan yeniden katılaşan bölge ölçümleri mikroskop kullanımı ile elle ölçülendirmenin yapılmasından dolayı, dağlayıcının uygulama süresinin yeterli gelmemesi gibi durumlardan dolayı farklı ölçülmüş olabilir. Ancak bu durum genel trendi bozmamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılan sürünme ilerlemeli taşlama tezgahı ile köknar ağacı geometrisi üretilmiştir. Çalışmamızda havacılık sektörü için oldukça önemli olan yüzey bütünlüğü unsurları, profilden sapma, yüzey pürüzlülüğü, yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıklarının baz alınması ile parametre çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalar için 2 farklı deney seti oluşturulmuştur. Deney seti 1 ile genel olarak sürünme ilerlemeli taşlama tezgahının parametreleri olan bileme tipi, Z eksen ilerlemesi, kesme paso derinliği ve taş ilerleme hızının yüzey bütünlüğüne etkisi incelenmiştir. Deney seti 2 ile yüzey bütünlüğüne bileme oranın etkisi incelenmiştir.

Deney seti 1 ile profilden sapma ve yüzey pürüzlülükleri için en önemli parametrenin bileme tipi olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer parametreler de oldukça önemlidir, ancak bileme tipi gibi genel bir eğilim gözlemlenmemiştir. Genel itibari ile profilden sapmada ve yüzey pürüzlülüklerinde elde edilebilecek minimum değerin elde edilmesi için, Z eksen ilerlemesinin 400 mm/dk veya 500 mm/dk'da tutulması gerektiği, kesme paso derinliğini 250 mikronda sabitlenmesi ve taş hızının da 25 m/s ya da 35 m/s olarak ayarlanmasının gerekliliğidir.

Deney seti 1 ile yeniden katılaşan bölge ve HAZ kalınlıkları için en önemli parametrenin bileme tipi olduğu bulunmuştur. Her iki yapıyı da minimum kalınlıkta tutmak için 50 mikron paso değeri oldukça ideal bir paso değeri olmaktadır. Isıdan etkilenen ve yeniden katılaşan bölge yapılarının oluşumu için taş çizgisel hızının ciddi bir etkisi görülmemiştir. Isıdan etkilenen ve yeniden katılaşan bölgeler için bileme tipi oldukça önemli olsa dahi, yeniden katılaşan bölge kalınlığını düşürmek için araklı bileme, HAZ kalınlığını düşürmek için ise sürekli bilemenin tercih edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Dolayısı ile, yeniden katılaşan bölge ve HAZ yapılarının kalınlığının ters orantılı bir şekilde artacağı ya da azalacağı sonucuna varılmıştır. İmal edilecek parçanın yüzey bütünlüğü ve profil toleransı istelerine göre, bileme tipinin aralıklı yada sürekli olacağı seçilmelidir.

Deney seti 2 ile profilden sapma, yüzey pürüzlülükleri, yeniden katılaşan bölge ve HAZ oluşumları için bileme oranının yani taşın ve bileyicinin eş zamanlı dönme miktarlarının oranının yükseltilmesi mümkün ise 1.0 olarak ayarlanması tercih edilecek bir parametredir.

Bileme oranının 0.8’den 1.0’a yaklaştırılması ile yüzey bütünlüğünde ciddi iyileştirmeler yaşanmaktadır. Maalesef, bileme oranın arttırılması ile bileyicinin üzerinde oluşacak olan sıcaklık, bileyiciye zarar vereceği için çok özel parçalar dışında bu durum tercih edilmemelidir.

Araştırılan parametrelerin yüzey bütünlüğüne oldukça ciddi etkileri olduğu görülmüştür. Bu çalışma boyunca, bu parametrelerin etkilerinin literatürdeki gibi sıcaklıktan dolayı olduğu yorumlanmıştır. Ancak elde edilen optimum parametreler yalnızca çalışılan geometri ve taş özellikleri için geçerlidir. Bir başka deyiş ile, başka bir köknar ağacı geometrisi ve kullanılacak başka bir taş için bu çalışma ışık tutsa bile, CFG tezgahında parça özelinde parametre çalışması kaçınılmazdır. Bu çalışmada köknar ağacı geometrisi 90 derece açıda üretilmiştir. Ancak fikstürleme tekniği ile açının değişeceği unutulmamalı ve ısı transferinde direkt olarak temas alanına bağlı olarak değişeceği dikkate alınmalıdır.

Çalışma boyunca, termal analiz için gerekli formüllerden ve teoriden faydalanılmıştır. Bunun nedeni taş içerisindeki porozite miktarı ölçülmeden taş ve talaş ile uzaklaştırılacak ısı miktarının hesaplanmasının neredeyse imkansız oluşudur. Ayrıca deney seti 2’deki numune sayısı ve deney sayısı bileyicinin zarar görme riskine karşı kısıtlı tutulmuştur. Son olarak yığıntı talaş oluşumu, tahribatlı bir ölçüm gerektirdiğinden bu çalışmada incelenememiştir. Taşlama taşı içindeki porozitenin ölçülmesi, termal analiz ve yığıntı talaş oluşumunun incelenmesinin bilimsel literatüre önemli ölçüde katkı sağlayabileceğini kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

1. Rolls Royce (2015) *The Jet Engine*. John Wiley & Sons, pp. 60-230.

2. Xu, L., Bo, S., Hongde, Y., & Lei, W. (2015). Evolution of Rolls-Royce air-cooled turbine blades and feature analysis. *Procedia Engineering*, *99*, 1482-1491.

3. Boyce, M. P. (2011). *Gas turbine engineering handbook*. Elsevier, pp 5-87.

4. İnternet: Türbin palesi imalatı için detaylandırılmış bölgelere göre görsel. URL: http://www.winbrogroup.com adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

5. Naumann, H. G. (1982). Steam turbine blade design options: how to specify or upgrade. In *Proceedings of the 11th Turbomachinery Symposium*. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 29-49.

6. Moneta, G., Jachimowicz, J., & Osiński, J. (2015). Influence of Manufacturing Tolerances on Vibration Frequencies of Turbine Blade. *Machine Dynamics Research*, *38*, No 1, 105-118.

7. Poyraz, O., Ozaner, O.C., Subası, L. (2019). *Comparative Review on The Manufacturing Fir-Tree Roots*, 10thInternatıonal Congress on Machining, Antalya Turkey, 7-9 November 2019

8. Song, W., Keane, A., Rees, J., Bhaskar, A., & Bagnall, S. (2002). Turbine blade fir-tree root design optimisation using intelligent CAD and finite element analysis. *Computers & structures*, *80*(24), 1853-1867.

9. Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayashi, K., Suzuki, T., & Kinoshita, N. (1985). Wire electro-discharge grinding for micro-machining. *CIRP Annals*, *34*(1), 431-434.

10. Sharma, P., Chakradhar, D., & Narendranath, S. (2015). Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application. *Materials & Design*, *88*, 558-566.

11. Klocke, F., Welling, D., Klink, A., Veselovac, D., Nöthe, T., & Perez, R. (2014). Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in Inconel 718. *Procedia CIRP*, *14*(1), 430-435.

12. Soo, S. L., Antar, M. T., Aspinwall, D. K., Sage, C., Cuttell, M., Perez, R., & Winn, A. J. (2013). The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy. *Procedia CIRP*, *6*, 215-219.

13. Muthuramalingam, T. (2019). Measuring the influence of discharge energy on white layer thickness in electrical discharge machining process. *Measurement*, *131*, 694-700.

14. Klocke, F., Soo, S. L., Karpuschewski, B., Webster, J. A., Novovic, D., Elfizy, A., ... & Tönissen, S. (2015). Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *CIRP Annals*, *64*(2), 581-604.

15. Xavior, A. (2019). Fatigue life and Fracture Morphology of Inconel 718 machined by spark EDM process. *Procedia Manufacturing*, *30*, 292-299.

16. Li, L., Guo, Y. B., Wei, X. T., & Li, W. (2013). Surface integrity characteristics in wire-EDM of Inconel 718 at different discharge energy. *Procedia Cirp*, *6*, 220-225.

17. Subrahmanyam, M., & Nancharaiah, T. (2020). Optimization of process parameters in wire-cut EDM of Inconel 625 using Taguchi's approach. *Materials Today: Proceedings*, *23*, 642-646.

18. Pérez, R., Carron, J., Rappaz, M., Wälder, G., Revaz, B., & Flükiger, R. (2007). Measurement and metallurgical modelling of the thermal impact of EDM discharges on steel. In *Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining, ISEM XV*, 17-22.

19. Singh, H. (2012). Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *55*(19-20), 5053-5064.

20. Gupta, K., Chaube, S. K., & Jain, N. K. (2014). Exploring wire-EDM for manufacturing the high quality meso-gears. *Procedia Materials Science*, *5*, 1755-1760.

21. Klocke, F., Seimann, M., Binder, M., & Doebbeler, B. (2018). Milling of Fir-Tree Slots in Allvac 718 plus. *Procedia CIRP*, *77*, 409-412.

22. İnternet: Türbin palesi kök geometrisi için tasarlanan özel kesici takımların örnekleri. URL: https://www.rime.net/en/products/special-milling-cutters/end-mills-for-turbines adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

23. Walter GmbH (2019), *High-end production of tools for the aerospace industry in combination with local and global qualiy control*, Grinding Symposium 2019, United Grinding Group

24. İnternet: Örnek kök frezelemesi için takım ve parçanın operasyon görseli. URL: https://www.emuge.com/sites/default/files/literature/Pagode.pdf adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

25. Toolmaker.(2019),*HIPIMS indexable inserts optimise Walter Fir-Tree cutters*, Grinding Symposium 2019, United Grinding Group

26. Malkin, S., & Guo, C. (2007). Thermal analysis of grinding. *Cirp Annals*, *56*(2), 760-782.

27. Zhang, L. C., Suto, T., Noguchi, H., & Waida, T. (1995). A study of creep-feed grinding of metallic and ceramic materials. *Journal of materials processing technology*, *48*(1-4), 267-274.

28. Blohm Jung GmbH (2019), *3 Systems 1 Machine*, Grinding Symposium 2019, United Grinding Group

29. İnternet: CFG tezgahı ile kök işleme. URL: http://www.hitekmfg.com/precision-cnc-grinding-services-land-based-industrial-gas-turbines.html adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

30. Miao, Q., Li, H. N., & Ding, W. F. (2020). On the temperature field in the creep feed grinding of turbine blade root: Simulation and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *147*, 118957.

31. Mamalis, A. G., Kundrak, J., Manolakos, D. E., Gyani, K., Markopoulos, A., & Horvath, M. (2003). Effect of the workpiece material on the heat affected zones during grinding: a numerical simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *22*(11-12), 761-767.

32. Ding, Z. S., Li, B. Z., Zou, P., & Liang, S. Y. (2014). Material phase transformation during grinding. In *Advanced Materials Research*, 1052, 503-508.

33. Zishan, D., Beizhi, L., & Steven, L. Y. (2016). Material phase transformation at high heating rate during grinding. *Machining Science and Technology*, *20*(2), 290-311.

34. Wang, H., Huang, L., Yao, C., Kou, M., Wang, W., Huang, B., & Zheng, W. (2015). Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *16*(5), 1011-1019.

35. Ören, S., Yasa, E., Uğur, E., Poyraz, Ö., Akbulut, G., & Pilatin, S. (2014). Havacılık sektöründe optik ölçüm yöntemlerinin yeri ve karşılaştırmalı değerlendirilmesi üzerine bir çalışma, *Engineer & the Machinery Magazine*, (654), 36-60.

36. Chalimoniuk, M., Błachnio, J., & Krysztofik, J. (2010). Analysis of the feasibility to investigate condition of gas turbine vanes by means of the radiographic method. *Journal of KONBIN*, *13*(1), 129-138.

37. Chalimoniuk, M., Szczepanik, R., & Błachnio, J. (2013). The rate of decohesion of a gas turbine blade as assessed with the X-ray computed tomography (CT). *Journal of KONES*, *20*.

38. İnternet: Lazer tarama sistemleri. URL: www.karfo-endustriyel.com.tr adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

39. İnternet: Lazer, prob tarama sistemleri. URL: https://www.nikonmetrology.com/en-gb/ adresinden 30 Ağustos 2020'de alınmıştır.

40. Poyraz, O., & Kushan, M. C. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 699-711.

41. Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı. *Engineer & the Machinery Magazine*, *59*(691).

42. Magerramova, L., Vasilyev, B., & Kinzburskiy, V. (2016, June). *Novel designs of turbine blades for additive manufacturing*. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 49804, p. V05CT18A001). American Society of Mechanical Engineers.

43. Kitteringham, G. S. (1987). High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Applications 1986, 52-54.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: OZANER, Ozan Can
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 24.05.1994, Ankara
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (506) 877 60 37
e-mail	: ozancanozaner@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği	2017
Lise	Ayrancı Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	TEI – TUSAŞ Motor Sanayii	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Poyraz, O., Ozaner, O.C., Subası, L. (2019). *Comparative Review on The Manufacturing Fir-Tree Roots,* 10thInternatıonal Congress on Machining, Antalya Turkey, 7-9 November 2019
2. Ozaner, O.C. & Izciler, M. (2020). Investigation Of The Effects Of Creep Feed Grinding's Parameters On Surface Roughness. *European International Journal of Science and Technology*, 9(3), 7-15

3. Sen, C., Subasi, L., Ozaner, O. C., & Orhangul, A. (2020). The Effect of Milling Parameters on Surface Properties of Additively Manufactured Inconel 939. *Procedia CIRP*, 87, 31-34.

4. Bektaş, E., Subası, L., Günaydın, A., Dibonie, J., Ozaner, O. C., & Canadinc, D. (2020). Water Jet Guided Laser vs. Conventional Laser: Experimental Comparison of Surface Integrity for Different Aerospace Alloys. *Proceedings of LPM 2020, the 21st International Symposium on Laser Precision Microfabrication Proceedings of LPM 2020.*

5. Ozaner, O. C., Dursun, G., & Akbulut, G. (2020). Effects of wire-EDM parameters on the surface integrity and mechanical characteristics of additively manufactured Inconel 939. *Materials Today: Proceedings*.

6. Ozaner, O.C. (2020, October). Comparison Of Manufacturing Methods For Turbine Blade Fir-Tree Roots. *In 35th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, ASPE 2020*, 214-221.

7. Subasi, L., Diboine, J., Gunaydin, A., Tuzemen, C., Ozaner, O. C., & Martin, R. (2020). Water jet guided laser microdrilling of aerospace alloys: Correlation of material properties to process time and quality. *Journal of Laser Applications*, 33(1), 012015.

Hobiler

Basketbol, Müzik, Ahşap el işçiliği



GAZİ GELECEKTİR...