



**GENLEŞME KATSAYISI DÜŞÜK CAMLARIN İŞLEME  
PARAMETRELERİNİN VE YÜZEYALTI HASARLARININ  
İNCELENMESİ**

**Ceyda ÖZDEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2019**

Ceyda ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “GENLEŞME KATSAYISI DÜŞÜK CAMLARIN İŞLEME PARAMETRELERİNİN VE YÜZEYALTI HASARLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

**Başkan:** Prof. Dr. Veli ÇELİK

Havacılık ve Uzay Bilimleri Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

**Üye:** Prof. Dr. Halil ARIK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 30/07/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Ceyda ÖZDEMİR

30/07/2019



# GENLEŞME KATSAYISI DÜŞÜK CAMLARIN İŞLEME PARAMETRELERİNİN VE YÜZEYALTI HASARLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ceyda ÖZDEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

## ÖZET

Silika ve titanyumdioksit veya lityum, alüminyum ve silika gibi farklı elementlerin kombinasyonu ile elde edilen düşük termal genleşme katsayılı cam ve cam/seramik yapı malzemeler, yüksek performanslı mekanik ve optik özellikler sergilerler. İleri üretim teknolojilerinin gelişmesiyle, optik litografi sistemleri, hassas jiroskop sistemleri, uydu kameraları, astronomi aletleri, atalet füzyon çalışmaları gibi önemli bilimsel ve yüksek teknoloji mühendislik projelerinde düşük genleşme katsayılı camlara ve cam/seramiklerine olan talep artmıştır. Camlar ve cam seramikler torna ve freze tezgahları, bilgisayar sayımlı yönetim (CNC) sistemleri, konvansiyonel lepleme tezgahları gibi farklı teknolojiler kullanılarak işlenir ve şekillendirilir. Bu üretim sürecinde de kullanılan sisteme, işleme parametrelerine, taşlama takımına, kullanılan cam ve cam / seramik malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak işlenen yüzeyin altında farklı derinliğe sahip yatay, radyal, orta ve Hertz çatlakları meydana gelir. Optik malzeme işlendikten sonra bu çatlakların giderilmesi özellikle malzemenin mekanik dayanımı açısından kritiktir. Bu yüzden malzeme işlendikten sonra parlatma tekniği gibi yeni çatlak meydana getirmeyen tekniklerle malzemenin yüzeyinden en az çatlakların derinliği kadar malzeme kaldırmak önemlidir. Bu tezde Zerodur®, ULE®, Clearceram®, AstroSital® adı verilen genleşme katsayısı düşük camlara ait özellikler ve sınıflandırılması ile ilgili bilgi verilmiştir. Zerodur® malzeme 5 eksenli dikey CNC tezgahı ile farklı işleme parametreleri kullanılarak taşlanarak yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyaltı hasarları incelenmiştir. İlave olarak, ULE® malzemesinin manuel olarak ve otomatik sistemde zımparalanıp taşlanması ve farklı parçacık büyüklüğünde parlatma çözümü ve keçesiyle parlatılmasıyla oluşturulan yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma mekanizmaları incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü taşlama / zımparalama işlemi parametrelerine ve malzemeye, yüzeyaltı hasarları ise kesici parçacık büyüklüğüne doğrudan bağlıdır. Aynı işlemde hem sünek mod hem de kırılkan mod malzeme kaldırma mekanizması gözlenir.

Bilim Kodu : 91502

Anahtar Kelimeler : Zerodur®, ULE®, Genleşme Katsayısı Düşük Camlar, Taşlama, Parlatma Yüzeyaltı Hasarları

Sayfa Adedi : 142

Danışman : Prof. Dr.Yusuf ÖZÇATALBAŞ

# INVESTIGATION OF GRINDING PROCESS AND SUBSURFACE DAMAGES OF LOW EXPANSION GLASSES

(M. Sc. Thesis)

Ceyda ÖZDEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

## ABSTRACT

Glass and glass/ceramic materials with very low thermal expansion coefficient derived by the combination of different elements such as silica and titanium dioxide or lithium, aluminum and silica present high performance mechanical and optical properties. With the development of advanced manufacturing technologies, the demand for glasses and glass/ceramics with low thermal expansion coefficient has greatly increased in significant scientific and high-tech engineering projects. Optical lithography systems, sensitive gyroscope systems, satellite cameras, astronomical instruments, inertial fusion works may be considered as leading areas for these materials. The materials are grinded and shaped using different technologies such as turning and milling machines, computer numerical control (CNC) systems, conventional lapping machines etc. Lateral, radial, median and Hertzian cracks with different depths under the grinding surface occur depending on the system used in manufacturing process, the process parameters, the grinding tool and the mechanical properties of the glass and glass / ceramic materials used. The removal of these cracks after the grinding of the optical material is particularly critical in terms of mechanical strength of the material. Therefore, it is important to remove the material from the surface at least as the depth of the cracks by means of techniques which do not create new cracks, such as polishing technique, after the material has been grinded. In this thesis, the properties and classification of glass and glass/ceramic with low thermal expansion coefficient called Zerodur<sup>®</sup>, ULE<sup>®</sup>, Clearceram<sup>®</sup>, AstroSital<sup>®</sup> are described. Zerodur<sup>®</sup> material was grinded with 5 axis vertical CNC machine by using different machining parameters and surface roughness and also subsurface damage were investigated. In addition, after ULE<sup>®</sup> material was grinded by manually and in the automatic system with different sanding discs and then polished with polishing slurry that different particle sizes and pads, the surface roughness and the material removal mechanisms of finished ULE<sup>®</sup> were investigated. The surface roughness is directly related to the grinding / sanding process parameters and the material, and also subsurface damage directly depends on the grit size. In the same process, both ductile mode and brittle mode material removal mechanism is observed.

Science Code : 91502

Key Words : Zerodur<sup>®</sup>, ULE<sup>®</sup>, Low Expansion Glass, Grinding, Polishing, Subsurface Damage

Page Number : 142

Supervisor : Prof. Dr.Yusuf ÖZÇATALBAŞ

## TEŞEKKÜR

Beni çalışmalarım boyunca yönlendiren, bilgi birikimlerini benimle paylaşan ve bana her zaman destek olan biricik hocam Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, çalışmalarım sırasında yanımda olan, bilgi ve tavsiyeleriyle bana destek olan başta Dr. Özgür KARCI olmak üzere, Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü Optik Sistemler ve Optik Üretim Grubu üyelerine, Roketsan Optik Üretim Birimi üyelerine teşekkür ederim. Ayrıca 07/2018-25 nolu BAP projesi ile bu çalışmayı destekleyen, tezime katkı sağlayan Gazi Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca yanımda olan, başarımlarım ve mutluluğum için her türlü imkanı sağlayan, gurur ve sevgi kaynağım ailem ve bitanecik eşime kalpten teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                            | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                 | iv    |
| ABSTRACT.....                                                              | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                              | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                          | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                  | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                    | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                   | xv    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                               | xviii |
| 1. GİRİŞ.....                                                              | 1     |
| 2. DÜŞÜK TERMAL GENLEŞME KATSAYISINA SAHİP CAM VE<br>CAM / SERAMİKLER..... | 3     |
| 2.1. Kullanım Alanları.....                                                | 3     |
| 2.2. Malzeme Kalitesini Belirleyen Karakteristik Özellikler .....          | 6     |
| 2.3. Camlar .....                                                          | 7     |
| 2.3.1. ULE®.....                                                           | 7     |
| 2.4. Cam Seramikler .....                                                  | 9     |
| 2.4.1. Zerodur® .....                                                      | 10    |
| 2.4.2. Clearceram® .....                                                   | 13    |
| 2.4.3. AstroSital® .....                                                   | 14    |
| 3. OPTİK ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ.....                                         | 17    |
| 3.1. Malzeme Kaldırma Mekanizması .....                                    | 18    |
| 3.2. Taşlama Tezgahları.....                                               | 21    |
| 3.2.1. Tezgah hataları .....                                               | 23    |

|                                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.2.2. Hassas taşlama prosesi.....                                                             | 29           |
| 3.3. Taşlama İşlemi Karakterizasyonu .....                                                     | 45           |
| 3.3.1. Temas uzunluğu .....                                                                    | 45           |
| 3.3.2. Birim alandaki aktif aşındırıcı parçacık sayısı .....                                   | 47           |
| 3.3.3. En yüksek deforme olmayan talaş kalınlığı .....                                         | 48           |
| 3.3.4. Kesme kuvvetleri.....                                                                   | 49           |
| 3.3.5. Kesme gücü kayıpları .....                                                              | 51           |
| 3.4. Yüzey Dokusu ve Yüzey Formu .....                                                         | 52           |
| 3.4.1. Yüzey pürüzlülüğü .....                                                                 | 53           |
| 3.4.2. Tepe ve çukur profili .....                                                             | 54           |
| 3.4.3. Yüzey desenleri .....                                                                   | 56           |
| 3.4.4. Yüzeyaltı hasarları .....                                                               | 57           |
| 4. OPTİK METROLOJİ TEKNİKLERİ .....                                                            | 71           |
| 4.1. İnterferometre.....                                                                       | 71           |
| 4.1.1. Beyaz ışık interferometresi.....                                                        | 74           |
| 4.2. Temaslı Profilometre.....                                                                 | 76           |
| 4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....                                                  | 77           |
| 5. DENEYSEL EKİPMAN VE YÖNTEMLER.....                                                          | 79           |
| 5.1. Deney Seti 1 .....                                                                        | 79           |
| 5.1.1. Taşlama tezgahı.....                                                                    | 80           |
| 5.1.2. Taşlama ekipmanı .....                                                                  | 83           |
| 5.1.3. Taşlama işlemi parametreleri .....                                                      | 87           |
| 5.1.4. Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde kimyasal aşındırma<br>ve parlatma operasyonu..... | 88           |
| 5.1.5. Metroloji teknikleri .....                                                              | 91           |

|                                                          | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| 5.2. Deney Seti 2 .....                                  | 93           |
| 5.2.1. Malzeme .....                                     | 94           |
| 5.2.2. Zımparalama ve parlatma sistemi .....             | 96           |
| 5.2.3. Zımparalama ve parlatma ekipmanı .....            | 96           |
| 5.2.4. Zımparalama ve parlatma işlemi parametreleri..... | 98           |
| 5.2.5. Metroloji teknikleri .....                        | 99           |
| 6. DENEY SONUÇLARI .....                                 | 103          |
| 6.1. Deney Seti 1 .....                                  | 103          |
| 6.1.1. İşlenebilirlik parametreleri .....                | 103          |
| 6.1.2. Yüzeyaltı hasarları .....                         | 107          |
| 6.2. Deney Seti 2 .....                                  | 112          |
| 6.2.1. İşlenebilirlik parametreleri .....                | 112          |
| 6.2.2. Yüzey görüntüleri .....                           | 120          |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                               | 127          |
| KAYNAKLAR .....                                          | 129          |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                           | 141          |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                  | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. ULE® kalite sınıflandırması.....                                                            | 8     |
| Çizelge 2.2. ULE® termal özellikler.....                                                                 | 9     |
| Çizelge 2.3. ULE® mekanik özellikler .....                                                               | 9     |
| Çizelge 2.4. ULE® optik özellikler .....                                                                 | 9     |
| Çizelge 2.5. Zerodur® termal genleşme katsayısı sınıflandırması .....                                    | 11    |
| Çizelge 2.6. Zerodur® inklüzyon sınıflandırması .....                                                    | 11    |
| Çizelge 2.7. Zerodur® hacimsel gerilim sınıflandırması .....                                             | 12    |
| Çizelge 2.8. Zerodur® damarlanma sınıflandırması.....                                                    | 12    |
| Çizelge 2.9. Zerodur® termal özellikler .....                                                            | 12    |
| Çizelge 2.10. Zerodur® mekanik özellikler.....                                                           | 12    |
| Çizelge 2.11. Zerodur® optik özellikleri.....                                                            | 13    |
| Çizelge 2.12. Clearceram® termal genleşme katsayısı sınıflandırması .....                                | 14    |
| Çizelge 2.13. Clearceram® inklüzyon baloncuk sınıflandırması .....                                       | 14    |
| Çizelge 2.14. Clearceram® damarlanma sınıflandırması.....                                                | 14    |
| Çizelge 2.15. Clearceram® termal özellikleri.....                                                        | 14    |
| Çizelge 2.16. Clearceram® mekanik özellikleri .....                                                      | 14    |
| Çizelge 2.17. Clearceram® optik özellikleri.....                                                         | 15    |
| Çizelge 2.18. AstroSital® termal özellikleri .....                                                       | 16    |
| Çizelge 2.19. AstroSital® mekanik özellikleri .....                                                      | 16    |
| Çizelge 2.20. AstroSital® optik özellikleri.....                                                         | 16    |
| Çizelge 3.1. Taşlama takımı şekilleri ve kodları .....                                                   | 33    |
| Çizelge 3.2. ISO standartları, eşdeğer elek numarası ve elmas parçacık büyüklüğü arasındaki ilişki ..... | 39    |

| <b>Çizelge</b>                                                                                                                                          | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 3.3. Aşındırıcı parçacık konsantrasyonuna göre hacimce ve ağırlıkça aşındırıcı tane miktarı .....                                               | 39           |
| Çizelge 3.4. ISO 4288:1998 standardına göre örnekleme ve değerlendirme uzunlukları .....                                                                | 52           |
| Çizelge 3.5. Farklı malzemeler için mikro sertlik, kırılma tokluğu, kırılmalık, P*, C* .....                                                            | 63           |
| Çizelge 5.1. İşleme parametrelerinin incelenmesi için kullanılan taşlama parametreleri .....                                                            | 87           |
| Çizelge 5.2. Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde kullanılan taşlama parametreleri..                                                                   | 88           |
| Çizelge 5.3. Parlatma işlemi parametreleri .....                                                                                                        | 91           |
| Çizelge 5.4. Soğuk gömmeli numunelerin taşlama işlemi parametreleri.....                                                                                | 99           |
| Çizelge 5.5. Soğuk gömmeli numunelerin parlatma işlemi parametreleri.....                                                                               | 99           |
| Çizelge 6.1. Kimyasal aşındırma işlemi ile çatlak yapısındaki değişim .....                                                                             | 111          |
| Çizelge 6.2. Serbest numunelerde zımparalama işleminden önce ve sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri.....                                      | 112          |
| Çizelge 6.3. Soğuk gömmeli numunelerde zımparalama işleminden sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri.....                                        | 116          |
| Çizelge 6.4. Soğuk gömmeli numunelerde parlatma süresi, parlatma solüsyonu ve parlatma keçesine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri... | 117          |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Mor ötesi litografi optik sistemi .....                                                                                                                                                      | 4     |
| Şekil 3.1. Altmış yıldan fazla süredir farklı teknolojiler kullanılarak elde edilebilen işleme hassasiyeti.....                                                                                         | 17    |
| Şekil 3.2. Farklı işleme süreçlerinde, yüzey pürüzlülüğüne karşılık malzeme kaldırma oranı .....                                                                                                        | 18    |
| Şekil 3.3. Yüzey taşlama işleminin ve kırılğan malzemelerde malzeme kaldırma modlarının şematiği .....                                                                                                  | 20    |
| Şekil 3.4. Aşındırıcı taşlama sırasında malzeme kaldırma mekanizması (a) sünek mod (b) kırılğan mod .....                                                                                               | 21    |
| Şekil 3.5. Doğruluk, tekrarlanabilirlik ve çözünürlük kavramlarının tanımı.....                                                                                                                         | 24    |
| Şekil 3.6. Holyrod Edgetek taşlama tezgahına ait döngü kararlılığı.....                                                                                                                                 | 26    |
| Şekil 3.7. Taşlama takımı ile iş parçası ve tutma fikstürü arasındaki etkileşim .....                                                                                                                   | 27    |
| Şekil 3.8. Takım aşınma eğrisi.....                                                                                                                                                                     | 28    |
| Şekil 3.9. Çapraz taşlama yöntemi ve paralel taşlama yöntemi.....                                                                                                                                       | 30    |
| Şekil 3.10. (a) Takım şeklini ifade eden sayılar (b) aşındırıcı tabaka şeklini ifade eden harfler (c) aşındırıcı tabakanın pozisyonunu ifade eden sayılar (d) özel özellikleri ifade eden harfler ..... | 34    |
| Şekil 3.11. (a) Elektroliz bağ katmanı (b) Sinterli bağ katmanı .....                                                                                                                                   | 37    |
| Şekil 3.12. Farklı şekillendirme teknikleri (a) aşındırıcı profil çıkarması (b) form şekillendirmesi (c) profil kırma (d) form kırma.....                                                               | 40    |
| Şekil 3.13. Elektrolitik elmas açma tekniği .....                                                                                                                                                       | 42    |
| Şekil 3.14. Farklı nozul tasarımları (a) yuvarlak nozul (b) geleneksel nozul .....                                                                                                                      | 44    |
| Şekil 3.15. Taşlama işlem parametrelerinin şema üzerinde gösterimi.....                                                                                                                                 | 45    |
| Şekil 3.16. Gerçek temas uzunluğu (a) Taşlama işlemi boyunca takım ve iş parçasının teması (b) geometrik temas (c) elastik temas (d) mikroskobik temas seviyesi .....                                   | 46    |
| Şekil 3.17. Tepe ve çukur profili .....                                                                                                                                                                 | 54    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3.18. Farklı durumlarda elde edilen yüzey profili .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 55           |
| Şekil 3.19. Çatlakların başlama ve yayılma modeli.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 57           |
| Şekil 3.20. Taşlama yolu boyunca çatlak oluşumu.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 59           |
| Şekil 3.21. Yüzeyaltı hasarları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 59           |
| Şekil 3.22. (a) Yüzeyin 0.6 µm altı (b) yüzeyin 3.0 µm altı (c) yüzeyin 7.9 µm altı<br>(d) yüzeyin 16.0 µm altı (e) yüzeyin 34.8 µm altı (f) yüzeyin 52.7 µm<br>altı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 60           |
| Şekil 3.23. D64 takım ile işlenen (a) Zerodur® ve (b) ULE® ‘deki yüzeyaltı hasarları ..                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 61           |
| Şekil 3.24. Yüzeyaltı hasarları derinlikleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 61           |
| Şekil 3.25. Uca doğru incelme vererek yapılan parlatma işlemi ile<br>yüzeyaltı hasarların incelenmesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 65           |
| Şekil 3.26. Kimyasal aşındırma işleminden önce ve sonra çatlakları değişimi<br>(a) Aşınmış batıcı ucun yarattığı çatlak (b) sivri batıcı ucun yarattığı<br>çatlaklar (c) kayan iz açarın yarattığı çatlak .....                                                                                                                                                                                                                                              | 66           |
| Şekil 3.27. Parlatılmış kaynaşık silikanın (a) kimyasal aşındırma işleminden önce ve<br>(b) sonra mikroskop görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 67           |
| Şekil 3.28. Yüzeyaltı hasarlarını incelemek için kullanılan Xu ve Jahanmir’e ait<br>teknik.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 68           |
| Şekil 3.29. Zerodur® malzemede meydana gelen yüzeyaltı hasarlarının morfolojisi ve<br>derinliği (a) yüzeyaltı hasarları ile birlikte taşlanmış yüzey (b) mikro<br>oyuklar içeren yüzey altı (c) çeşitli yüzeyaltı hasarı ve oyuk içeren<br>taşlanmış yüzey (d) medyan çatlaklar içeren taşlanmış yüzey (e) medyan<br>ve yanal çatlaklar içeren taşlanmış yüzey (f) iş parçasının derinliklerine<br>nüfuz eden bir medyan çatlak içeren taşlanmış yüzey ..... | 69           |
| Şekil 4.1 Young çift yarık deneyine ait şematik gösterim .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 72           |
| Şekil 4.2. Michelson interferometresi şematik gösterimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 73           |
| Şekil 4.3.(a) İş parçası kusursuz olduğunda (b) İş parçası yüzeyinde tümsek veya<br>çukur olduğunda elde edilen girişim deseni.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 74           |
| Şekil 4.4. Beyaz ışık interferometresi şematik gösterim.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 75           |
| Şekil 4.5. Beyaz ışık interferometresindeki renk sinyalleri (a) beyaz ışık<br>interferogramı (b) Beyaz ışık interferogramının kırmızı, yeşil ve mavi<br>kanalları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 76           |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                       | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.6. Temas uçlu ölçme sistemlerine ait yemel çalışma prensibi.....                                                           | 77           |
| Şekil 4.7. Taramalı elektron mikroskobuna ait temel bileşenler .....                                                               | 78           |
| Şekil 5.1. Taşlama sistemi hareket eksenleri .....                                                                                 | 81           |
| Şekil 6.1. Taşlama takımının ve takım ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....                                            | 103          |
| Şekil 6.2. Taşlama takımının ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....                                                | 104          |
| Şekil 6.3. Aynı taşlama parametreleri ile işlenen Zerodur® ve BK7®’de elde edilen yüzey pürüzlülüğü.....                           | 106          |
| Şekil 6.4. D126, D64 ve D35’lik takımın oluşturduğu yüzeyaltı hasarlarının derinliği .....                                         | 109          |
| Şekil 6.5. Yeni ve eski P120, P220 ve P320 zımpara disklerinin 60 s kullanımı ile ortalama malzeme kaybı .....                     | 113          |
| Şekil 6.6. P120, P220 ve P320 zımpara diskleri ile ağırlıkça ortalama malzeme kaybı.....                                           | 114          |
| Şekil 6.7. P120, P220 ve P320 zımparalama diski ile işlenen malzemede farklı taşlama süresine göre kaldırılan malzeme miktarı..... | 115          |
| Şekil 6.8. P120 zımpara diski ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi .....                | 118          |
| Şekil 6.9. P220 zımpara diski ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi .....                | 118          |
| Şekil 6.10. P220 zımpara diski ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi .....               | 119          |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                                                                                      | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Arizona Binoküler Teleskobu .....                                                                                                                                                                               | 3     |
| Resim 2.2. Halka Lazer Jiroskop .....                                                                                                                                                                                      | 5     |
| Resim 2.3. Uzay teleskopları veya uydular için Zerodur® malzemedен Schott firması tarafından üretilen 1.2 m çapında arkası boşaltılmış ayna alttaş malzemesi .....                                                         | 5     |
| Resim 2.4. ULE® camlar ve çeşitli uygulamalar için işlenmiş hali .....                                                                                                                                                     | 8     |
| Resim 2.5. Zerodur® cam seramik malzemenin çeşitli uygulamalar için form verilmiş hali .....                                                                                                                               | 11    |
| Resim 2.6. Clearceram® cam seramik malzemedен geliştirilen su jeti .....                                                                                                                                                   | 13    |
| Resim 2.7. AstroSital® cam seramik malzemenin çeşitli uygulamalar için şekillendirilmiş hali .....                                                                                                                         | 15    |
| Resim 3.1. Kodak OAGM2500 taşlama tezgahı.....                                                                                                                                                                             | 22    |
| Resim 3.2. BoX® taşlama tezgahı .....                                                                                                                                                                                      | 23    |
| Resim 3.3. Çapraz taşlama ve paralel taşlama modları.....                                                                                                                                                                  | 31    |
| Resim 3.4. Örnek taşlama takımları .....                                                                                                                                                                                   | 35    |
| Resim 3.5. Metal bağ yapısı.....                                                                                                                                                                                           | 35    |
| Resim 3.6. Reçine bağ yapısı.....                                                                                                                                                                                          | 36    |
| Resim 3.7. Vitrifiye bağ yapısı .....                                                                                                                                                                                      | 36    |
| Resim 3.8. Elektroliz kaplama ile oluşturulan bağ yapısı .....                                                                                                                                                             | 37    |
| Resim 3.9. Farklı yüzey desenleri .....                                                                                                                                                                                    | 56    |
| Resim 5.1. Satisloh GI-2P taşlama tezgahı .....                                                                                                                                                                            | 80    |
| Resim 5.2. (a) Tutucu armetüre bağlanmadan önce iş parçası (b) armetüre bağlandıktan sonra iş parçası (c) yapıştırma işleminde kullanılan balmumu balmumu yapıştırıcı (d) tezgah içine bağlandıktan sonra iş parçası ..... | 84    |
| Resim 5.3. İşleme parametrelerinin incelenmesinde kullanılan (a) D126 ve D46 taşlama takımları (b) Takımların içten görünümü .....                                                                                         | 85    |

| <b>Resim</b>                                                                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 5.4. Yüzeyaltı hasarlarını incelemeye kullanılan D126 ve D64 taşlama takımları.....                                                     | 86           |
| Resim 5.5. Elmas açma çubuğu.....                                                                                                             | 86           |
| Resim 5.6. Kimyasal aşındırma operasyonunda kullanılan taşmalı kuvetli ıslak tezgahlar .....                                                  | 89           |
| Resim 5.7. Konvansiyonel parlatma tezgahı.....                                                                                                | 90           |
| Resim 5.8. Parlatma İşlemi .....                                                                                                              | 91           |
| Resim 5.9. Taylor Hobson - Talysurf PGI dimension profilometresi .....                                                                        | 92           |
| Resim 5.10. Zygo Zegage Plus beyaz ışık interferometresi.....                                                                                 | 93           |
| Resim 5.11. (a) Serbest numuneler (b) soğuk gömmeli numuneler .....                                                                           | 93           |
| Resim 5.12. ULE® EDS analiz bölgesi .....                                                                                                     | 95           |
| Resim 5.13. ULE®'ye ait EDS analizi.....                                                                                                      | 95           |
| Resim 5.14. (a) ATM marka Saphir 520 model taşlama parlatma sistemi (b) zımpara diski veya parlatma keçesi ve örnek tutucu dönüş yönleri..... | 96           |
| Resim 5.15. Önden ve arkadan taşlama diski .....                                                                                              | 97           |
| Resim 5.16. (a) P120 ve (b) P320 zımparalama diskleri.....                                                                                    | 97           |
| Resim 5.17. (a) 3 µm'lik (b) 1 µm'lik (c) 6 µm'lik parlatma keçesi .....                                                                      | 98           |
| Resim 5.18. Mahr marka Perthometer M1 profilometresi .....                                                                                    | 100          |
| Resim 5.19. (a) Numunelerin kaplanma işlemi (b) taramalı elektron mikroskobu .....                                                            | 101          |
| Resim 6.1. (a) D126 (b) D64 (c) D35 taşlama takımları ile işleme sonu oluşan yüzeyaltı hasarları.....                                         | 107          |
| Resim 6.2. D126'lık takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar .....                                                 | 108          |
| Resim 6.3. D64'lük takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar .....                                                  | 108          |
| Resim 6.4. D35'lik takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar .....                                                  | 109          |

| <b>Resim</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 6.5. (a) Asit işleminden önce (b) asit işleminden sonra varolan yüzeyaltı hasarları .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 111          |
| Resim 6.6. P120 zımparalama diskine ait (a) zımparalama işleminden önce (b) zımparalama işleminden sonra alınan yüzey görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                            | 120          |
| Resim 6.7. P320 zımparalama diskine ait (a) zımparalama işleminden önce (b) zımparalama işleminden sonra alınan yüzey görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                            | 121          |
| Resim 6.8. P120 ile zımparalanan numunede (a) zımpara giriş (b) yüzey (c) zımpara çıkış görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                                          | 122          |
| Resim 6.9. P220 ile zımparalanan numunede (a) zımpara giriş (b) yüzey (c) zımpara çıkış görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                                          | 123          |
| Resim 6.10. 250X büyütmede alınan (a) P120 ile zımparalanan numunenin (b) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri, 500X büyütmede alınan (c) P120 ile zımparalanan (d) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri, 1000X büyütmede alınan (e) P120 ile zımparalanan (f) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri ..... | 125          |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler      | Açıklamalar                                     |
|---------------|-------------------------------------------------|
| $\alpha_e$    | Kesme Derinliği                                 |
| $\alpha_{eG}$ | Parçacık Kesme Derinliği                        |
| $\alpha_m$    | Talaş Ortalama Kesit Alanı                      |
| $b$           | Plastik Bölge Derinliği                         |
| $b_b$         | Aktif Taşlama Takımı Profilinin Genişliği       |
| $b_s$         | Taşlama Takımının Genişliği                     |
| $b_w$         | Taşlama Takımı Temas Genişliği                  |
| $B$           | Kırılmalık                                      |
| $C$           | Aşındırıcı Parçacık Konsantrasyonu              |
| $ch$          | Hertz Çatlak Derinliği                          |
| $cl$          | Yanal Çatlak Uzunluğu                           |
| $cm$          | Orta Çatlak Derinliği                           |
| $C_p$         | Özısı                                           |
| $cr$          | Radyal Çatlak Derinliği                         |
| $C_i, N$      | Birim Alandaki Aktif Aşındırıcı Parçacık Sayısı |
| $C_p$         | Preston Katsayısı                               |
| $C^*$         | Başlangıç Giricilik Derinliği                   |
| $d$           | Nozul Çıkış Yüksekliği                          |
| $d_g$         | Elmas Parçacık Çapı                             |
| $d_s$         | Taşlama Takımının Çapı                          |
| $e, u$        | Spesifik Taşlama Enerjisi                       |
| $E$           | Elastik modülü                                  |
| $f_{gn}$      | Parçacık Başına Normal Taşlama Kuvveti          |
| $f_r$         | Adım Başına İlerleme                            |
| $F_0$         | Kırılma Kuvveti                                 |
| $F_n$         | Normal Taşlama Kuvveti                          |
| $F_{nG}$      | Parçacık Başına Normal Kuvvet                   |

**Simgeler****Açıklamalar**

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| $F_t$      | Teğetsel Taşlama Kuvveti                  |
| $F'_n$     | Spesifik Normal Taşlama Kuvveti           |
| $F'_t$     | Spesifik Teğetsel Taşlama Kuvveti         |
| $G$        | Taşlama Oranı                             |
| $h$        | Yanal Çatlak Derinliği                    |
| $h_{eq}$   | Eşdeğer Talaş Kalınlığı                   |
| $h_{max}$  | Azami Deforme Olmayan Talaş Kalınlığı     |
| $h_s$      | Yüzey Tarak Yüksekliği                    |
| $h_{slot}$ | Nozul Slot Kalınlığı                      |
| $H$        | Mikrosertlik                              |
| $K$        | Termal İletkenlik                         |
| $K_c$      | Kırılma Tokluğu                           |
| $K_s$      | Taşlama Takımı Elastik Katsayısı          |
| $K_w$      | İş Parçası Elastik Katsayısı              |
| $l_c$      | Gerçek Temas Uzunluğu                     |
| $l_f$      | Uygulanan Kuvvetten Dolayı Temas Uzunluğu |
| $l_g$      | Kesme Derinliğinden Dolayı Temas Uzunluğu |
| $l_n$      | Pürüzlülük Değerlendirme Uzunluğu         |
| $l_r$      | Pürüzlülük Örnekleme Uzunluğu             |
| $L$        | Aşındırıcı Parçacık Büyüklüğü             |
| $L_t$      | Örnekleme Uzunluğu                        |
| $N_d$      | Etkili Elmas Parçacık Sayısı              |
| $n$        | Kırıcılık İndeksi                         |
| $P$        | Uygulanan Yük                             |
| $P_c$      | Taşlama Gücü / Kesme Gücü                 |
| $P_t$      | Yüzey Profili                             |
| $P_v$      | Soğutucu Gücü                             |
| $P'$       | Kayar Uygulanan Yük                       |
| $P^*$      | Yüzeyaltı Hasarı Yaratmak İçin Asgari Yük |
| $Q_w$      | Malzeme Kaldırma Oranı                    |
| $Q'_w$     | Spesifik Malzeme Kaldırma Oranı           |
| $r_g$      | Elmas Parçacık Yarıçapı                   |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                                  |                                               |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Ra</b>                        | Aritmetik Yüzey Pürüzlülüğü                   |
| <b>Rc</b>                        | Taşılama Takımı Kesme Çapı                    |
| <b>Re</b>                        | Reynolds Sayısı                               |
| <b>Rt</b>                        | Yüzey Pürüzlülüğünün Toplam Yüksekliği        |
| <b>Rz</b>                        | Yüzey Pürüzlülüğünün En Yüksek Yüksekliği     |
| <b>V<sub>c</sub></b>             | Elmas Parçacık Lineer Hızı                    |
| <b>V<sub>frd</sub></b>           | Şekillendirmede Besleme Hızı                  |
| <b>V<sub>ft</sub></b>            | Takım İlerleme Hızı                           |
| <b>V<sub>rd</sub></b>            | Şekillendirmede Form Disk Hızı                |
| <b>V<sub>slot</sub></b>          | Soğutucu Sıvı Hızı                            |
| <b>V<sub>w</sub></b>             | İş Parçası İlerleme Hızı                      |
| <b>V<sub>s</sub></b>             | Taşılama Takımı Poisson Oranı                 |
| <b>V<sub>w</sub></b>             | İş Parçası Poisson Oranı                      |
| <b>z, d</b>                      | Giricilik Derinliği                           |
| <b><math>\alpha</math></b>       | Termal Genleşme Katsayısı                     |
| <b><math>\alpha_h</math></b>     | Uygun Eğim Açısı (Hertz)                      |
| <b><math>\alpha_{l,r}</math></b> | Çatlaklar İçin Sabit                          |
| <b><math>\beta, \phi</math></b>  | İş Parçası ve Taşılama Takımı Arasındaki Açrı |
| <b><math>\beta_s</math></b>      | Takımdaki Aşındırıcı Parçacık Gücü            |
| <b><math>\Delta V_s</math></b>   | Taşılama Takımı Aşınması Hacmi                |
| <b><math>\Delta V_w</math></b>   | Kaldırılan Malzeme Hacmi                      |
| <b><math>\eta</math></b>         | Viskozite                                     |
| <b><math>\psi</math></b>         | Girinti Açısı                                 |
| <b><math>\Omega</math></b>       | Çatlak Uzunluğu                               |
| <b><math>\rho</math></b>         | Yoğunluk                                      |
| <b><math>\mu</math></b>          | Sürtünme Katsayısı                            |
| <b><math>\gamma</math></b>       | Poisson Oranı                                 |
| <b><math>\gamma_d</math></b>     | Abbe Sayısı                                   |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| <b>ASTM</b> | Amerikan Malzeme ve Test Derneği |
| <b>BoX</b>  | Big OptiX (Büyük Optik)          |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****CNC**

Bilgisayar Sayımlı Yönetim

**EDS**

Elemental Yapı Analizi

**ELID**

Süreç Esnasında Elektrolitik Şekil Verme

**FAG/LAG**

Sabit/Gevşek Aşındırıcı Taşlama

**IBF**

İyon Demetiyle Şekillendirme

**ISO**

Uluslararası Standartlar Kuruluşu

**IBF**

İyon Demetiyle Şekillendirme

**LOG**

Geniş Optik Üreteci

**Nd:YAG**

Neodiyum Dop Edilmiş İttriyum Alüminyum Granat

**OAGM**

Eksen Dışı (Off Axis )Üretim Makinesi

**RMS**

Karekök Ortalama

**SEM**

Taramalı Elektron Mikroskobu

**SiC**

Silisyum Karbür

**SPDT**

Elmas Uçlu Tornalama Sistemi



## 1. GİRİŞ

Önemli, bilimsel ve yüksek teknoloji mühendislik projelerinin sayısı artıkça ayna, lens, prizma, filtre gibi optik malzemelere olan talepte artar. Atalet füzyon çalışmaları, astronomik gözlem sistemleri, yer gözlem uydu kameraları ve litografi sistemlerinin geliştirilmesi talebin artmasına neden olan ana projelerdir. Moore yasası, çip başına transistör sayısının her iki yılda ikiye katlanacağını belirtir. Bunun doğru olabilmesi için, litografi teknolojisinin sürekli olarak gelişmesi gerekir. Bu durum, çok miktarda yüksek kaliteli optik bileşen ihtiyacı doğurur [1]. Benzer talebi, yer gözlem uydularında yer alan elektrooptik kameralar da yaratır.

Alçak dünya yörüngesindeki en az 1 metre çözünürlüğe sahip yer gözlem uydularında yer alan kameraların birincil aynaları, en az 50 cm çapta, arka boşaltma işlemi ile ağırlığı en az %65 oranında azaltılmış, titreşim ve şok dayanıklılığı en az 20 g olan, termal genleşme katsayısı neredeyse sıfır olan cam veya cam / seramik malzemeden geliştirilir.

Türkiye'nin yerli imkanlarla milli uydu geliştirme projesi kapsamında yürütülen İMECE uydu projesinin elektrooptik kamera faydalı yükünün aynaları da Zerodur®'dan oluşmaktadır. Böyle önemli projelerde kullanılan kritik parçaları yurt dışından tedarik etmek zorunda kalmamak için, yerli ve milli imkanlarla yurt içinde geliştirmek amacı bu tez için ilham kaynağı olmuştur.

Uydu teknolojilerinde kullanılan cam ve cam / seramiklerin karakteristik özellikleri ve ham malzeme yapısındaki bozuklukların optik işleme ve kullanım esnasında yol açabileceği problemler belirlenmiştir. Zerodur®'dan ve ULE®'den, yerli üretim teknikleri ile ayna alttaş malzemesi geliştirmek için belirlenen işleme parametreleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyaltı hasarları açısından değerlendirilmiştir. Çünkü yüzey pürüzlülüğü görüntü kalitesini etkilerken, yüzeyaltı hasarları mekanik dayanıklılığı azaltır. Özellikle uydu optiklerinde, uydunun yerleşeceği yörüngeye göre, fırlatma sırasında maruz kalacağı en az 20 g'lık titreşim ve şok yükleri, malzemenin yüzeyaltı hasarlarının olduğu noktalardan çatlamasına ve kırılmasına sebep olur. İşleme parametresine göre, elde edilecek yüzey pürüzlülüğü ve bu malzemeden yeni hasarlar oluşturmayacak şekilde ne kadar talaş kaldırılması gerektiği konusunda kendi bilgi birikimimiz oluşturulmuştur.

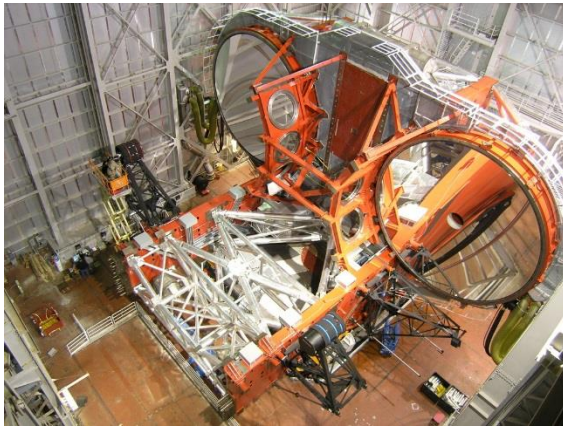


## 2. DÜŞÜK TERMAL GENLEŞME KATSAYISINA SAHİP CAM VE CAM / SERAMİKLER

### 2.1. Kullanım Alanları

Zerodur<sup>®</sup>, ULE<sup>®</sup>, Clearceram<sup>®</sup>, AstroSital<sup>®</sup> isimli malzemelerin üstün mekanik mukavemet, yüksek aşınma direnci ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikler sergilemesinden dolayı optik, astronomi, havacılık ve uzay, tıp ve savunma sanayi sektörlerinde geniş bir uygulama alanı vardır [2].

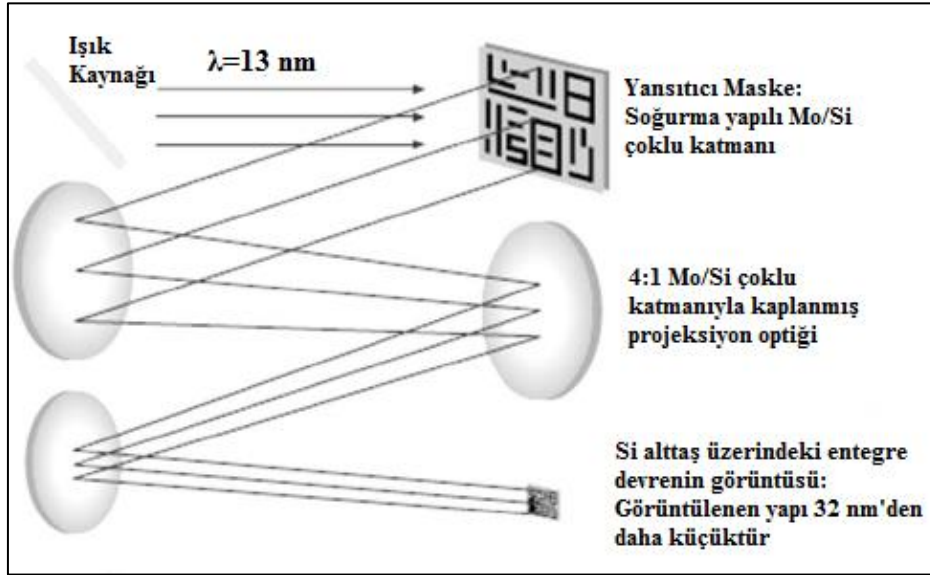
Çok eski tarihlerden günümüze kadar, doğa bilimcileri yıldızları ve gezegenleri inceler. Astronomi tarihi uzaya daha yakından bakmak için geliştirilen araçlarla birlikte gelişmektedir. Yakın tarihte de teleskoplar bu amaçla kurulmuş ve Kepler, Galileo, Huygens ve Newton gibi ünlü bilim adamları tarafından kullanılmıştır. Geçen yüzyılda, daha büyük teleskopların gelişimi dramatik bir şekilde artmıştır. Cassegrain teleskop tasarımı gibi farklı montaj ve mekanik konseptler uygulansa da alttaşı malzemesi olarak düşük termal genleşme katsayısına sahip cam ve cam /seramiklerin kullanıldığı büyük bir yekpare birincil aynaya ihtiyaç her zaman vardır. Azami boyuta, Arizona binoküler teleskobu için 8,4 m'lik birincil ayna ile ulaşılmıştır [3]. Bu ayna Arizona Üniversitesi, Steward Gözlemevi Ayna Laboratuvarında geliştirilmiştir. 2000'li yıllardan bu yana büyük birincil teleskop aynaları oluşturmak için nispeten yeni bir tasarım geliştirildi. Birincil aynayı tek parça oluşturmak yerine, Hawaii'deki Keck Teleskobu'nun birincil aynası gibi altıgen parçalara ayrılmış parçalar monte edilir.



Resim 2.1. Arizona Binoküler Teleskobu [4]

Başka diğ er önemli bilimsel projelerde ve yüksek teknoloji mühendislik uygulamalarında da ileri üretim teknolojilerinin gelişmesi ile büyük boyutlu, hassas optikler için talep artmıştır.

Litografi sistemleri başta entegre devreler üretmek için kullanılmaktadır. Daha küçük özellik boyutlarına olan ihtiyaç, teknoloji ve optikte bir iyileştirme doğurmuştur. Litografi cihazı üreten bazı ana şirketler Nikon, Canon, Zeiss ve ASML'dir. Bu şirketler stepper teknolojisi, tarayıcı teknolojisi ve son olarak da ekstrem mor ötesi litografi sistemi geliştirmişlerdir. Bu litografi sisteminde, görüntüleme ışınları lensler veya optikler aracılığı ile kırılmak yerine aynalardan yansıtılmaktadır [5]. Litografi maskeleri, BK7 veya ULE<sup>®</sup>, Zerodur<sup>®</sup> gibi düşük termal genleşme katsayılı optik malzemelerden yapılmıştır. Malzeme yüzeyindeki en tepe ve en çukur nokta arasındaki mesafe 50 nm'den daha düşük olmalıdır.



şekil 2.1. Mor  tesi litografi optik sistemi [5]

ABD'deki Ulusal Ateşleme Tesisi ve bunun Fransa'daki eşdeğeri Lazer Megajoule, lazerle sınırlı nükleer füzyon projelerinde, yine büyük ve çok sayıda aynaya ihtiyaç duymaktadır. Ulusal Ateşleme Tesisi, 500 mm ile 1000 mm çapa sahip 7360 optiğe ihtiyaç duymaktadır [6]. Kısa zaman aralıklarında büyük optik talepleri nedeniyle, bu projeler optik üretim ve ölçümlerin geliştirilmesini sağlamıştır.

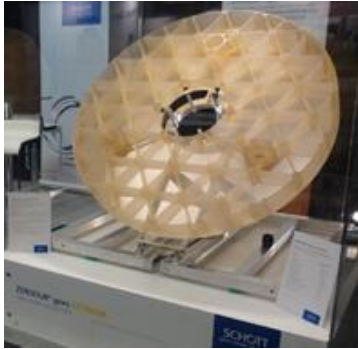
Kara, hava, deniz ve uzay araçları navigasyon sistemlerinin açısal hareket algılamasında jiroskoplardan faydalanılır. Optoelektronik teknolojilerinin gelişmesi ile de fiber optik

jiroskoplara olan ilgi artmaktadır. Bu jiroskopların halka lazer düzeneği yine termal genleşme katsayısı düşük cam ve cam seramik malzemelerden yapılır.



Resim 2.2. Halka Lazer Jiroskop [7]

Yer gözlem uyduları şu anda dünya etrafında dönen tüm operasyonel uyduların üçte birini oluşturmaktadır. Nisan 2018 sonunda 1886 tane operasyonel uydu vardı ve bunun 684 tanesi yer gözlemi amacına sahiptir [8]. Yer gözlem uydularının elektrooptik kamera faydalı yükü için de arka boşaltma işlemi ile ağırlığı azaltılmış düşük termal genleşme katsayılı optiklere ihtiyaç vardır. Zerodur® malzemeden Schott firması tarafından üretilen 1,2 m çapında arkası boşaltılmış ayna alttaş malzemesi Resim 2.3'te verilmiştir. Komsat-3A yer gözlem uydusu 528 km irtifada, siyah beyaz bantta 0,55 m çözünürlüğe sahiptir. Bu uydunun kamerası 5 adet Zerodur® aynadan oluşmaktadır ve birincil aynası 80 cm çapa sahiptir [9]. CartoSat-2B uydusu ise 637 km irtifada, siyah beyaz bantta 0,80 m çözünürlüğe sahiptir. Optik sistem tasarımı 2 ayna ile yapılmıştır ve ikiside Zerodur® malzemeden üretilmiştir. Birincil aynası 70 cm çapa sahiptir [10]. Bu örneklere Pleiades, Alos-3 gibi başka birçok uydu daha ekleyebiliriz. Bunun dışında astronomik gözlem amaçlı gönderilen AstroSat veya meteorolojik gözlem amaçlı gönderilen MeteoSat uydusu gibi diğer amaçlı uydularda da genleşme katsayısı düşük cam ve cam / seramik malzemeler kullanılmıştır.



Resim 2.3. Uzay teleskopları veya uydular için Zerodur® malzemeden Schott firması tarafından üretilen 1,2 m çapında arkası boşaltılmış ayna alttaş malzemesi [11]

## 2.2. Malzeme Kalitesini Belirleyen Karakteristik Özellikler

Malzemelerin üretimi sırasında malzeme içinde bazı kusurlar meydana gelir. Oluşan bu kusurlar, ISO 9802:1996 standardında yer alan tanımlara uygun olarak ifade edilir. Bu standarda göre malzeme içinde meydana gelen kusurlar aşağıdaki gibi tanımlanır;

**Homojensizlik:** Bir camda kırıcılık indisinin değişimidir. Damarlanma olarak adlandırılan keskin, şerit benzeri bölgeler şeklinde olabilir veya numunenin daha büyük bir bölgesi boyunca kırıcılık indisinin bir gradyanı olarak oluşabilir.

**Damarlanma:** Bir camın içerisinde dalgalı deformasyonlar şeklinde görünür ve genellikle kırıcılık indeksinde bölgesel bir değişimi temsil eden camın iç kusurlarıdır.

**Baloncuk:** Camdaki gaz kalıntısıdır (gazla dolu boşluk).

**Düğüm:** Genellikle konik bir kuyruğa sahip çentik benzeri inklüzyonlardır. Taş olarak görülecektir.

**Inklüzyonlar:** Camın içerisindeki baloncuk, düğüm, taş gibi yabancı maddelerdir.

**Taş:** Eritme işlemi sırasında çözülmemiş ham madde veya refrakter malzemenin opak kalıntılarıdır.

**Yonga:** Çapı 0,5 mm'den daha küçük gaz inklüzyonlarıdır.

**Büyük baloncuklar:** Elips şeklinde 6 mm'den daha uzun baloncuklardır.

Termal genleşme katsayısı düşük cam ve cam/seramik malzemelerin üretimini yapan firmalar, malzeme kalınlığı ve hacmine bağlı olarak malzeme kalitesini belirleyen bazı sınıflar belirlemiştir. Hangi sınıftan malzeme seçileceğine uygulama alanına göre karar verilir.

Uzay uygulamalarında, elektrooptik kamera optikleri için 1. Sınıf ve gelişmiş sınıf tercih edilir. Çünkü yapı içinde yer alan bozukluklar işleme ve kullanım esnasında sorunlar yaratır. Malzeme içerisindeki damarlı yapı, bu bölgenin yük altında olmasına sebep olur ve bu bölgeler malzemenin dayanabileceğinden daha az kuvvette bile kullanılmaz hale gelmesine sebep olur. Özellikle titreşim testlerinde bu bölgelere bağlı olarak kırılma ve çatlamlar meydana gelir. Bir başka kusur olan malzeme içi baloncuk yapısı malzemenin dayanımını bölgesel olarak zayıflatır. Ayrıca gözle görülemeyecek kadar küçük ebatlı boşluklar parçanın işleme operasyonları sonrası parçanın optik yüzeyinde ortaya çıkarsa sistem bazında optik bir kusura sebep olur. Yansıtıcı yüzeyde ortaya çıkan mikron mertebesindeki

çukur yapı parçanın gerekli optik ve yüzeysel toleransları sağlayamamasına neden olur. Ek olarak, boşlukların veya baloncukların ağırlık hafifletme yapılacak aynalarda aynanın mukavemetini sağlayan iç duvarlara denk gelmesi sonucu malzemede mekanik zayıflamaya neden olur.

### 2.3. Camlar

Camlar saydam veya yarı saydam görünürlüğe sahip, genellikle sert, kırılğan olan, inorganik amorf yapıda katı malzemelerdir. Günümüzde basit araç gereçlerden iletişime ve uzay teknolojilerine kadar çok yaygın bir kullanım alanı vardır. Ana maddesi silisyumdur. Amorf yapısını koruyarak katılaşır. Üretim sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı yerine amorf yapı oluşur. Bu yapı cama saydamlık ve sağlamlık özelliğini kazandırır. Katılarda görülen kristallenme özelliklerini göstermediği için sıvı olarak adlandırıldığı da olur. Bu adlandırma esasen amorf yapısından dolayıdır.

Termal genleşme katsayısı neredeyse sıfır olan, özel uygulamalarda en çok kullanımı olan cam malzeme ULE®'dir

#### 2.3.1. ULE®

Camlara en iyi örnek Amerika'da Corning Inc. firması tarafından geliştirilen ULE® (*Ultra Low Expansion Glass*) verilebilir [12]. Sert ve kırılğan bir malzemedir. Titanyum katkılı (% 7,5 TiO<sub>2</sub>) silikadan (% 92,5 SiO<sub>2</sub>) imal edilmiş amorf bir camdır dolayısıyla kristal faza sahip değildir. Oda sıcaklığında termal genleşme katsayısı saf silikaya göre 20 kat daha küçüktür [13]. 5 ile 35 °C arasında termal genleşme katsayısı  $0 \pm 30 \times 10^{-9} / K$ 'dir [14]. Mühendislik uygulamalarında çok fazla uygulama alanı bulan ULE®'nin kütük formu ve işlenmiş hali Resim 2.4'te verilmiştir.



Resim 2.4. ULE® camlar ve çeşitli uygulamalar için işlenmiş hali [14]

Üretici firma malzeme kalitesini belirleyen karakteristik özelliklerini 4 sınıfa ayırmıştır. Hangi sınıftan malzeme kullanılacağına uygulama alanına göre karar verilir. Çizelge 2.1’de ULE® için kalite sınıflandırması verilmiştir [14].

Çizelge 2.1. ULE® kalite sınıflandırması

|                | Termal Genleşme Katsayısındaki En Yüksek Değişim (nm/°C) |                | Optik Gecikme        | İnklüzyonlar                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                      |                                                      |
|----------------|----------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Sınıf          | Radyal Aralık                                            | Eksenel Aralık | Çift Kırılım (nm/cm) | İnklüzyon Durumu                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Çap <20"                                             | Çap 20" - 56"                                        |
| Premium Sınıf  | 10                                                       | 10             | 10                   | En büyük inklüzyon çapı:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki inklüzyonlar:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki ortalama inklüzyon sayısı:                                                                                                                                                                            | 0,040"<br>4<br>0,1                                   | Uygulanabilir değil                                  |
| Ayna Sınıfı    | 15                                                       | 15             | 20                   | Kritik Hacim:<br>En büyük inklüzyon çapı:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki inklüzyonlar:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki ortalama inklüzyon sayısı:<br>Kritik Olmayan Hacim:<br>En büyük inklüzyon çapı:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki inklüzyonlar:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki ortalama inklüzyon sayısı: | 0,040"<br>4<br>0,1<br>0,100"<br>Belirtilmemiş<br>0,2 | 0,080"<br>6<br>0,2<br>0,250"<br>Belirtilmemiş<br>0,6 |
| Standart Sınıf | 15                                                       | 15             | 20                   | En büyük inklüzyon çapı:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki inklüzyonlar:<br>Bir inç <sup>3</sup> 'teki ortalama inklüzyon sayısı:                                                                                                                                                                            | 0,100"<br>Belirtilmemiş<br>0,2                       | 0,250"<br>Belirtilmemiş<br>0,6                       |
| Takım Sınıfı   | Uygulanabilir değil                                      |                |                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                      |                                                      |

### ULE<sup>®</sup>'nin termal, mekanik ve optik özellikleri

ULE<sup>®</sup>'ye ait termal özellikler Çizelge 2.2'de, mekanik özellikler Çizelge 2.3'de, optik özellikler Çizelge 2.4'de verilmiştir [14].

Çizelge 2.2. ULE<sup>®</sup> termal özellikler

|                                                             |                           |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Termal Genleşme Katsayısı (5 °C ; 35 °C) (K <sup>-1</sup> ) | 0 ± 30 x 10 <sup>-9</sup> |
| Termal İletkenlik (K) (W/(m °C))                            | 1,31                      |
| Termal Dağılma (D) (cm <sup>2</sup> /s)                     | 0,0079                    |
| Ortalama Özgül Isı (C <sub>p</sub> ) (J/(kg °C))            | 767                       |
| Katılaşma Sıcaklığı (°C)                                    | 890                       |
| Tavlama Noktası (°C)                                        | 1000                      |
| Yumuşama Sıcaklığı (°C)                                     | 1490                      |

Çizelge 2.3. ULE<sup>®</sup> mekanik özellikler

|                                                 |                        |
|-------------------------------------------------|------------------------|
| Poisson Oranı (ν)                               | 0,17                   |
| Kopma Dayanıklılığı (MPa)                       | 49,8                   |
| Mikro Sertlik (200 g yük) (kg/mm <sup>2</sup> ) | 460                    |
| Yoğunluk (ρ) (g/cm <sup>3</sup> )               | 2,21                   |
| Özgül Sertlik (E/ρ) (m)                         | 3,12 x 10 <sup>6</sup> |
| Kesme Modülü (G) (GPa)                          | 29,0                   |
| Hacim Modülü (K) (GPa)                          | 34,1                   |
| Elastik Modülü (E) (GPa)                        | 67,6                   |

Çizelge 2.4. ULE<sup>®</sup> optik özellikler

|                                                         |                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gerilme Optik Katsayısı ((nm/cm)/(kg/cm <sup>3</sup> )) | 4,15                                                                                               |
| Kırıcılık İndeksi                                       | n <sub>F</sub> (486 nm) 1,4892<br>n <sub>D</sub> (589 nm) 1,4828<br>n <sub>C</sub> (656 nm) 1,4801 |
| Abbe Sayısı (ν <sub>d</sub> )                           | 53,1                                                                                               |

## **2.4. Cam Seramikler**

Cam seramikler, amorf ve bir veya daha fazla kristalin fazlara sahiptirler. Cam imalatında istenmeyen kendiliğinden kristallenmenin aksine, genellikle kontrollü kristalleşme yöntemiyle üretilir. Cam seramikler, camın imalat avantajına ve aynı zamanda seramiklere özgü özelliklere sahiptirler. Yüksek mukavemet, sıfır gözeneklilik, düşük veya hatta negatif termal genleşme, işlenebilirlik, yüksek kimyasal dayanıklılık gibi özellikler taban cam

bileşiminin kontrol edilmesi ve baz camın kontrollü ısıtılma işlemi kristalizasyonu ile uyarlanabilir.

Cam seramikler çoğunlukla iki adımda üretilir. Birincisi, bir cam üretim süreci ile bir cam oluşturulur. Cam soğutulur ve daha sonra ikinci bir adımda tekrar ısıtılır. Bu ısıtılma işleminde cam kısmen kristalize olur. Çoğu durumda, çekirdeklenme ajanları, cam seramik baz bileşimine eklenir. Bu çekirdeklenme ajanları, kristalleşme sürecine yardım eder ve kontrol eder. Genellikle presleme ve sinterleme olmadığından, cam seramiklerin sinterlenmiş seramiklerin aksine gözenekleri yoktur.

Optik malzeme olarak en yaygın kullanımı olan cam seramikler Zerodur<sup>®</sup>, Clearceram<sup>®</sup>, AstroSital<sup>®</sup>’dir.

#### **2.4.1. Zerodur<sup>®</sup>**

Zerodur<sup>®</sup>, Almanya’da Schott GmbH tarafından üretilen, çok büyük boyutlarda bile stabil olabilen ve büyük ölçekli optik bileşenler için mükemmel bir potansiyel malzeme olan, hem cam hem de kristal faz içeren cam – seramiktir. Kuvars yapılı %70-80 kristalin faz içerir. Zerodur<sup>®</sup>, cam - seramik özelliği sergileyen ana camın özel bir bileşimidir [15]. Bir kalıntı cam fazında eşit olarak dağılmış nano kristaller ile karakterize edilen inorganik, gözeneksiz lityum-alüminyum-silikon oksit cam seramiktir. İki aşamalı bir işlem kullanılarak üretilir [16]. Tanımlanmış çekirdeklenme ve kristalleşme koşulları ile çok düşük termal genleşmeye sahip bir malzeme elde edilir [15]. Zerodur<sup>®</sup>, bir fırında bileşen oksitlerinin eritilmesi ile yapılır. Erimiş cam homojenleştirilir ve daha sonra gerekli şekil ve boyutların oluşturulması için metal kalıplara dökülür. Cam kütükler, gerilimi azaltmak için tavlanır ve “seramizasyon” olarak adlandırılan ısıtılma işlemine tabi tutulur. Bu seramizasyon aşaması sırasında, kristalitler camda çekirdeklenir ve birkaç yüz angstrom boyutuna ulaşırlar. Kristal fazın termal genleşme katsayısı negatif olurken ana cam pozitif termal genleşmeye sahiptir. Kristal fazın kalıntı cam oranına dikkatli kontrolü, termal genleşme katsayısı neredeyse sıfır olan bir cam – seramik malzeme ile sonuçlanır [17].

Zerodur<sup>®</sup> cam seramiği aynı zamanda yüksek homojenliğe sahip bir malzemedir, hatta birkaç metrelik boyutlarda bile, neredeyse ölçülemeyen sapmalara sahip termal ve mekanik özellikler gösterir [15]. Zerodur<sup>®</sup> tamamen yönsüz bir yapıya ve gözeneksiz bir yüzeye

sahiptir [18]. Bu nedenlerden dolayı, cam seramik olağanüstü özelliklere sahip bir malzemedir. Optik camlara benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere, sertlik değerine sahiptir. Diğer optik camlarla aynı tezgah ve takımlar kullanılarak işlenir. Farklı uygulamalar için işlenen Zerodur® malzemeler Resim 2.5'te verilmiştir.



Resim 2.5. Zerodur® cam seramik malzemenin çeşitli uygulamalar için form verilmiş hali

Üretici firma malzeme kalitesini belirleyen karakteristik özelliklerinden termal genleşme katsayısı toleransını 3, termal genleşme katsayısı ölçüm doğruluğunu 2, iç kalitesini gösteren yabancı madde – baloncuk var olmasını 6, hacimsel gerilimi 2, damarlanmayı 5 sınıfa ayırmıştır. Bunlar sırasıyla Çizelge 2.5, 2.6, 2.7, 2.8'de verilmiştir [19].

Çizelge 2.5. Zerodur® termal genleşme katsayısı sınıflandırması

| Termal Genleşme Katsayısı Toleransı (0 °C ; 50 °C) |                                 |                                 |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Sınıf 0                                            | $0 \pm 0,02 \times 10^{-6} / K$ |                                 |
| Sınıf 1                                            | $0 \pm 0,05 \times 10^{-6} / K$ |                                 |
| Sınıf 2                                            | $0 \pm 0,10 \times 10^{-6} / K$ |                                 |
| Termal Genleşme Katsayısı Ölçüm Doğruluğu          | Doğruluk                        | Tekrarlanabilirlik (%95)        |
| Standart                                           | $\pm 0,010 \times 10^{-6} / K$  | $\pm 0,0050 \times 10^{-6} / K$ |
| Gelişmiş                                           | $\pm 0,006 \times 10^{-6} / K$  | $\pm 0,0012 \times 10^{-6} / K$ |

Çizelge 2.6. Zerodur® inklüzyon sınıflandırması

| İnklüzyon - Baloncuk                                                              | Standart | Sınıf 4 | Sınıf 3 | Sınıf 2 | Sınıf 1 | Sınıf 0 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 100 cm <sup>3</sup> başına ortalama inklüzyon sayısı                              | 5,0      | 5,0     | 4,0     | 3,0     | 2,0     | 1,0     |
| Farklı Büyüklüklerdeki Malzemelerde İnklüzyonların mm Cinsinden En Yüksek Çapları |          |         |         |         |         |         |
| Kritik Hacim                                                                      | Standart | Sınıf 4 | Sınıf 3 | Sınıf 2 | Sınıf 1 | Sınıf 0 |
| <500 mm                                                                           | 1,4      | 1,2     | 1,0     | 0,8     | 0,6     | 0,4     |
| <2000 mm                                                                          | 2,0      | 1,8     | 1,6     | 1,5     | 1,2     | 1,0     |

Çizelge 2.6. Zerodur® inklüzyon sınıflandırması

|                      |          |         |         |         |         |         |
|----------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <4000 mm             | 3,0      | 2,5     | 2,0     | 1,8     | 1,6     | 1,5     |
| Kritik Olmayan Hacim | Standart | Sınıf 4 | Sınıf 3 | Sınıf 2 | Sınıf 1 | Sınıf 0 |
| <500 mm              | 3,0      | 2,0     | 1,5     | 1,0     | 0,8     | 0,6     |
| <2000 mm             | 6,0      | 5,0     | 4,0     | 3,0     | 3,0     | 3,0     |
| <4000 mm             | 10,0     | 8,0     | 6,0     | 6,0     | 6,0     | 6,0     |

Çizelge 2.7. Zerodur® hacimsel gerilim sınıflandırması

| Farklı Büyüklüklerdeki Malzemeler için Hacimsel Gerilim Çift Kırılımı (nm/cm) |          |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
| Kritik Hacim                                                                  | Standart | Sınıf 4 |
| <500 mm                                                                       | 6        | 4       |
| <2000 mm                                                                      | 12       | 10      |
| <4000 mm                                                                      | 15       | 12      |

Çizelge 2.8. Zerodur® damarlanma sınıflandırması

| Farklı Büyüklüklerdeki Malzemeler için Damarlanmanın Neden Olduğu Çift Kırılım (nm/damarlanma) |          |         |         |         |         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Kritik Hacim                                                                                   | Standart | Sınıf 4 | Sınıf 3 | Sınıf 2 | Sınıf 1 |
| <500 mm                                                                                        | 60       | 45      | 30      | 5       | -       |
| <2000 mm                                                                                       | 60       | 45      | 30      | 30      | 5       |
| <4000 mm                                                                                       | 60       | 45      | 30      | 30      | 30      |

Zerodur®'un termal, mekanik ve optik zellikleri

Zerodur®'a ait termal özellikler Çizelge 2.9'da, mekanik özellikler Çizelge 2.10'da, optik özellikler Çizelge 2.11'de verilmiştir [19].

Çizelge 2.9. Zerodur® termal özellikler

|                                                  |        |
|--------------------------------------------------|--------|
| Termal İletkenlik (K) (W/(m K))                  | 1,46   |
| Termal Dağılma (D) (cm <sup>2</sup> /s)          | 0,0072 |
| Ortalama Özgül Isı (C <sub>p</sub> ) (J/(kg °C)) | 800    |

Çizelge 2.10. Zerodur® mekanik özellikler

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Poisson Oranı (ν)                   | 0,24 |
| Mikro Sertlik (kg/mm <sup>2</sup> ) | 620  |
| Yoğunluk (ρ) (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,53 |
| Elastik Modülü (E) (GPa)            | 90,3 |

Çizelge 2.11. Zerodur® optik özellikleri

|                                                         |        |
|---------------------------------------------------------|--------|
| Gerilme Optik Katsayısı ((nm/cm)/(kg/cm <sup>3</sup> )) | 3,0    |
| Kırıcılık İndeksi (n <sub>D</sub> )                     | 1,5424 |
| Abbe Sayısı (v <sub>d</sub> )                           | 56,1   |

#### 2.4.2. Clearceram®

Diğer bir cam seramik malzeme, Clearceram®, Japonya’da Ohara Inc. firmasının yüksek homojen eritme ve hassas kristalizasyon bilgilerine dayanarak üretilmektedir. Sıkıca kontrol edilen koşullar altında üretilir ve olağanüstü termal, mekanik ve kimyasal özellik sunar. Rijitlik, eğilme dayanımı ve mikro sertlik gibi özellikleri karşılaştırarak mekanik özellikleri normal amorf camdan üstün kılan yaklaşık %70 seramik malzemeden oluşur. Clearceram®’in kristal tane yapısı, işleme prosesleri sırasında oluşabilecek mikroskobik çatlakların yayılmasını önler. Bu özellik malzemeye üstün işlenebilirlik sağlar ve yüksek doğruluk ve yüksek verim oranları ile çeşitli şekillerde işlenmesini sağlar. Su jeti uygulaması için Clearceram® malzemenin işlenmiş hali resim 2.6’da verilmiştir.



Resim 2.6. Clearceram® cam seramik malzemeden geliştirilen su jeti

Üretici firma malzeme kalitesini belirleyen karakteristik özelliklerinden termal genleşme katsayısını CCZ Normal ve CCZ Üstün olmak üzere 2 sınıfa, iç kalitesini gösteren inklüzyon – baloncuk var olmasını ve damarlanmayı 4 sınıfa ayırmıştır. İç kalite 200 mm x 3 200 mm x 80 mm ve 200 – 500 mm x 700 mm x 80 mm boyutlarındaki ürünlerle kontrol edilir. Termal genleşme katsayısı açısından sınıflandırma Çizelge 2.12’de, 0.1 mm’den büyük tüm baloncuk ve inklüzyonları içeren sınıflandırma Çizelge 2.13’te, yüksek yoğunluklu ışıkla tek yönde denetlenen damarlanma sınıflandırması Çizelge 2.14’te verilmiştir [20].

Çizelge 2.12. Clearceram® termal genleşme katsayısı sınıflandırması

| Malzeme            | Termal Genleşme Katsayısı (0 °C ; 50 °C) |
|--------------------|------------------------------------------|
| CCZ Regular (1/°C) | $0,0 \pm 1,0 \times 10^{-7}$             |
| CCZ HS (1/°C)      | $0,0 \pm 0,2 \times 10^{-7}$             |

Çizelge 2.13. Clearceram® inklüzyon baloncuk sınıflandırması

| Sınıf                                                                         | C1     | C2                   | C3                   | C4 (Standart)        |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 100 cm <sup>3</sup> 'teki baloncukların toplam kesit alanı (mm <sup>2</sup> ) | < 0,03 | $\geq 0,03$<br>< 0,1 | $\geq 0,1$<br>< 0,25 | $\geq 0,25$<br>< 2,0 |

Çizelge 2.14. Clearceram® damarlanma sınıflandırması

| Sınıf         | Sınıf Tanımı                                       |
|---------------|----------------------------------------------------|
| C1            | Görünür damarlanma yok                             |
| C2            | Damarlanma hafif ve dağınıktır                     |
| C3            | Sadece hafif ve paralel damarlanma tespit edilir   |
| C4 (Standart) | C3 sınıfı için geçerli olmayan herhangi bir durum. |

Clearceram®'in termal, mekanik ve optik özellikleri

Clearceram®'a ait termal özellikler Çizelge 2.15'te, mekanik özellikler Çizelge 2.16'da, optik özellikler Çizelge 2.17'de verilmiştir.

Çizelge 2.15. Clearceram® termal özellikleri

| Malzeme                                          | CCZ Normal | CCZ Üstün |
|--------------------------------------------------|------------|-----------|
| Termal İletkenlik (K) (W/(m K))                  | 1,51       | 1,52      |
| Termal Dağılma (D) (cm <sup>2</sup> /s)          | 0,00762    | 0,00775   |
| Ortalama Özgül Isı (C <sub>p</sub> ) (J/(kg °C)) | 777        | 773       |

Çizelge 2.16. Clearceram® mekanik özellikleri

| Malzeme                             | CCZ Normal | CCZ Üstün |
|-------------------------------------|------------|-----------|
| Poisson Oranı (ν)                   | 0,25       | 0,25      |
| Mikro Sertlik (kg/mm <sup>2</sup> ) | 600        | 590       |
| Yoğunluk (ρ) (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,55       | 2,55      |
| Elastik Modülü (E) (GPa)            | 90         | 92        |
| Eğilme Mukavemeti (MPa)             | 116        | 122       |
| Rijitlik (GPa)                      | 36         | 37        |

Çizelge 2.17. Clearceram® optik özellikleri

| Malzeme                     | CCZ Normal | CCZ Üstün |
|-----------------------------|------------|-----------|
| Kırıcılık İndeksi ( $n_D$ ) | 1,546      | 1,546     |
| Abbe Sayısı ( $v_d$ )       | 55,5       | 54,9      |

### 2.4.3. AstroSital®

AstroSital®’de düşük termal genleşme katsayısına sahip, kristal faz içeren cam seramiktir. İlk olarak eski Sovyetler Birliği’nde üretildi ve Rus Maksutov teleskopları için birincil ayna yapımında kullanıldı [21]. AstroSital®’de önemli sıcaklık değişimlerinde lineer boyutlarda ve yüzey formunda stabilite gerektiren optik parçaların üretiminde kullanılmak için ideal bir malzemedir. Diğer düşük termal genleşme katsayılı malzemeler gibi AstroSital®’de de termal kararlılık, test işlemlerinin termal dengeye ulaşana kadar beklemeden gerçekleşeceğinden yüksek hassasiyetli aynaların daha hızlı bir şekilde işleminden geçirilmesini sağlar. -60 ile 60 °C arasında termal genleşme katsayısı  $0.0 \pm 1,5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ’dir [22].



Resim 2.7. AstroSital® cam seramik malzemenin çeşitli uygulamalar için şekillendirilmiş hali

#### AstroSital®’in termal, mekanik ve optik özellikleri

AstroSital®’e ait termal özellikler Çizelge 2.18’de, mekanik özellikler Çizelge 2.19’da, optik özellikler Çizelge 2.20’de verilmiştir.

Çizelge 2.18. AstroSital<sup>®</sup> termal özellikleri

|                                                                |                            |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Termal Genleşme Katsayısı (-60 °C ; 60 °C) (°C <sup>-1</sup> ) | 0 ± 1,5 x 10 <sup>-7</sup> |
| Termal İletkenlik (K) (kilokalori/(h m °C))                    | 1,71                       |
| Ortalama Özgül Isı (C <sub>p</sub> ) (kilokalori/(kg °C))      | 0,22                       |
| Termal Direnç (°C)                                             | 550                        |

Çizelge 2.19. AstroSital<sup>®</sup> mekanik özellikleri

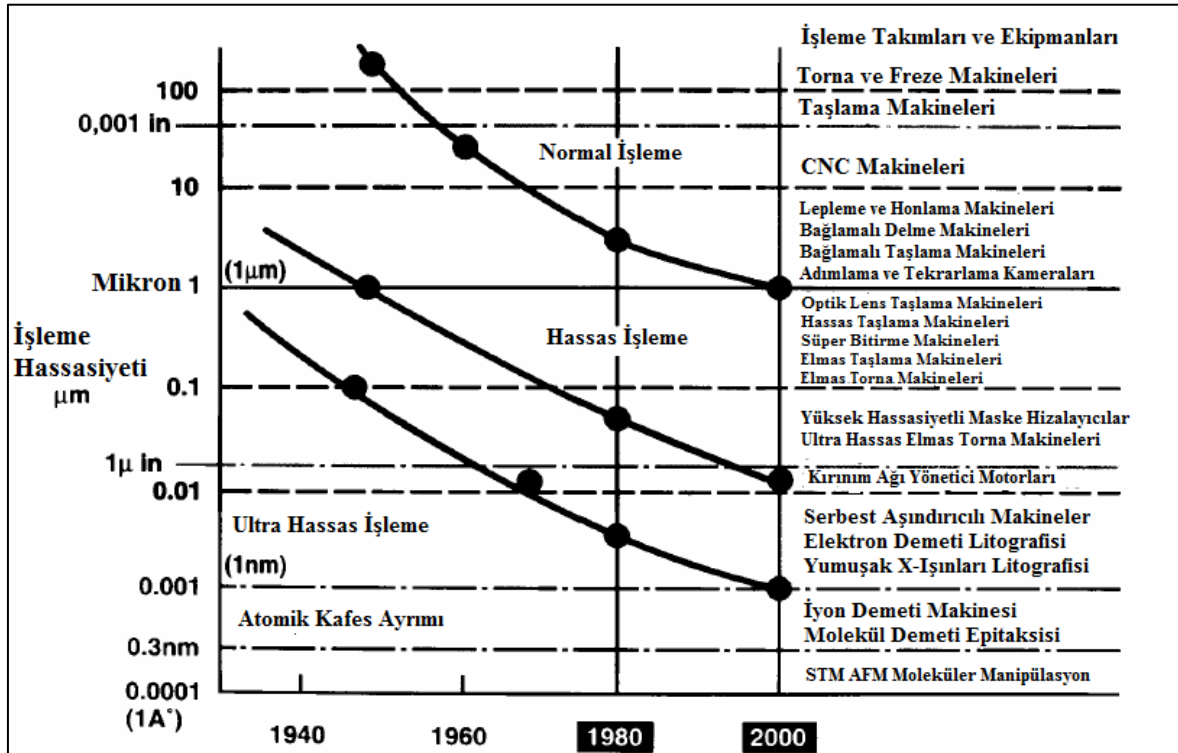
|                                                        |      |
|--------------------------------------------------------|------|
| Poisson Oranı (ν)                                      | 0,28 |
| Eğilme Mukavemeti (MPa)                                | 166  |
| Mikro Sertlik (10 <sup>-7</sup> Pa)                    | 860  |
| Yoğunluk (ρ) (g/cm <sup>3</sup> )                      | 2,46 |
| Lepleme Görece Sertlik (cam, K-8 tipi referans alarak) | 1,78 |
| Elastik Modülü (E) (GPa)                               | 92   |

Çizelge 2.20. AstroSital<sup>®</sup> optik özellikleri

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| Kırıcılık İndeksi (n <sub>E</sub> ) | 1,538 |
| Kırıcılık İndeksi (n <sub>D</sub> ) | 1,536 |

### 3. OPTİK ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Altmış yıldan fazla süredir farklı teknolojiler kullanılarak elde edilebilen işleme hassasiyeti Şekil 3.1’te verilmiştir. Bu, her bir süreç beklentisinin ve algısının zamanla gelişmeye devam ettiğini göstermektedir. Aynı süreçlerle daha iyi yüzey kalitesi çıktıları elde edilerek daha verimli olacak şekilde sürekli geliştirilmektedir.

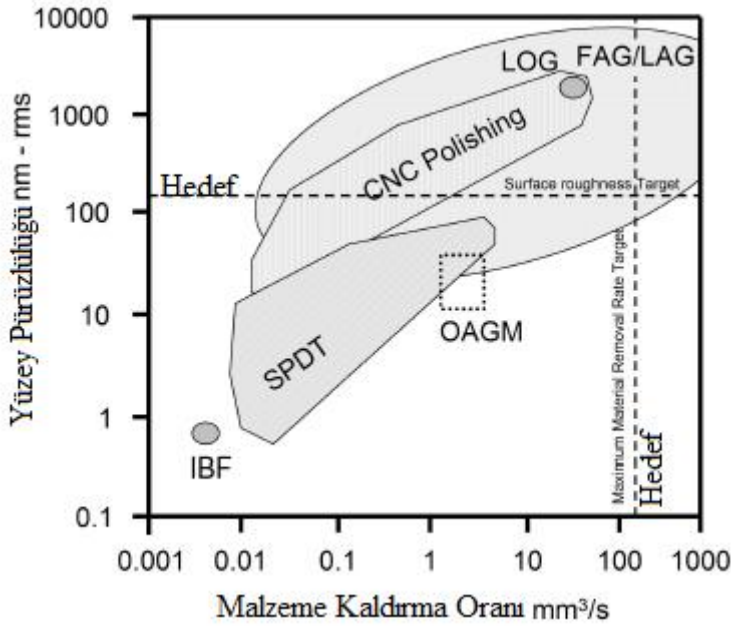


Şekil 3.1. Altmış yıldan fazla süredir farklı teknolojiler kullanılarak elde edilebilen işleme hassasiyeti [23]

Yüzeyde en tepe ve en çukur nokta arasında 1 µm’lik form hassasiyetini sağlamak için hassas işleme tezgahları, takımları ve ekipmanları kullanılır. Taşılama tezgahları gibi birçok farklı tipte hassas işleme teknolojisiyle bu form doğruluğu elde edilir [24]. Bu form doğruluğu yüksek malzeme kaldırma oranı ile birleştirilmelidir. Hassas işleme teknolojilerinin çoğu 10 mm<sup>3</sup>/s’ne üzerinde malzeme kaldırma oranı sunmuyor [25].

Şekil 3.2’de farklı işleme süreçleriyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranı verilmiştir. Bahsedilen farklı işleme yöntemleri, elmas uçlu tornalama (SPDT), geleneksel sabit veya gevşek aşındırıcı taşılama (FAG / LAG), bilgisayar sayımlı yönetimli parlatma (CNC parlatma) ve temassız işleme tekniği olan iyon ışını ile şekillendirilmedi

(IBF). [24]. Her bir işleme yöntemi ile 150 nm’lik hedef yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilir. 200 mm<sup>3</sup>’lük hedef maksimum malzeme kaldırma oranı, sabit aşındırıcılı taşlama işlemi ile elde edilir. 1 metreden daha büyük optikler için en tepe ve en çukur nokta arasında 1 µm’lik form hassasiyetini sağlamak için kesin ve tekrarlanabilir bir kontrollü işlem gereklidir. Taşlama işleminin kalitesi, taşlama tezgahının giriş hatalarının fonksiyonudur.



Şekil 3.2. Farklı işleme süreçlerinde, yüzey pürüzlülüğüne karşılık malzeme kaldırma oranı [25]

### 3.1. Malzeme Kaldırma Mekanizması

Kırılğan malzemelerin taşlanması, malzeme kaldırma mekanizmaları kırılğan, yarı sünek veya sünek mod olarak sınıflandırılabilir. Buna uygun olarak, yüzey oluşumu için gerekli taşlama kuvveti, esas olarak sünek modda plastik deformasyon veya plastik deformasyon ve gevrek kırılma karışımı ile başlatılır. Bu nedenle, sünek ve kırılğan malzeme kaldırma modlarına karşılık gelen taşlama kuvvetleri dinamiklere, temas mekaniğine ve sürtünme bilgisine dayandırılarak ayrı ayrı araştırılabilir [26].

Elmas taşlama, sayısız tekli aşındırıcı parçacıkların karmaşık kesme eylemleri olarak kabul edilebilen komplike bir işlemdir. Bu nedenle tek aşındırıcı parçacıkların işleme kuvveti, makroskopik işleme kuvveti modelinin elde edilmesi için incelenen birim olarak seçilebilir.

Aynı zamanda, etkili elmas parçacık sayısı bir başka önemli etkendir ve Eş. 3.1 ile ifade edilir;

$$N_d = \alpha_p C l_g \quad (3.1)$$

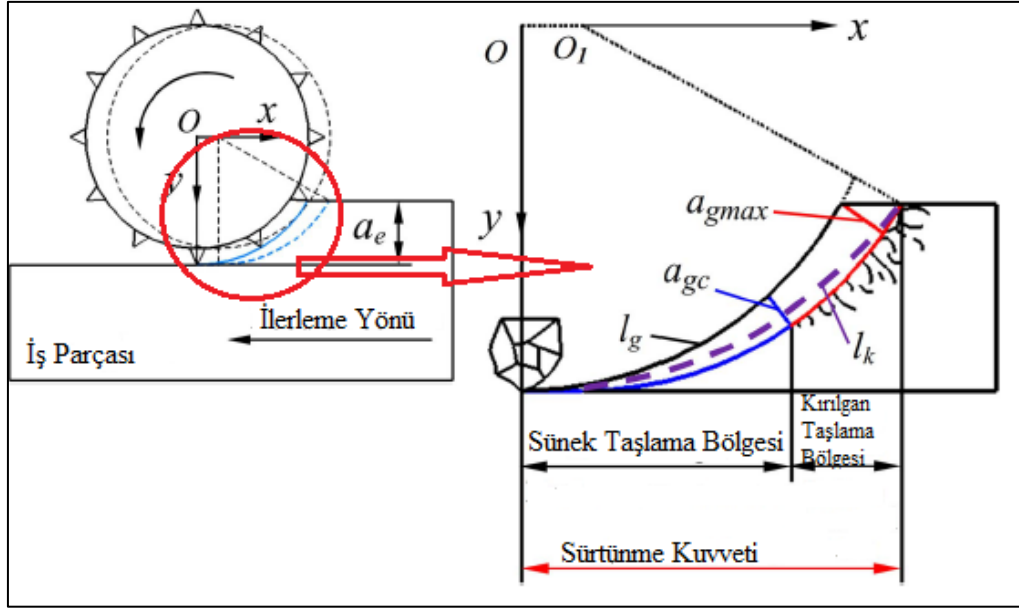
Eş. 3.1’de  $\alpha_p$  taşlama takımının taşlama genişliğini,  $l_g$  geometrik temas uzunluğunu,  $C$  aşındırıcı parçacık konsantrasyonunu gösterir.

Geometrik temas uzunluğu Eş. 3.2 ile ifade edilir.

$$l_g \approx \sqrt{a_e d_s} \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de  $a_e$  kesme derinliğini,  $d_s$  taşlama takımının eşdeğer çapını ifade eder.

Yukarıda belirtildiği gibi, kırılmal malzeme için iki çeşit malzeme kaldırma mekanizması vardır: sünek malzeme kaldırma modu ve kırılmal malzeme kaldırma modu. Sünek moddan kırılmal moda geçiş, tek aşındırıcı parçacığın kritik kesilmemiş talaş kalınlığı ile tanımlanır. Kırılmal malzemenin taşlama işlemi sırasında kesilmemiş talaş kalınlığı taşlama takımının altından iş parçasının üst yüzeyine kademeli olarak artar. Sonuç olarak, kırılmal – sünek geçiş eşiğini tanımlamak için kritik ve kesilmemiş talaş kalınlığı önerilmiştir. Şekil 3.3’de yüzey taşlama işleminin şematik gösterimi ve kırılmal malzemelerde malzeme kaldırma modlarının geometrik şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.3. Yüzey taşlama işleminin ve kırılgen malzemelerde malzeme kaldırma modlarının şematığı

Maksimum kesilmemiş talaş kalınlığı ve kritik kesilmemiş talaş kalınlığı sırasıyla Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 ile ifade edilir.

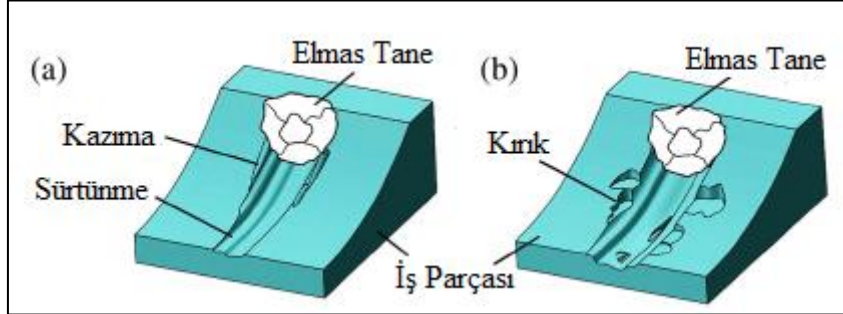
$$a_{gmaks.} = 2 \left[ \frac{V_{ft}}{V_c N_d m} \sqrt{\frac{a_e}{d_s}} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$a_{gc} = \cot \alpha_v \sqrt{\frac{2\lambda_0}{\xi}} \left( \frac{K_{ID}}{H} \right)^2 \quad (3.4)$$

Eş. 3.3’de  $V_{ft}$  takım ilerleme hızını,  $V_c$  elmas parçacık lineer hızını,  $m$  kesme sabitini tanımlar. Eş. 3.4’de  $\alpha_v$  elmas delicinin üst açısı,  $H$  malzeme sertliğini,  $K_{ID}$  dinamik kırılma tokluğunu,  $\xi$  aşındırıcının geometrik katsayısını,  $\lambda_0$  aşındırıcının bütünleyici katsayısını ifade eder.

Eş. 3.3 ve Eş. 3.4’e göre,  $\alpha_{gc}$  malzeme özellikleriyle belirlenen bir materyal sabiti iken,  $\alpha_{gmaks.}$  işleme parametreleri ile belirlenen değişken bir değerdir. Böylece, kırılgen malzeme kaldırma modu teoride uygun taşlama parametrelerinin tasarlanmasıyla kontrol edilebilir.  $\alpha_{gmaks.}$   $\alpha_{gc}$ ’den küçük olduğunda, malzeme kaldırma sadece sünek modda gerçekleşir.  $\alpha_{gmaks.}$   $\alpha_{gc}$ ’den büyük olduğunda, malzeme kaldırma sünek ve kırılgen modun karışımı şeklinde

gerçekleşir. Şekil 3.4 aşındırıcı taşlama sırasında sünek modda ve kırılgen modda malzeme kaldırma mekanizmalarını göstermektedir.



Şekil 3.4. Aşındırıcı taşlama sırasında malzeme kaldırma mekanizması (a) sünek mod (b) kırılgen mod

Sünek taşlama modu kırılgen malzemelerde en az yüzeyaltı hasarı yaratır [27]. Birçok malzeme için çok küçük kesme derinliklerinde sünek modda taşlama elde edilebildiğinden malzeme kaldırma oranı çok düşüktür. Kesme derinliği Zerodur® malzeme için 50 nm'dir [28].

Sünek mod taşlama tezgahına bağı olarak da değerlendirilir. Dinamik olarak rijit bir tezgah, minimum yüzeyaltı hasarı ve göreceli olarak daha yüksek malzeme kaldırma oranı ile yüksek kaliteli yüzey oluşturur [28, 29].

Kırılgen mod, daha yüksek üretim oranlarını destekler [30]. Ancak bu mod, yüzeyde ve yüzeyaltında hasarlar bırakır. Verimli bir taşlama için, yüzeyaltı hasarlarının miktarını azaltmak gerekir. Bunun için de işleme parametreleri optimize edilmelidir. Yüzeyaltı hasarına yol açan mikro kırılma mekanizmaları Lawn ve Whilshaw (1975) tarafından kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır [31].

### 3.2. Taşlama Tezgahları

Yer ve astronomik gözlem amaçlı uydu ve teleskoplar için büyük çaplı optiklere ihtiyaç vardır. Bu optiklerin üretimi için büyük taşlama tezgahları geliştirilmiştir.

1985'te Arizona Üniversitesi'nde Optik Bilim Merkezi'nde geniş optik üretici (LOG) geliştirilmiştir. Çapı 8 m'ye kadar olan camları geniş köprü tipli dikey torna mili ile

işleyebilmektedir. İşlem sonunda  $2\text{ }\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü ve  $4\text{ }\mu\text{m}$  yüzey formu hatası için malzeme kaldırma oranı  $28\text{ mm}^3/\text{s}$ 'dir [32].

1989'da Eastman Kodak için yüksek performanslı taşlama tezgahı Cranfield Precision OAGM2500 geliştirilmiştir. Bu tezgahta düşük hasar yaratacak taşlama modu vardır. 1 metrede  $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  yüzey formu hatası ( $P_t$ ) ve  $10\text{--}50\text{ nm}$  yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) için malzeme kaldırma oranı  $1\text{--}5\text{ mm}^3/\text{s}$ 'dir. 2,5 metrelik iş parçası için ise aynı parametrelerde oluşan yüzeyaltı hasarı  $10\text{ }\mu\text{m}$ 'den daha azdır [33, 34].



Resim 3.1. Kodak OAGM2500 taşlama tezgahı [35]

2005'de Cranfield Üniversitesi'nde tasarım konseptine dayanan BoX<sup>®</sup> isimli bir taşlama tezgahı geliştirilmiştir. 1 metrede  $1\text{ }\mu\text{m}$  yüzey formu hatası ( $P_t$ ) ve  $50\text{--}150\text{ nm}$  yüzey pürüzlülüğü ( $R_{ms}$ ) için hedeflenen maksimum malzeme kaldırma oranı  $200\text{ mm}^3/\text{s}$ 'dir [25].



Resim 3.2. BoX® Taşlama tezgahı [36]

Bu yüksek hassasiyetli taşlama tezgahları, elmas uçlu torna tezgahlarında bulunan tasarım prensiplerini takiben üretilmiştir. Bir metrenin üstünde parçalar için yüksek form doğruluğu ve işlem tekrarlanabilirliği elde edebilmek adına bu gereklidir. Oluşan ısı miktarı en aza indirilmiştir. Isı üreten her bir bileşen için termal kontrol döngüleri uygulanmıştır. Taşlama işlemi esnasında ısı dalgalanması en aza indirgenir. Ayrı bir metroloji çerçevesi, iş parçasının yerinde ölçümünü ve taşlama işlemi hataları için hata telafisini de mümkün kılmaktadır.

Optik üretim için üniversitelerin dışında artık bir çok firma da tek tip veya gelen isterlere göre tasarlanan hassas taşlama tezgahları geliştirmekte ve satmaktadır. Amerika’da Optipro, İngiltere’de Zeeko, Cranfield Precision, Holroyd, Almanya’da Satisloh, Optotech, Schneider OM gibi firmalar savunma sanayi, havacılık ve uzay sanayi gibi alanlara hassas taşlama ve parlatma tezgahları satmaktadır.

### 3.2.1. Tezgah hataları

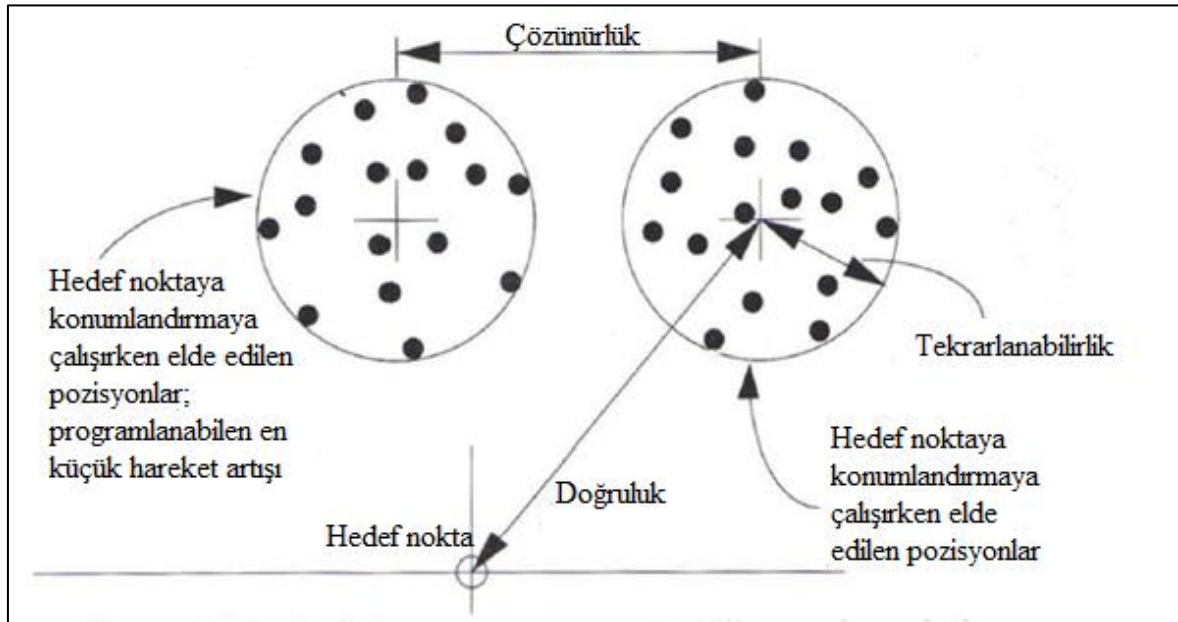
Takım tezgahı hataları yıllar boyunca tartışılmış ve rapor edilmiştir [37-41]. Bu hataların belirlenmesi yüksek hassasiyetli taşlama tezgahları elde etmek için önemlidir. Takım tezgahı hataları geometrik / kinematik hata, termal hata, fikstüre bağlı hata ve kesme kuvvetine bağlı hata olarak sınıflandırılır [42, 43].

Takım tezgahlarındaki rastgele hataların değerlendirilmesinde iki farklı yaklaşım kullanılır. Deterministik yaklaşım, rastgele hataların henüz anlaşılmadığı ve ölçülemediği için rastgele olduğunu düşünür [44]. Bir başka görüşte rastgele hatalar “belirli bir noktada açıkça eşit şartlar altında olanlar her zaman aynı değere sahip değildir ve yalnızca istatistiksel olarak ifade edilebilirler” olarak tanımlanmıştır [44]. Bu bildiri ilk olarak 1978 yılında CIRP metroloji komitesinin (CIRP, 1978) bir raporunda yayınlanmıştır [25].

İlerleyen bölümlerde hassas taşlama işlemini etkileyen hataların kaynağı ve tekrarlanan hatalara uygulanan hata telafisi stratejileri açıklanmıştır. Geometrik / kinematik hatalar, termal hatalar, taşlama tezgahının kararlılığı ve aşınma hataları ele alınmıştır.

### Tezgah performans hatası

Tezgah performans hatalarını tanımlayabilmek için doğruluk, tekrarlanabilirlik ve çözünürlük olmak üzere 3 ayrı kavram kullanılmıştır. Şekil 3.5’de bu kavramlar arasındaki farklılıklar gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Doğruluk, tekrarlanabilirlik ve çözünürlük kavramlarının tanımı [25]

Doğruluk, tezgahın çalışma hacmindeki herhangi iki nokta arasındaki en yüksek ötelenme veya dönme hatasıdır. Tekrarlanabilirlik, tezgahı aynı konuma getirmek için bir dizi ardışık girişim arasındaki hatadır. Çözünürlük, tezgahın programlanabilir en küçük adımı veya

tezgahın bir noktadan diğer noktaya hareketi sırasında yapabileceği en küçük mekanik adımdır [45]. Bu hatalar yarı statik ve dinamik olarak üretilir [25].

Karşılaşılan geometrik hata türleri; konumlandırma, düzlük, açısal doğruluk ve paralelliktir [46, 47]. Bu hatalar, tezgah tasarımı ve kullanılan bileşenlerin kalitesinden kaynaklanır. Hassas işlemede tezgah yapısının ve tek tek kullanılan elemanların dinamik karakteristiğinin değerlendirilmesi gerekir [48]. Tezgah modları, tezgah parçalarında geometrik hataya neden olan uyarımlar üretir [49]. Bu sistem, operasyonel taşıma hızını veya eksenlerin ivme ve hareketlerini sınırlar. Ancak tasarım aşamasında teorik olarak tahmin edilebilir [25]. Titreşimler, torna mili ve tabla mili dönüşleri ve eksenel hareketlerde meydana gelen sürtünme ile indüklenir.

#### Termal hatalar

Çalışma ortamının sıcaklığı gibi dış sıcaklık ve motorlar, işleme prosesi, torna mili tarafından üretilen iç sıcaklık olmak üzere iki tür ısı kaynağı tanımlanmıştır [50, 51]. Bu ısı kaynakları termo elastik deformasyonlara neden olur. Tezgahın sıcaklık kontrollü bir odaya kurulması, harici bir ısı kaynağından kaynaklanan hatayı azaltır. Tezgah tasarlanırken iç ısıya neden olan sıcaklık kaynakları azaltılabilir ve yalıtılabilir. Tasarım aşamasında bunları simüle eden modeller kullanılabilir [51].

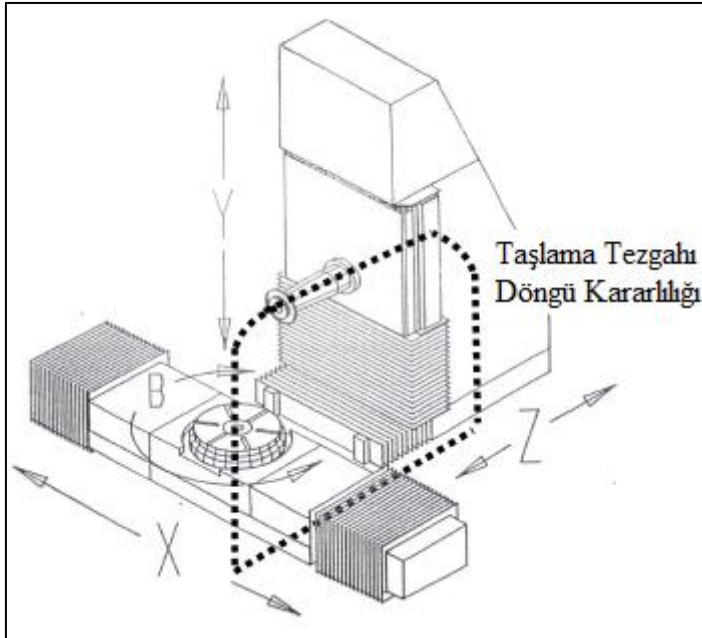
Diğer önemli bir teknik ise sistemde soğutucu akışkan kullanılmasıdır. Bu, sıcaklık sensörleri ve sıcaklık izleme döngülerine sahip soğutma suyu sistemi kullanılarak yapılır [33]. Tezgahın kritik bileşenleri, göreceli olarak sabit bir işletim sıcaklığını korumak için de soğutulur [52].

Yapısal bir döngü olarak termal döngü, değişen sıcaklıklar altında belirtilen nesneler arasında göreceli olarak konumu belirleyen bir mekanik bileşen düzeneği boyunca bir yoldur [53]. Örneğin, bazı yakın kızılötesi optikleri, parça ve fikstürün termal bozulmasının sürekli izlenmesini gerekli kılar. Çünkü yakın kızılötesi optikleri, yüksek termal genleşme sergileyen fosfattan yapılmıştır. Başka bir örnek ise, termal etkilerin etkisini azaltmak için düşük termal genleşmeli cam seramik malzemeden yapılmış bir milin tasarımıdır. Geçmişte böyle bir mil, hidrostatik yağ yatakları olan hassas bir taşıma tezgahına monte edilmiştir.

NbFI optik camın yüzeyindeki en tepe ve en çukur nokta arasındaki mesafe (PV) 5 nm ve çeşitli camlarda düzlük için mikron altı seviyede taşlama sonucu göstermektedir [54].

### Taşlama tezgahı döngü kararlılığı

Taşlama tezgahının statik ve dinamik kararlılığı hassas taşlama operasyonları için kritik öneme sahiptir [55-58]. Taşlama tezgahı bu konsept ile tasarlanmalıdır. Kapalı bir döngüden sonra yapısal bir tezgah rijitliği tanımlanabilir [45]. Holyrod Edgetek taşlama tezgahına ait kapalı döngü kararlılığı Şekil 3.6’da verilmiştir [25].

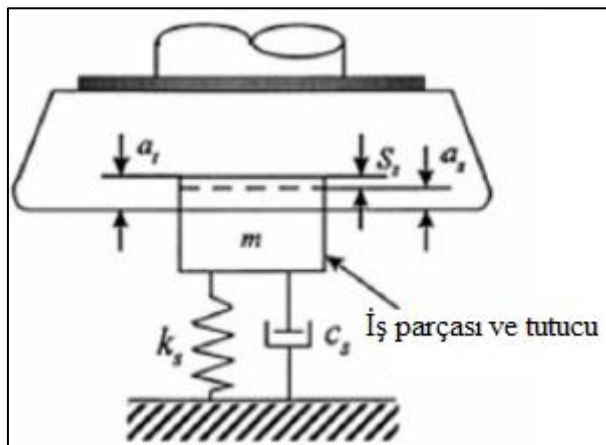


Şekil 3.6. Holyrod Edgetek taşlama tezgahına ait döngü kararlılığı

Yataklar, lineer slaytlar, döner tabla gibi her bir tezgah elemanının kararlılığı , nihai tezgah yapısal döngü kararlılığına katkıda bulunur. Tezgah kararlılığına diğer önemli etken taşlama takımı, iş parçası ve tutucudur [59]. Taşlama takımı ile iş parçası arasındaki etkileşimin değerlendirilmesi gereklidir.

Taşlama operasyonu sırasında tezgahın dinamik cevabının belirlenmesi mümkün değildir. Dinamik cevabın iyileştirilmesi için torna mili, takım yatağı ve ana yapı için özel malzemelerin kullanılması gerekir [53, 60].

Taşılama takımı ile iş parçası ve tutma fikstürü arasındaki etkileşim, taşılama tezgahı döngü kararlılığının önemli bir parçasıdır. Bu etkileşim, programlanan kesme derinliğine kıyasla gerçekte çıkarılan malzeme miktarını belirler. Taşılama takımı bu sapmayı asgari tutacak şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 3.7’de taşılama takımı ile iş parçası ve tutma fikstürü arasındaki etkileşim verilmiştir. Ayarlanan kesme derinliği, gerçekte olan kesme derinliği ve statik sapma açıkça gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Taşlama takımı ile iş parçası ve tutma fikstürü arasındaki etkileşim [61]

Azami talaş kalınlığını belirlemek için geliştirilen denklem, taşlama takımı gövdesi ile iş parçasının elastik modülü arasındaki oranı içerir [62].

Mikro seviyede, taşlama basıncı altındaki aşındırıcı tabaka dikkate alınmalıdır. Aslında kesme takımı ile aşındırıcı tabakanın elastik modülü farklıdır. Daha sert takım kullanıldığında sapma azalır [63]. Benzer taşlama parametreleri ile daha sert iş parçası işlendiğinde de taşlama kuvvetleri arttığı için aynı etki görülür [64, 65].

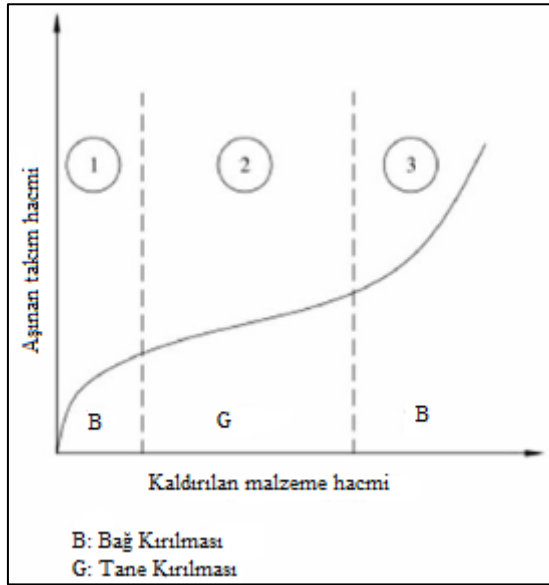
Takım aşınma hatası

Takım taşlama operasyonu boyunca aşınır. Bu aşınma hem aşındırıcı tabakada hem de elmas gibi aşındırıcı parçacıklarda meydana gelir. Taşlama takımının aşınmasını değerlendirmek için G faktörü tanımlanmıştır [66-68]. Bu faktör, kaldırılan malzeme hacmi ( $\Delta V_w$ ) ve takım aşınması hacmi ( $\Delta V_s$ ) arasındaki orana bağlıdır ve Eş. 3.5 ile ifade edilir.

$$G = \frac{\Delta V_w}{\Delta V_s} \quad (3.5)$$

Taşlama oranı, daha düşük konsantrasyon ve daha küçük elmas büyüklüğü ile azalır [30]. Şekil 3.8’de açıklanan taşlama takımı aşınma grafiği, diğer aşınma işlemleri ile benzerdir [69].

Taşlama oranı, daha düşük konsantrasyon ve daha küçük elmas büyüklüğü ile azalır [30]. Şekil 9’da açıklanan taşlama takımı aşınma grafiği, bütün aşınma işlemlerinde benzerlik gösterir [69]. Takım aşınma eğrisi Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Takım aşınma eğrisi [69]

Takım aşınması için 3 faz tanımlanır. Taşlama takımı aşınması, başlangıçta bağ kırılması nedeniyle yüksektir, bu 1. fazı oluşturur. Bunu parçacık kırılması nedeniyle göreceli olarak daha duruğan aşınma durumu olan 2. faz izler. 3. fazda aşınma dramatik bir şekilde artar. Kesme verimliliğinin yeniden kazanılması, aşındırıcı katman geometrisinin düzeltilmesi için taşlama takımında bileme, elmas açma işlemi yapılması gerekir. Bu eğri, tekrarlanan taşlama testleri gerçekleştirilerek çizilebilir. Bu testler, her taşlama takımı ve işleme parametreleri kombinasyonu için tekrarlanmalıdır [25].

Taşlama takımının aşınmasını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [70-72]. Örneğin, bir ölçüm tekniği “baskı tekniğine” dayanmaktadır [73]. Belirli bir miktarda malzeme

kaldırdıktan sonra, takım formu takımın bir test bloğuna batırılmasıyla kaydedilir. Taşlama takımı formu ve aşınma büyüklüğü bir profilometre kullanılarak ölçülür.

### Hata telafisi teknikleri

Yüksek statik ve dinamik kararlılığın ve termal kontrollü döngülerin olduğu bir tezgahın dikkatli tasarımı, hataların miktarını önemli ölçüde azaltır [74]. Tezgahın bir sonraki olası iyileştirmesi, geometrik hataların, takım aşınmasının ve termal hataların telafisidir [46, 47, 51]. Örneğin ısı kayma hataları, bu teknikler ile %90'a kadar azaltılabilir. Bu hataları telafi yöntemleri, yüksek tekrarlanabilirlik elde edildiğinde ve deterministik ölçüm prensipleri uygulandığında verimli olmaktadır [53].

Hata telafileri için önceden kalibre edilmiş hata telafisi ve etkin hata telafisi olmak üzere 2 yaklaşım vardır [75].

Önceden kalibre edilmiş hata telafisi, tekrarlanabilirliği yüksek süreçlere dayanır. Sonlu elemanlar analizi ve geliştirilen modeller, taşlamadan önce belirli hataları gidermeye yardımcı olur. Belirli bir taşlama işlemi için ölçülen hatalar, sonraki taşlama işlemleri sırasında telafi edilebilir [25].

Etkin hata telafisi ise, taşlama operasyonunun izlenmesine ve aynı işlem sırasında hata telafisinin uygulanmasına dayanır. Taşlama işleminin hata telafisi kuvvet, güç veya akustik emisyon sensörleri kullanılarak yapılabilir. Termal ve geometrik bozukluklar devamlı olarak izlenir ve telafi edilir [25].

### **3.2.2. Hassas taşlama prosesi**

Optik malzemenin taşlanma sürecini etkileyen çok fazla parametre vardır. Bu parametreler taşlama modu, işlem boyunca takım ilerleme hızı, iş parçası dönme hızı gibi kullanılan temel taşlama girdileri, taşlama takımı, takımı şekillendirme ve takımda elmas açma teknikleri, nozul ve soğutma sıvısı seçimidir. Bu parametrelerin optimizasyonu ile uygun taşlama prosesi belirlenir.

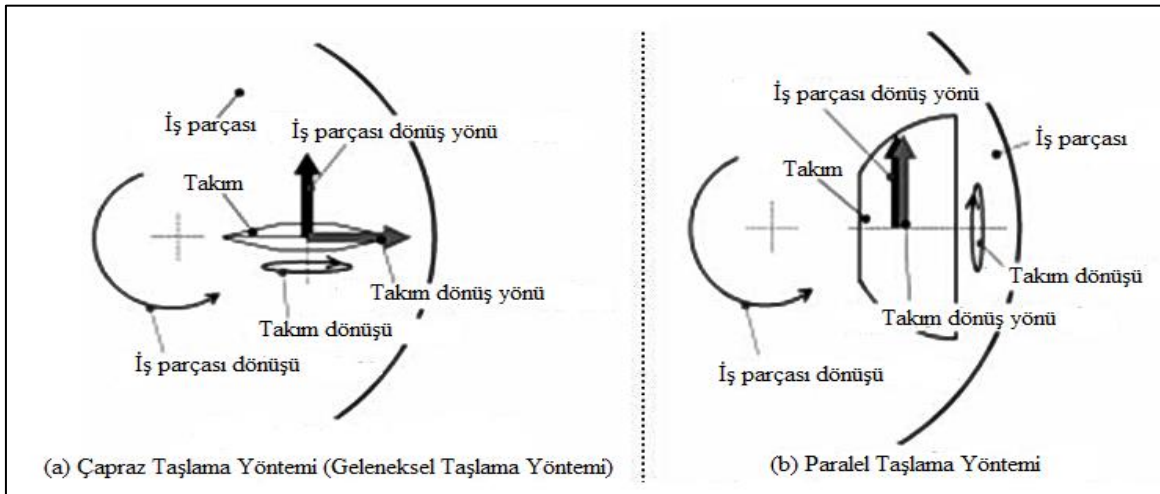
### Taşılama modları

Optik malzemenin geliştirilmesi için farklı taşılama modları vardır. Bazı tezgahlarda belirli optik bileşenlerin geometrisi ve boyutları için tasarlanmış özel modlar vardır. Örneğin, aynı firmadan alınan aynı 2 tezgahda belirlenen amaç doğrultusunda farklı taşılama modları vardır ve tezgahta bu modlara göre özel geliştirilmiştir. Ancak özellikle bilgisayar sayımlı yönetime sahip sistemlerde numerik kontrol kod sayfası kullanılarak da herhangi bir operasyon yaptırmak mümkündür.

Herhangi bir tezgahta çaplama, pah kırma, kanal açma, delik delme, kesme, prizma, düz, küresel, küresel olmayan ve serbest form yüzey taşılama, kaşıklama yöntemi ile taşılama, iç boşaltma gibi paket programlar vardır.

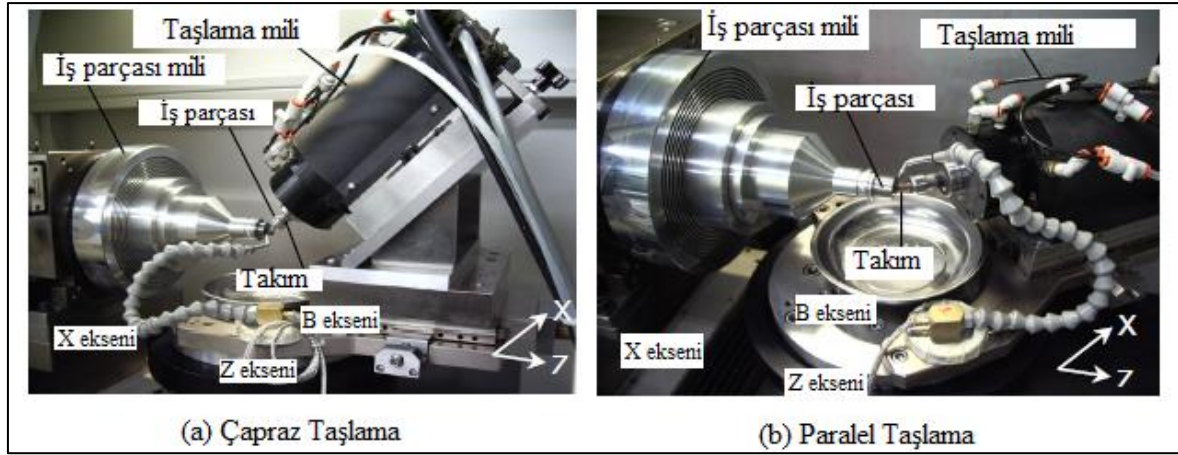
Her programda tezgahın kullanılan eksenleri, aşındırıcı takımın parçaya yaklaşma şekli, yanaşma açısı, takımın ilerleme yönü birbirinden farklılık gösterir. Bazı modlar belirli optik bileşenlerin geometrisi ve boyutları tasarlanmış özel taşılama tezgahları kullanılmasına dayanır. Diğer taşılama modları genel yapılı taşılama tezgahlarında uygulanabilir.

Genel olarak takım ve iş parçasının yaklaşma şekline göre paralel ve çapraz taşılama modu tanımlanmıştır. Çapraz taşılama modunda taşılama takımının dönüş yönü ile iş parçasının dönüş yönü diktir. Paralel taşılama modunda ise adından da anlaşılacağı gibi paraleldir [25]. 2 mod arasındaki fark Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Çapraz taşılama yöntemi ve paralel taşılama yöntemi [25]

Bu taşlama yöntemleri BK7 cam üzerinde karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sünek malzeme kaldırma mekanizmasında, paralel modun çapraz moda göre daha yüksek malzeme kaldırma oranına sahip olduğunu göstermektedir [76]. Farklı birincil ve ikincil takım aşınma bölgeleri tanımlanır. Taşlama modunun değişmesi, taşlama milinin açılı olarak yatırılmasıyla sağlanır. Resim 3.3’de taşlama sırasında 2 modun görünümü verilmiştir.



Resim 3.3. Çapraz taşlama ve paralel taşlama modları [77]

#### Taşlamada kullanılan temel parametreler

Operasyon türüne bağlı parametrelerin yönleri ve doğrultuları farklılık gösterse de bütün işlemler için kullanılan temel parametreler şunlardır:

- Takım ilerleme hızı (mm/dk): Aşındırıcı takımın malzeme üzerinde aşındırma sırasındaki çizgisel ilerleme hızıdır.
- Kesme hızı (m/s): Dönü hareketi yapan aşındırıcı takımın parça ile temas eden ve aşındırma işlemini yapan noktasının çizgisel hızıdır.
- Takım dönme hızı (devir/dk): Takım çapı ve kesme hızı parametreleri doğrultusunda tezgâhın hesaplayarak oluşturduğu ve uyguladığı aşındırıcı takımın açısal hızıdır.
- İş parçası dönme hızı (devir/dk): C eksen üzerine yerleştirilmiş taşlanacak olan malzemenin açısal hızıdır. Tezgâh kullanıcısı bu değeri iş parçasının büyüklüğüne, ağırlığına ve geometrisine bağlı olarak belirler.
- Güvenlik mesafesi (mm): Aşındırıcı takımın malzeme ile temas etmeden önce hızlı olarak takımı getireceği yaklaşma mesafesidir.

- Güvenlik mesafesi ilerleme hızı (mm/dk): Belirlenen güvenlik mesafesine gelen takımın aşındırma işlemi öncesi malzemeye yaklaşacağı hızı belirleyen parametredir.

Belirtilen parametrelerden başka sadece operasyon türüne bağlı olarak aktif hale gelen başka parametreler de mevcuttur. Genel taşlama işlemleri, bu parametreler üzerinden gerçekleştirilir.

### Taşlama takımı

Taşlama takımları, paslanmaz çelik vb. malzeme üzerine sinterlenmiş elmas, kübik bor nitrür, karbon gibi çeşitli parçacıklar ile kesme işlemini gerçekleştirir. Taşlama takımı seçimi önemlidir. Seçim yapılırken şekil tipi, bağ tipi, aşındırıcı tipi gibi düşünülmesi gereken birçok parametre vardır. Bu parametrelerin her biri ISO standartlarına uyar. Her taşlama takımı, spesifik taşlama konfigürasyonlarına uyacak şekilde sipariş edilir.

Taşlama işlemlerinde kullanılan takımlar geometrik olarak birbirine benzerlik gösterir ve bir takım farklı operasyonlarda kullanılabilir ancak bir takımın yalnızca tek tip operasyonda kullanılması tercih edilir. Bunun nedeni, farklı operasyonlar takımında farklı aşınma geometrilerine neden olur, bunun sonucunda da yüzey taşlama gibi başka operasyonlarda yüzeyde iz ya da girinti/çıkıntılar oluşur. Örneğin, pah kırma operasyonunda kullanılan bir takım, yüzey taşlama ya da delik delme operasyonunda kullanılmamalıdır. Delik delme operasyonunda kullanılan bir takım ise takımın duvar kalınlığı ince olacağından, yüzey taşlama ya da çaplama operasyonlarında esnemesinden dolayı yalnızca çok yavaş ilerleme hızında kullanılır. Ancak bu durum da ciddi zaman kaybına neden olur ve takım çabuk aşınır.

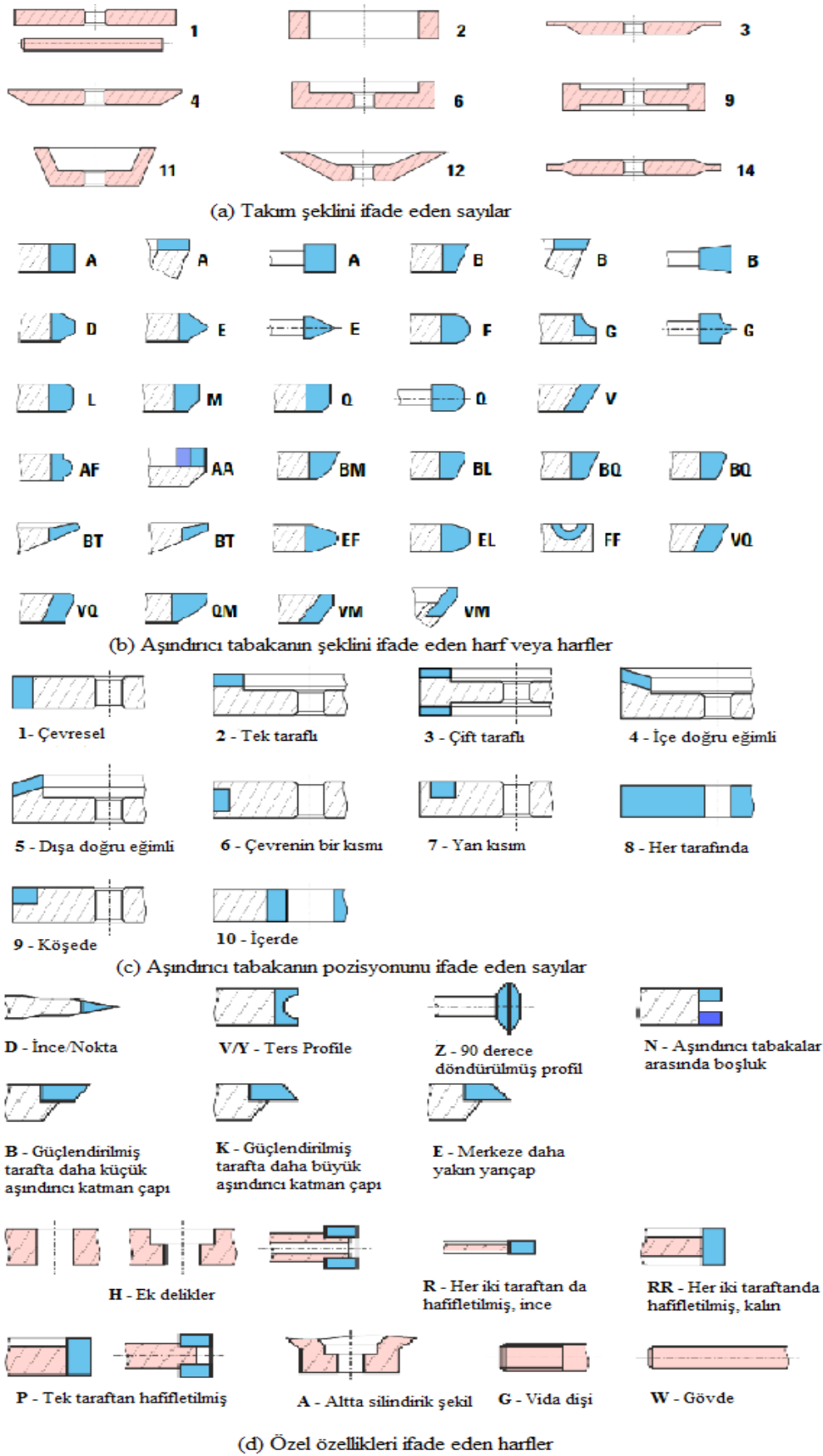
### *Takım şekilleri*

Takım şekilleri ISO 6104:2005 standardına uygun olarak tanımlanır. Bu standarta göre, takım şekilleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Taşlama takımı şekilleri ve kodları

| Takım Şekli | Taslak | Takım Şekli | Taslak |
|-------------|--------|-------------|--------|
| 1A1         |        | 10A2        |        |
| 1A1R        |        | 11A2        |        |
| 1A8         |        | 11V2        |        |
| 1V1         |        | 11V9        |        |
| 3A1         |        | 12A2        |        |
| 4A2         |        | 12V9        |        |
| 4BT9        |        | 13A2        |        |
| 4V2         |        | 14A1        |        |
| 6A2         |        | 14AA1       |        |
| 6AA2        |        | 14E1        |        |
| 6A9         |        | 14F1        |        |

İlk sayı takım şeklini, bundan sonra gelen ilk harf veya harfler aşındırıcı tabakanın şeklini, ikinci sayı ise aşındırıcı tabakanın konumunu, sondaki herhangi bir harf ise varsa özel bir özelliği ifade etmektedir. Harf ve numaralara göre kodlamanın nasıl değiştiği Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. (a) Takım şeklini ifade eden sayılar (b) aşındırıcı tabaka şeklini ifade eden harfler (c) aşındırıcı tabakanın pozisyonunu ifade eden sayılar (d) özel özellikleri ifade eden harfler

Optik üretimde kullanılan taşlama takımlarına örnek Resim 3.4’de verilmiştir.

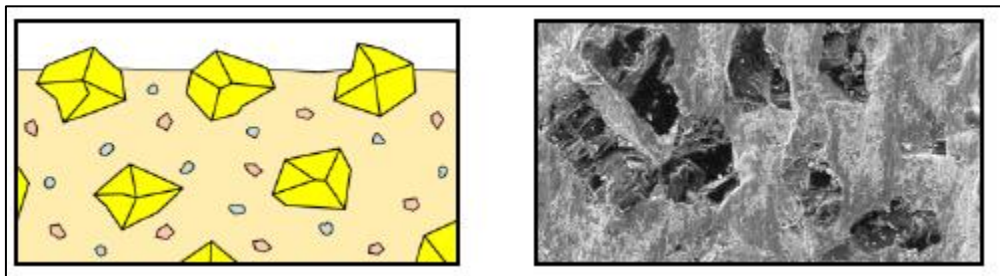


Resim 3.4. Örnek taşlama takımları

### *Bağ tipleri*

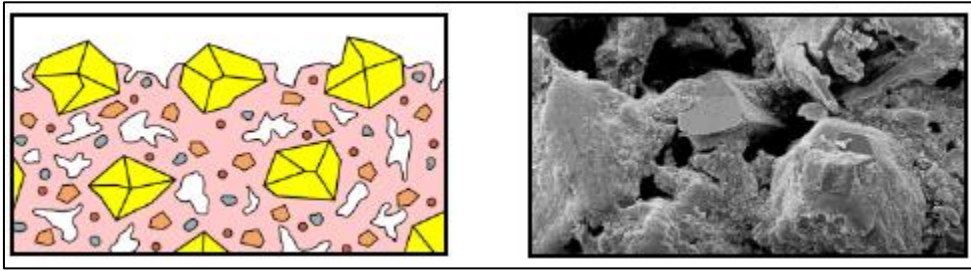
Taşlama takımındaki süper aşındırıcı elmaslar, metal, elektroliz ile kaplanmış, vitrifiye, reçine gibi farklı bağlayıcı madde ile bir arada dururlar [78-80]. Bağ malzemesi taşlama yapılacak malzeme özelliğine ve takımın yapıldığı malzemeye göre seçilir.

Sinterlenmiş metal bağları ağırlıklı olarak bronz alaşımlarıdır ve diğer bağlara göre yüksek sertlik sergilerler. Aşındırıcı parçacıklar sıkıca çevrenmiştir bu da uzun takım ömrü ve daha yüksek şekil tutuşu sağlar. Reçine seramik bağlarının aksine metal bağlar daha fazla taşlama ısısı oluşturur ve eğer aşındırıcı parçacıkların bağdan çıkıntısı korunmazsa daha sığ kesme derinliklerinde kullanılmalıdır. Metal bağlı takımlar aşınmaya karşı çok dayanıklıdır. Resim 3.5’de metal bağların yapısı verilmiştir.



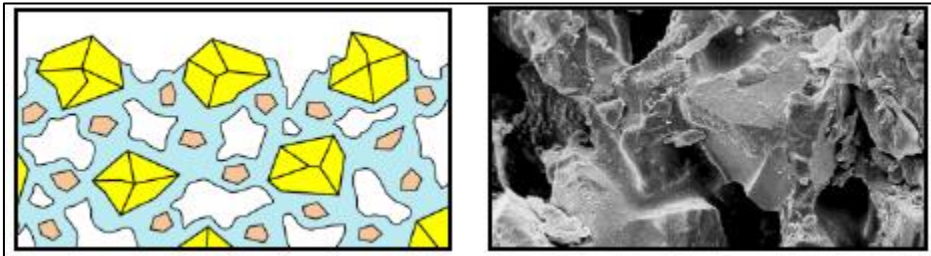
Resim 3.5. Metal bağ yapısı

Aşındırıcı parçacıkları ve dolgu maddelerini içeren reçineler ise bağın taşlama özelliklerinin seçici olarak düzenlenebildiği bağlayıcı madde olarak kullanılır. Reçine ile bağlı taşlama takımları hızlı ve soğuk taşlama sunar, kuru ve ıslak taşlama için kullanılabilir ve sadece düşük taşlama kuvvetleri oluşturur. Bu bağ sisteminin azami ısı yükü 200 °C ile 350 °C arasındadır. Göreceli olarak daha ucuz bir bağdır. Reçine bağların yapısı Resim 3.6’da verilmiştir.



Resim 3.6. Reçine bağ yapısı

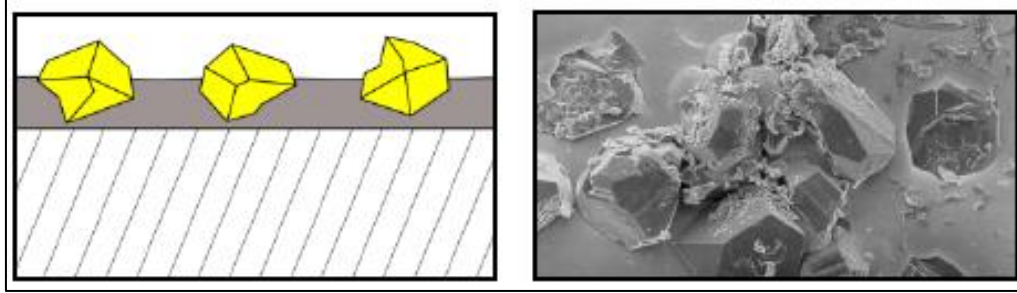
Vitrifiye bağını, eritilmiş cam tozu, dolgu maddeleri ve aşındırıcı parçacıkların bir kısmı oluşturur. Metal ve reçine bağların aksine, vitrifiye bağ belirli bir gözenek hacminin üretilmesi avantajını sunar. Gözenekli yapısından dolayı, uzun talaş üreten malzemeler için uygundur. Vitrifiye bağlar çoğunlukla kübik boron nitrat ile birlikte kullanılırlar. Bağ camdan yapıldığı için, parçacıklar önemli darbelere veya sıcaklık şoklarına dayanamaz. Bu nedenle kesintisiz soğutma daima gereklidir. Vitrifiye bağ, düşük işleme kuvvetleri ile soğuk işleme sağlar. Aşındırıcı parçacıkları açma işlemini yapmak görece kolaydır. Resim 3.7’de vitrifiye bağ yapısı verilmiştir.



Resim 3.7. Vitrifiye bağ yapısı

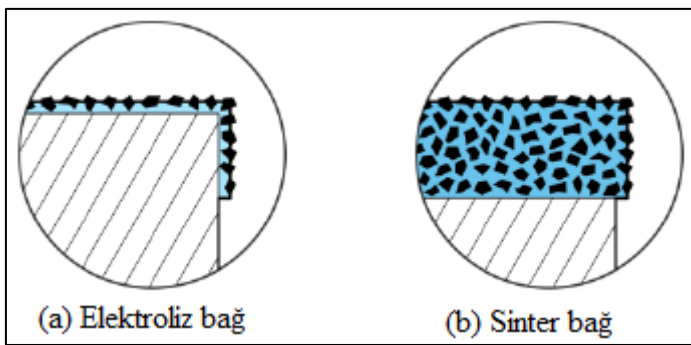
Elektroliz kaplama ile oluşturulan bağ, çelik veya karbürden yapılmış bir taban gövdeye elektroliz edilir. Bu kaplama işleminin bir sonucu olarak, bağ büyük talaş boşluklarına sahiptir. Galvanik bağ özellikle profilli gövdelerin kaplanması için uygundur. Profil

hassasiyeti elmas parçacıkların boyutuna bağlıdır. Elmas parçacıkların büyük çıkıntıya sahip olmasından dolayı, iş parçasını çok pürüzlü bir yüzeyde bırakır. Kullanım arttıkça, aşındırıcı uçlar aşındığından elmas parçacıkları tutuş azalır. Elektroliz kaplama ile oluşturulan bağ yapısı Resim 3.8’de verilmiştir.



Resim 3.8. Elektroliz kaplama ile oluşturulan bağ yapısı

Aşındırıcı katman, elektroliz bağlarda sadece ince bir katmandan oluşur. Elektrolize olan aşındırıcı parçacıklar körelir veya kırılırsa taşlama yapmak mümkün değildir. Sinterlenmiş bağlarda ise aşındırıcı tabaka kalındır ve en son parçacığa kadar taşlama yapmak mümkündür. Bu nedenle sinterlenmiş bağlar, büyük ölçüde daha yüksek dayanıklılığa sahiptir ve bu nedenle daha ekonomiktir. Ayrıca elektrolizle yapıştırılmış bağlar küçük parçacık büyüklükleri için uygun değildir. Bağ yapıları arasındaki fark Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. (a) Elektroliz bağ katmanı (b) sinterli bağ katmanı

Optik bileşenlerin taşlanması, metal bağlı bir taşlama takımı kullanırsa yüksek basınç ve sert bağ nedeniyle, yüzeyaltı hasarları ve çatlakları önlemek için yavaş bir taşlama operasyonu yapılır [81]. Vitrifiye bağlı bir taşlama takımı formunu çabucak kaybeder. Reçine bağlı takımda ise iş parçası yüzeyinde çok az hasar meydana gelir [30, 82].

Uygulamaya bağılı olarak genellikle özel bir yapıya sahip fenolik reçineler kullanılır. Fenolik reçine ile bağılı bir taşlama takımı kolaylıkla bozulur ancak formunu düzeltmek için yapılan bileme işlemi ile çok kolay düzgün form verilir. Bir dezavantajı yüksek sıcaklıklara dayanamaz. Poliimid bağılı taşlama takımı reçine bağılı taşlama takımı ile benzer özellikler gösterir. Ama poliimid reçinesi, ısıya ve aşınma direncine dayanıklı katkı maddeleri içerir [25].

### *Sertlik*

Takımlarda, J, N, R, T gibi takımın sertliğini ifade eden kodlar vardır. Ancak bir genelleme yapılacak olursa safir gibi sert bir malzemeyi işleyebilen J kodlu bir takım, BK7, Zerodur®, K9, kaynaşık silika gibi daha yumuşak olan malzemeleri şekillendirilebilir. Sert malzemeler için elmas, bağlayıcısı reçine olan takımlar yerine, metal bağılı takımlar seçilir. Bu parametre, takımdaki aşınma miktarını etkiler.

### *Aşındırıcı taşlama malzemesi*

Taşlama operasyonunda aşındırıcı malzeme olarak elmas, silisyum karbür veya bor nitrid gibi sert, dayanımı yüksek malzemeler kullanılır. Optik malzemelerin taşlama operasyonunda elmas aşındırıcı parçacıklar tercih edilir. Aşındırıcı taşlama malzemesinin iş parçasından daha yüksek sertlik değerine sahip olması gerekir.

Taşlama operasyonunda aşındırma işlemini yapan malzeme kadar aşındırıcı parçacıkların büyüklüğü ve konsantrasyonu da önemlidir. Taşlama işlemine göreceli olarak büyük aşındırıcı parçacıklar ile başlanır ve her adımda daha küçük aşındırıcı parçacığa geçilir. Aşındırıcı parçacık büyüklüğü için Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü “elek numarası”, Uluslararası Standartlık Örgütü “elmas parçacık büyüklüğü” bilgisini kullanır. Kalibre edilmiş kontrol elekleri ile elmas büyüklüğü tayin edilir [25]. Sınıflandırma, ISO 6106:2005 standardında yer alan en büyük ve en küçük parçacık çapları arasındaki parçacıklara göre yapılır. Çizelge 3.2’de elmas parçacık büyüklüğü ve elek numarası ile ISO standartlarına göre gösterim arasındaki ilişkiyi vermiştir.

Çizelge 3.2. ISO standartları, eşdeğer elek numarası ve elmas parçacık büyüklüğü arasındaki ilişki

| ISO Standartlarına göre<br>Elmas Gösterimi | Eşdeğer Elek Numarası | Elmas Parçacık Büyüklüğü<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| D251                                       | 60/70                 | 250/212                                       |
| D181                                       | 80/100                | 180/150                                       |
| D126                                       | 120/140               | 125/106                                       |
| D91                                        | 170/200               | 90/75                                         |
| D76                                        | 200/230               | 75/83                                         |
| D64                                        | 230/270               | 63/53                                         |
| D54                                        | 270/325               | 53/45                                         |
| D46                                        | 325/400               | 45/38                                         |

Takım konsantrasyonu, aşındırıcı uca karıştırılmış olan elmas miktarıdır. Örneğin konsantrasyon değeri 100 ise, matris hacminin %25'ine eşittir. Bu, bir  $\text{cm}^3$  aşındırıcı kaplamanın içindeki  $\text{cm}^3$  başına 4,4 karat'a karşılık gelir [78]. Çizelge 3.3'te aşındırıcı parçacık konsantrasyonuna göre hacimce ve ağırlıkça aşındırıcı parçacık miktarı verilmiştir.

Çizelge 3.3. Aşındırıcı parçacık konsantrasyonuna göre hacimce ve ağırlıkça aşındırıcı parçacık miktarı

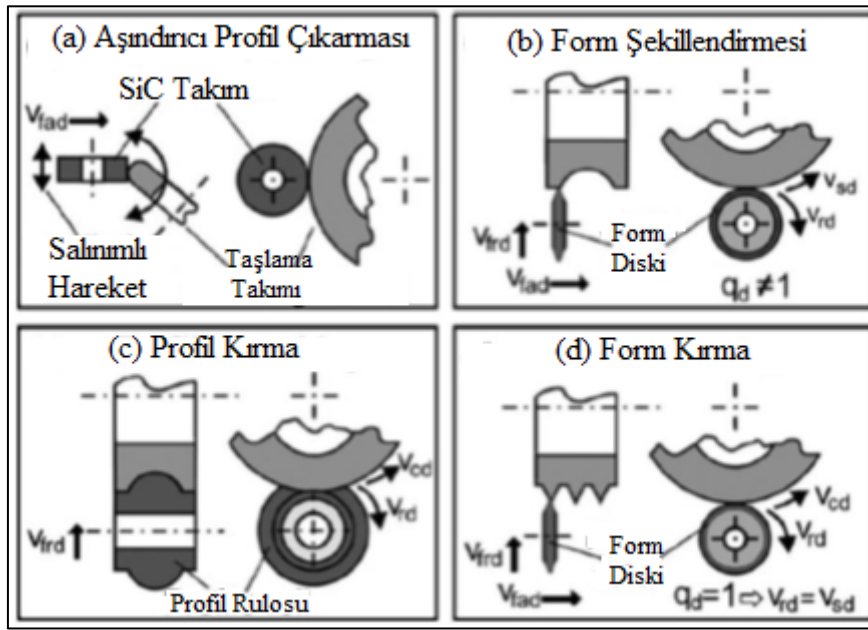
| Gösterim | Miktar (Hacimce %) | Ağırlık (karat/ $\text{cm}^3$ ) | Ağırlık<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|----------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| C150     | 37,5               | 6,6                             | 1,32                                  |
| C100     | 25                 | 4,4                             | 0,88                                  |
| C75      | 18,75              | 3,3                             | 0,66                                  |
| C50      | 12,5               | 2,2                             | 0,44                                  |

### Şekillendirme teknikleri

Taşılama takımının formu, aşındırıcı tabakanın oluşturulmasıyla elde edilir. İstenilen şekli oluşturmak için farklı şekillendirme teknikleri kullanılır. Bu şekillendirme teknikleri daha sonra taşılama takımının formunu koruması için düzenli aralıklarla tekrarlanır. Düzeltme işlemi dikkatli yapılmalıdır.

Optik fiberleri taşlamak için kullanılan çok ince elmas parçacık büyüklüğüne sahip taşlama takımlarına form verme işlemi için yapılan karşılaştırmada, gevşek aşındırıcı düzeltme işleminin daha az elmas çıkardığını ve taşlama takımında daha aktif parçacıklar bıraktığını göstermektedir [83].

Farklı şekillendirme teknikleri, Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Farklı şekillendirme teknikleri (a) aşındırıcı profil çıkarması (b) form şekillendirmesi (c) profil kırma (d) form kırma [84]

Şekillendirme işlemi Şekil 3.12 (a)’da görüldüğü gibi taşlama takımı profilini taşlamak için vitrifiye bağ yapılı silisyum karbür gibi yumuşak bir taşlama takımı kullanılarak aşındırıcı profil çıkarma işlemi ile yapılabilir. Şekil 3.12 (b)’deki form şekillendirmesi işlemi de benzerdir. Ancak form takımı elektrolitik nikel gibi daha sert bağdan ve büyük taneli elmas parçacıklardan oluşur. Düzeltme takımı hızı ( $V_{rd}$ ) ve taşlama takımı hızı ( $V_{sd}$ ) arasındaki oran 0.7’den 0.9’a kadar değişir. Şekil 3.12 (c)’de profil kırma yöntemi verilmiştir. Bu yöntem, kırılmanlı bağları olan takımların düzeltilmesinde uygulanan yöntemdir. Şekillendirme silindiri, takımın negatifine şekillendirilmiştir. Besleme hızı ( $V_{fd}$ ), taşlama takımının dönüşü başına birdir. Takım 2 m/s gibi çok düşük hızda döner. Teğetsel kuvvetlerden kaçınmak için hız oranı 1’e 1 tutulur. Şekil 3.12 (d)’de verilen form kırma işleminde ise, taşlama takımı boyunca  $V_{fad}$  hızıyla ilerleyen bir form diski kullanılır [84].

Başka bir şekillendirme tekniği ise elmas uçlu tornadır. Adından da anlaşılacağı gibi, tek elmas uç doğru noktadan taşlama yapar. Ucun dönüş hızı ayarlanarak, profil şeklinin doğruluğu sağlanır [25]. Form şekillendirmesi tekniği ile benzerdir (Bkz. Şekil 3.12(b)). Elmas ucun yarıçapı taşlama takımı üzerinde küçük bir çıkıntı bırakır [85].

### *Elmas açma teknikleri*

Şekillendirme operasyonundan sonra, aşındırıcı elmaslar bağ ile aynı seviyeye gelir. Bu nedenle belli bir kullanımdan sonra, taşlama takımı keskinliğini kaybeder ve işlem sırasında taşlama tezgahının motorlarında yük oluşmasına, iş parçasının yüzeyinde iz kalmasına ya da küçük kırıklar ve çatlaklar oluşmasına neden olur. Bu bağa gömülü aşındırıcı elmasları açmak gereklidir. Elmas açma işleminde, aşındırıcı katmanı oluşturan elmasların etrafındaki bağ dikkatli bir şekilde kaldırılır ve yeni aşındırıcı elmaslar ortaya çıkartılır. İyi bir taşlama verimi elde etmek için elmas açma işleminin dikkatli bir şekilde yapılması gerekir, çünkü bu duruma maruz kalan elmas parçacıkların eksilmesine veya elmasların çekilmesine yol açabilir. Elmas açma işlemi, taşlama işlemi boyunca meydana gelen kırılmayı ve elmasların çekilmesini önlemek için sık sık yapılması gerekir. Elmas takımın bütünlüğünü korumak için üzerindeki yüksek yüklerden kaçınılmalıdır. Taşlama takımına form verilmesi ve elmas açılması doğrudan taşlama verimliliğini etkiler. En iyi hız oranını, form verme ve elmas açma zamanını ve süreçlerini daha iyi anlamak için çeşitli deneyler yapılmıştır [86]. Elmas açma işlemi işlem sırasında elektrolitik yöntemle yapılabildiği gibi daha sonrasında veya öncesinde bileme yöntemiyle de yapılabilir.

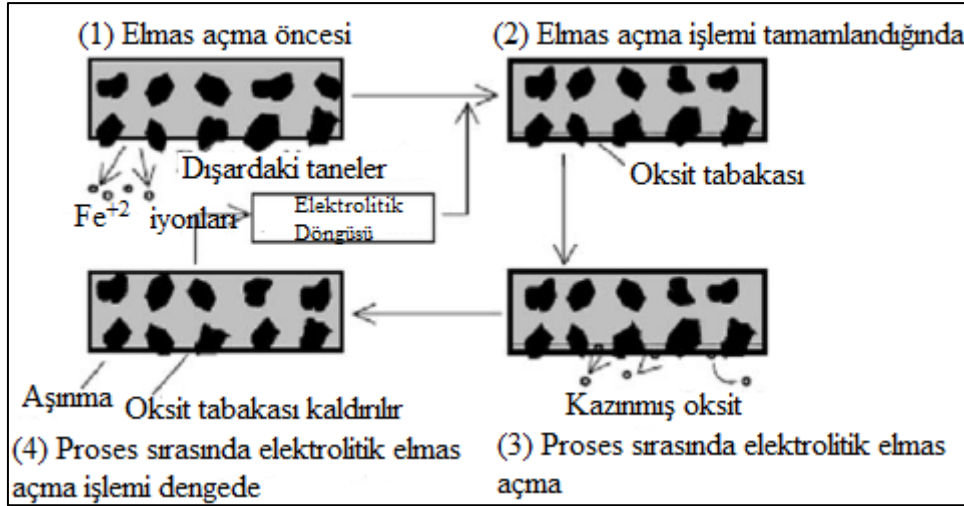
### *Elmas açma taşları*

1989'da Inasaki, reçine bağ kullanılmış takımların elmas açma tekniklerini tartıştı. Kullanılan elmas açma çubukları silikon karbür malzemeden yapılmıştır. Alümina oksit kaplama çubuklarda reçine ile bağlanmış taşlama takımlarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır [82, 87].

Şuan bu iş için bir çok firmanın bileme taşları mevcuttur.

### Elektrolitik elmas açma

Bu işlem operasyon sırasında yapılabildiği için, sürekli olarak taşlama takımında elmas açma işlemi yapılabilir. Bu teknik metaldan yapılmış taşlama takımı üzerinde başarıyla denenmiştir. Elektrolitik elmas açma tekniğinin süreçleri Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Elektrolitik elmas açma tekniği [88]

Elektrolitik elmas açma düzeneği doğru akım güç kaynağı, elektrot ve metal bağlı takımdan oluşur. Taşlama soğutma sıvısı ile beslendiğinde, taşlama takımı ve elektrot arasında bir elektroliz oluşur. Devamında bir oksit tabakası oluşur ve taşlama boyunca kaldırılır. Bu oksit tabakası gittiğinde elektroliz tekrarlanır. Taşlama takımında bu sürekli elmas açma işlemi, küçük elmas parçacık boyutuna sahip takımların kullanılmasını sağlar.

Bu tekniğin bir sınırlaması, iletken bir aşındırıcı tabakanın gerekliliğidir. Karbonla karıştırılmış bir reçine bağlı taşlama takımı geliştirilmiştir ve 2004 yılında bu takım kullanılarak elmas açma işleminin gerçekleştirildiği raporlanmıştır [89]. #8000 olarak sınıflandırılan elmas parçacık büyüklüğüne sahip taşlama takımı kullanılarak silikon malzemede bu teknik olmaksızın yüzeydeki en tepe ve en çukur nokta arasındaki mesafe 185 nm iken, bu teknik ile 30 nm’e inmektedir. Metal ile bağlanmış takımdansa metal içermeyen takımla daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Ama kesme kalitesi, takım eksenel yükünün artmasıyla düşer [25].

Bu tekniğin önemli bir diğer sınırlaması, takım formunun zamanla değişmesidir. Bu tekniğin sürecini kontrol etmek ve takım aşınmasını telafi etmek için araştırmalar yapılmaktadır [90].

### Lazer ile elmas açma

Alternatif bir teknik olarak verilir Nd:YAG lazerlerin bronz bağlı [91], vitrifiye bağlı [92] ve reçin bağlı [93] takımlar üzerinde başarılı olduğu gösterilmiştir. Termal herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Temassız bir elmas açma operasyonu olarak, reçine bağlı takımlar için alümina oksit zımpara çubuklarından daha uygun bir tekniktir [93].

### Nozul ve soğutma sıvısı seçimi

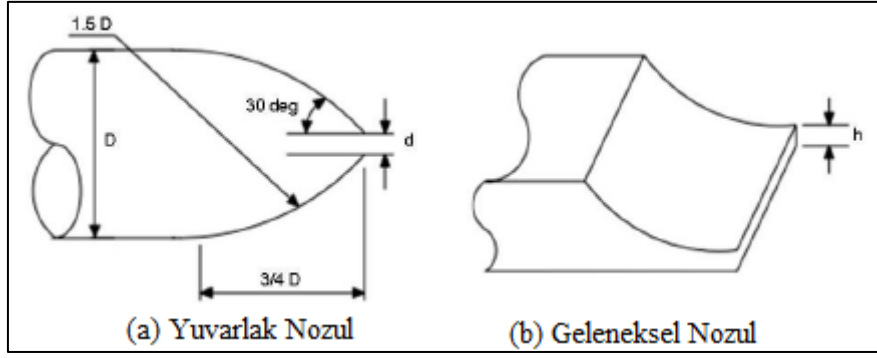
Nozul tasarımı ve soğutucu tipi seçimi, taşlama takımı aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyebileceğinden önemlidir [94].

### *Nozul*

İyi bir nozul tasarımı ile Reynolds sayısı 2300'ün altında olan laminar akış elde edilmiştir. [95]. Reynolds sayısı (Re) bir nozul için Eş. 3.6 kullanılarak bulunur [96].

$$Re = \frac{\rho \times V_{slot} \times h_{slot}}{\eta} \quad (3.6)$$

Eş. 3.6'da  $\eta$  akışkanın dinamik vizkozitesini (su için 0.001 Pa.s),  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu (su için 1000 kg/m<sup>3</sup>) göstermektedir. Slot nozul için  $V_{slot}$  akışkanın hızını ve  $h_{slot}$  slotun kalınlığını ifade etmektedir. Tasarlanan nozul kullanımı bu şartlara ulaşılmasına yardımcı olur [95]. Şekil 3.14'te 2 ayrı nozul tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Farklı nozul tasarımları (a) Yuvarlak nozul (b) Geleneksel nozul [97]

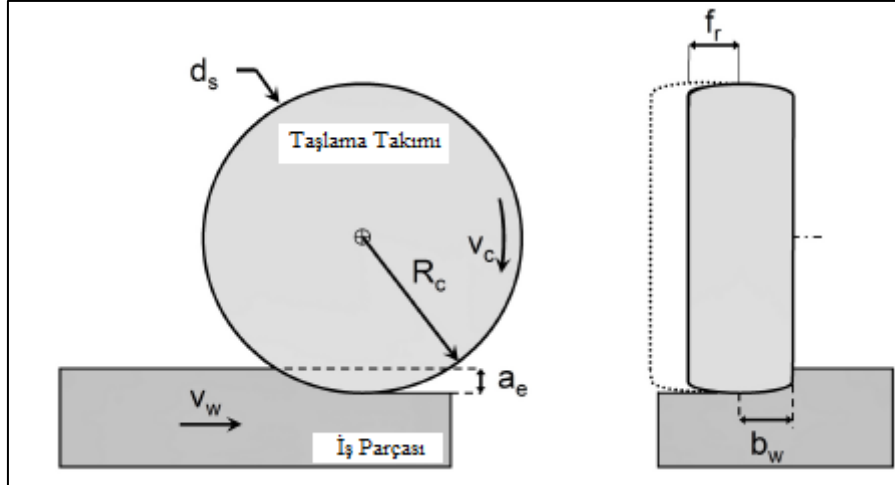
Nozul çıkış yüksekliği, sırasıyla yuvarlak ve geleneksel nozul için  $d$  ve  $h$ 'dir. Yuvarlak nozulün şekli giriş çapı  $D$  ile orantılıdır. Tutarlı bir akışın kullanılması, taşlama bölgesine farklı mesafelerde çalışan bir soğutma verimliliğine sahip olmasına yardımcı olur. Taşlama takımının hızı ve soğutma sıvısı hızının mümkün olduğunca yakın olması taşlama takımı üzerindeki sürtünme etkisini azaltacaktır [94]. Ayrıca taşlama takımının etrafında oluşturulan hava bariyerini kırmaya da yardımcı olur [97].

#### *Soğutma sıvısı*

Soğutma sıvısı taşlama takımı ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltır. Talaşları temas bölgesinden uzaklaştırır ve taşlama takımının aşırı yüklenme riskini azaltır. Takımın ve taşlama temas bölgesinin yanmasını önlemek için soğutulması gerekir [97]. Soğutma sıvısı yağ bazlı ve su bazlı olarak 2'ye ayrılır [94]. Su bazlı soğutma sıvısına çok az miktarda yağ oranına sahip su ile karıştırılır. Seramiklerin taşlanma operasyonunda su bazlı soğutma sıvıları başarıyla kullanılır [30]. Kimyasal ve fiziksel soğutucu özelliklerini geliştirmek için katkı maddeleri kullanılır. Diğer katkı maddeleri bakteri önleyici ve köpük gidericidir. Kullanılan soğutma sıvısının özellikle devir daim yapmadığı sürelerde içerisinde bakteri oluşumunun önlenmesi ya da azaltılması amacı ile sıvı içine ilave edilir. Bakteri oluşumu sıvı içerisinde topaklanmalara neden olduğu için bu topaklanmalar çalışma esnasında su çevrim hattındaki tezgah ekipmanlarının su kanallarını tıkayarak, tezgahın arıza vermesine neden olurlar. Ayrıca kullanılan soğutma sıvısının devir daimi sürecinde, besleme hattından santrifüj tankına çevirilen su, su seviyesinin üstünden tanka akıtılarak karışır. Bu karışma sırasında sudaki çalkalanma etkisi ile de tankta su yüzeyinde köpük oluşumu meydana gelir. Oluşan köpüğün birikmesi sonucunda tanktan taşmalar meydana gelebilir. Köpük oluşumunu engellemek için tanka köpük giderici eklenir.

### 3.3. Taşlama İşlemi Karakterizasyonu

Taşlama işlemini karakterize etmede kullanılan kesme derinliği, devir başına ilerleme ve iş parçasının ilerleme hızı gibi temel parametreler Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Taşlama işlem parametrelerinin şema üzerinde gösterimi

Malzeme kaldırma oranı Eş. 3.7 ile verilir.

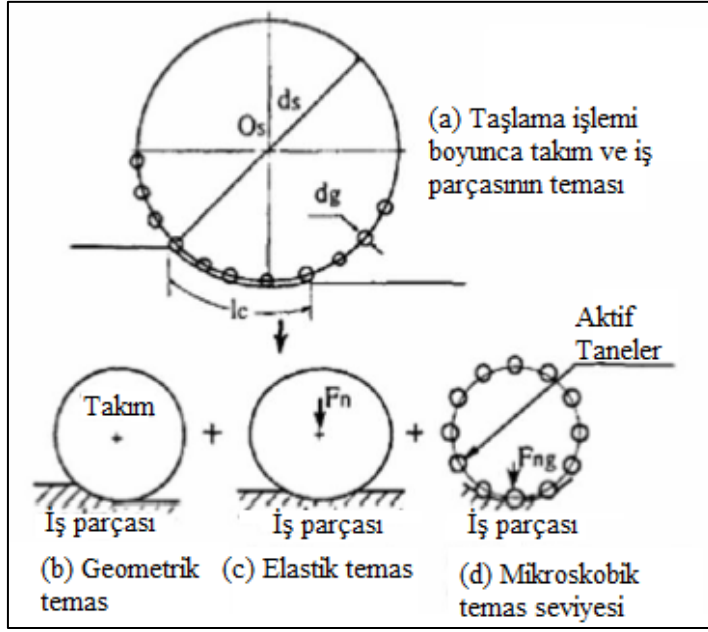
$$Q_w = a_e \times f_r \times v_w \quad (3.7)$$

Eş. 3.7'de,  $a_e$  kesme derinliğini,  $f_r$  devir başına ya da adım başına ilerlemeyi ve  $v_w$  iş parçasının ilerleme hızını tanımlar. Eğer bu ifade taşlama takımının temas genişliğine ( $b_w$ ) bölünürse özgül malzeme kaldırma oranı bulunur. Eş. 3.8 kullanılarak özgül malzeme kaldırma oranı hesaplanır.

$$Q'_w = \frac{a_e \times f_r \times v_w}{b_w} \quad (3.8)$$

#### 3.3.1. Temas uzunluğu

Taşlama işleminde, ideal temas uzunluğu, kesme derinliği ve takım çapı ile orantılıdır. Gerçek temas uzunluğu Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Gerçek temas uzunluğu (a) taşlama işlemi boyunca takım ve iş parçasının teması (b) geometrik temas (c) elastik temas (d) mikroskobik temas seviyesi [25]

Gerçek temas uzunluğu,  $l_c$ , iş parçası ile taşlama takımı arasındaki temas basıncından ve kesme derinliğinden etkilenir. Uygulanan bir kuvvet ( $F_n$ ) için, elde edilen elastik temas uzunluğu,  $l_f$ 'dir. Belirli bir kesme derinliği için temas uzunluğu  $l_g$ 'dir.

Gerçek temas uzunluğunun hesaplaması için farklı yayınlanmış denklemler aşağıda özetlenmiştir [25]. Hertz temas teorisini kullanarak hesaplanan temas uzunluğu Eş. 3.9 ile verilmiştir.

$$l_c = \sqrt{8 \times F'_n (K_s + K_w) d_s + a_e d_s} = \sqrt{l_f^2 + l_g^2} \quad (3.9)$$

Eş. 3.9'daki  $F'_n$ , spesifik normal taşlama kuvvetini,  $K_s$  taşlama takımı elastik katsayısını,  $K_w$  iş parçası elastik katsayısını,  $a_e$  kesme derinliğini ve  $d_s$  taşlama takımının çapını ifade eder. Taşlama takımı ve iş parçasının elastik katsayısı Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'de verilmiştir.

$$K_s = (1 - \nu_s^2) / (\pi E_s) \quad (3.10)$$

$$K_w = (1 - \nu_w^2) / (\pi E_w) \quad (3.11)$$

$E_s$  ve  $E_w$  sırayla taşlama takımı ve iş parçasının elastik modülü ve  $V_s$  ve  $V_w$  ise sırayla taşlama takımı ve iş parçasının Poisson oranıdır. Hertz temas uzunluğuna teğetsel kuvvet katkısının ihmal edilebilir olduğu düşünülürse, basınç yerine spesifik normal taşlama kuvveti kullanılır. Bu nedenle,  $l_c$ , spesifik normal taşlama çok küçük olduğunda  $l_g$ 'ye; kesme derinliği çok küçük olduğunda  $l_f$ 'ye eşittir.

### 3.3.2. Birim alandaki aktif aşındırıcı parçacık sayısı

Birim alandaki aktif parçacık sayısı hesaplanırken kullanılan birden fazla eşitlik vardır. Xu, Jahanmir ve Ives (1997) Eş. 3.12, Li ve Liao (1997) Eş. 3.13 ve Eş. 3.14'deki denklemleri kullanmıştır. Bu eşitliklerde elmas parçacık büyüklüğü ve konsantrasyonu gibi taşlama takımı özellikleri kullanılır.

$$C_1 = \frac{4f}{d_g^2 (4\pi/3v)^{2/3}} \quad (3.12)$$

Elmas parçacık çapı  $d_g$  olarak ifade edilir,  $d_g=15,2 \text{ M}^{-1}$  ve elek numarasını gösteren  $M$  ile ters orantılıdır. Elmas parçacıkların hacimsel kesri  $v$  ile ifade edilir. Aktif elmasların yarısı için 0,5 değerini alan  $f$ , bir sabittir [100].

$$C_2 = \beta_s \times \frac{6v}{\pi d_g^2} \quad (3.13)$$

$$C_3 = \left( \frac{6v}{\pi d_g^3} \right)^{2/3} \quad (3.14)$$

$\beta_s$ , takımdaki aşındırıcı parçacıkların gücünü ifade etmektedir ve 0 ve 1 arasında değişmektedir [99]. Bütün eşitliklerde elmas parçacıkların geometrisi, çapı  $d_g$  olan küre kabul edilmiştir. Göreceli olarak küçük elmas parçacıklar için hesaplanan değerler, tahminlerin üstünde çıkmaktadır [100].

Deneyssel yöntemler ile de birim alandaki aktif aşındırıcı parçacıklar sayısı belirlenir. Optik mikroskop veya üç boyutlu profilometre kullanarak alan başına elmas parçacık sayısı sayılır.

### 3.3.3. En yüksek deforme olmayan talaş kalınlığı

Farklı taşlama işlemlerini karşılaştırmak için en yüksek deforme olmayan talaş kalınlığı ( $h_{max}$ ) kullanılır [68]. Farklı taşlama parametrelerinin, spesifik işleme enerjisi, yüzey kalitesi veya işleme kuvvetleri üzerindeki etkisi en yüksek deforme olmayan talaş kalınlığı kullanılarak incelenmiştir [87, 101, 102]. En yüksek deforme olmayan talaş kalınlığını hesaplamak için Eş. 3.15 ve Eş. 3.16 kullanılır [68, 102].

$$h_{max} = \sqrt{\frac{3}{C \times r} \times \frac{v_w}{v_c} \times \sqrt{\frac{a_e}{d_s}}} \quad (3.15)$$

$$h_{max} = \sqrt{\frac{3}{C \times \tan \theta} \times \frac{v_w}{v_c} \times \sqrt{\frac{a_e}{d_s}}} \quad (3.16)$$

Eş. 3.15 ve Eş. 3.16, birim alan başına aktif parçacık sayısı (C) ve parçacık geometrisi ile takım topografisini içerir. Ayrıca talaş genişliğinin talaş kalınlığına oranı (r) veya deforme olmayan talaşın enine kesiti için yarı-uç açısı ( $\theta$ ) kullanılır. Bu değerleri deneysel olarak belirlemek zordur. Genellikle r için 10 değeri seçilir [103]. Huang, Yin ve Zhou (2003) yılında keskin parçacıklar için  $\theta$  değerini  $75^\circ$  daha körelmiş parçacıklar için  $50^\circ$  olduğunu raporlamıştır. Parçacık geometrisi üçgen olarak düşünülür.

Mayer ve Fang (1994),  $h_{max}$ 'ı hesaplamak için bu iki farklı yolu karşılaştırmıştır. C ve r'nin ölçülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Takımdaki aşındırıcı parçacık kesme derinliğini ölçmek için kullanılacak en uygun denklem Eş. 3.16'dır.

Daha sonra silikon karbür üzerinde, taşlama deneylerine dayanan değiştirilmiş bir denklem geliştirilmiştir. Bu model, önceki bilinen modellere ek olarak, Eş. 3.17'de verildiği gibi taşlama takımının ve iş parçasının elastik modülünü içerir [104].

$$h_{max2} = \left[ \frac{E_1}{E_2} \right]^{0.548} \times h_{max} \quad (3.17)$$

Eş. 3.17'deki  $E_1$  taşlama takımının esneklik modülünü temsil eder, aslında taşlama takımındaki kesme malzemesinin esneklik modülüdür.  $E_2$  ise iş parçasının elastik modülünü temsil eder. Bu varsayım, 4 mm'lik aşındırıcı malzeme kalınlığı için yapılmıştır. Elastik modülleri ve denklem faktörü daha kalın aşındırıcı tabakalar ve farklı iş parçası malzemeleri için yeniden tanımlanmalıdır.

### 3.3.4. Kesme kuvvetleri

Liang ve Devereux (1993), aşındırıcı parçacıklara uygulanan giricilik yükü olarak normal kesme kuvvetini tarif eder. Teğetsel taşlama kuvvetleri ise aşındırıcı parçacıklar ve iş parçası arasındaki soğutucu akışkan etkisiyle birlikte sürtünmeden kaynaklanır. Eş. 3.18'de normal ve Eş.3.19'da teğetsel kuvvetler verilmiştir.

$$F_n = C_n \times v_w \times a_e \quad (3.18)$$

$$F_t = C_t \times v_w \times a_e \quad (3.19)$$

$C_n$  ve  $C_t$  sabitlerdir. Normal ve teğetsel kuvvetler, iş parçası hızı ve kesme derinliği ile orantılıdır. Normal ve teğetsel kuvvetler arasında sürtünme katsayısı ile orantılı bir ilişki vardır ve Eş. 3.20'de verilmiştir.

$$F_t = \mu \times F_n \quad (3.20)$$

Spesifik normal kesme kuvveti ( $F'_n$ ) ve spesifik teğetsel kesme kuvveti ( $F'_t$ ) Eş. 3.21 ve Eş. 3.22 kullanılarak hesaplanır.

$$F'_n = \frac{F_n}{b_w} \quad (3.21)$$

$$F'_t = \frac{F_t}{b_w} \quad (3.22)$$

Seramiklerde, kırılğan malzemelerde veya mikro kesmelerde malzeme kaldırma mekanizmasını anlamak için kesme kuvvetleri değerlendirilir. Eş. 3.23 ve Eş. 3.24 sırayla bir mikro kesme modunu ve elmas parçacıkları yerinden çıkarma mekanizmasını anlamak

için kullanılır [102]. Eş. 3.25’de iş parçası özelliklerine bağlı olarak spesifik normal taşlama kuvveti verilmiştir [83].

$$F_n = \beta_1 \times H \times \left( \frac{v_w}{v_s} \right) \times \alpha_e \quad (3.23)$$

$$F_n = \beta_2 \times \left( \frac{K_c^{1/2} H}{E^{2/5}} \right) \times \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^{3/4} \times \alpha_e \quad (3.24)$$

$$F'_n = \beta_3 \times \left( \frac{K_c^{1/2} H^{9/10}}{E^{2/5}} \right) \times \left( \frac{v_w}{v_s} \right)^{3/4} \times \alpha_e^{11/12} \times d_s^{1/12} \quad (3.25)$$

$\beta_1$ ,  $\beta_2$  ve  $\beta_3$  taşlama takımı topografisini temsil eden sabitlerdir. Normal taşlama kuvveti hem taşlama takımının hem iş parçasının hızlarıyla orantılıdır.

Farklı çalışmalar toplam normal taşlama kuvvetinin, kesme kuvvetinin ve bir soğutma sıvısı kaynaklı kuvvetin kombinasyonu olduğunu gösterir. Soğutma sıvısının neden olduğu kuvvet, taşlama takımı ve iş parçası arasında üretilen hidrodinamik basınçtan kaynaklanır ve taşlama takımı hızı ile artar. Bu kuvvet kesme kuvveti ile aynı büyüklüğe sahiptir hatta bazen daha da yüksektir [94]. 2005’te seramik malzeme üzerinde soğutma sıvısının sebep olduğu kuvvet normal kesme kuvvetinden 6 kat daha büyük olduğu raporlanmıştır [83]. Toplam normal taşlama kuvvetlerini azaltmak için pabuç nozul kullanmayı önerilmiştir [105]. Pabuç nozul tasarımı, taşlama boşluğuna ulaşmak için gerekli olan soğutma suyu akışını azaltır. 30 m/s gibi düşük taşlama takım hızları için soğutma sıvısı kaynaklı kuvvet önemli ölçüde azalır.

Takım tezgah kararlılığının normal taşlama kuvveti üzerindeki etkisi de incelenmiştir [61]. Bu çalışmada gerçek kesme derinliğini ( $a_t$ ) ve tezgah statik kararlılığında ( $k_s$ ) dikkate alarak değiştirilmiş bir taşlama kuvveti ( $F_z$ ) tanımlamak anlamına gelir. Eş. 3.26’da değiştirilmiş taşlama kuvveti verilmiştir.

$$F_z = F_0 + C_a a_s = \frac{F_0 + C_a a_t}{1 + C_a / k_s} \quad (3.26)$$

Eş. 3.26’daki  $F_0$ , kırılma kuvvetini;  $C_a$ , taşlama şartları ile belirlenen sabiti ( $a$  sabiti) ve  $a_s$  taşlama takımının ayarlanmış derinliğini temsil eder.

Elmas parçacık başına normal kesme kuvveti ( $f_{gn}$ ), yüzeyaltı hasarlarının araştırılması için kullanılan sertlik deney izi teorisi gibi bir çok modelde kullanılır [61]. Eş. 3.27’de elmas parçacık başına normal taşlama kuvveti verilmiştir.

$$f_{gn} = \frac{k_f F_z}{N} = \frac{2k_f F_z}{\pi R C b_w} \quad (3.27)$$

Eş. 3.27’de  $k_f$ , a sabitini, R, takım kenar yarıçapını ve N aktif kesme noktalarının sayısını temsil eder. Matsuo, Toyoura, Oshima ve Ohbuchi (1989), tek bir parçacık testi kullanarak, çeliklerdeki taşlama kuvvetleri üzerindeki parçacık şeklinin ve keskinliğinin etkisini incelemişlerdir. Körelmiş bir parçacık daha yüksek normal taşlama kuvvetlerine yol açar. Farklı parçacık şekilleri ile farklı teğetsel taşlama kuvvetleri elde edilirken normal taşlama kuvvetleri benzer elde edilmiştir.

### 3.3.5. Kesme gücü kayıpları

Toplam güç ( $P_{tot}$ ), işleme gücüne ( $P_c$ ), soğutucu gücüne ve genel güç kaybına bölünür. Genel güç kaybı ( $P_v$ ) soğutma sıvısı güç kaybından ve taşlama takımını döndürmek için gerekli olan rölanti kesme gücüne ( $P_i$ ) bağlıdır. Soğutma sıvısı güç kaybı teğetsel gücü arttıran hidrodinamik etkiye bağlıdır. Soğutma sıvısı hızının ve sürtünme etkisinin taşlama temas bölgesine doğru ivme kazanması diğer iki faktördür [25]. Soğutma sıvısı hızı genelde taşlama takımı hızından daha düşüktür. Soğutma sıvısı güç kaybı, taşlama takımı hızının azalmasıyla önemli ölçüde azalır [94]. 30 m/s’lik düşük taşlama takımı hızı için, soğutucu güç kaybının önemli ölçüde azalması beklenir.

Taşlama gücü, Eş. 3.28’deki gibi teğetsel taşlama kuvveti kullanılarak hesaplanır [68].

$$P_c = F_t \times (v_s \pm v_w) = F_t \times v_s \quad (3.28)$$

İş parçası ilerleme hızı, taşlama takımı hızından çok daha küçük olduğu için Eş. 3.28 basitleştirilmiştir.

### 3.4. Yüzey Dokusu ve Yüzey Formu

Taşıma işlemi, yüzey pürüzlülüğü, yüzey deseni ve yüzeydeki tepe ve çukur nokta arasındaki değer kullanılarak karakterize edilir. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey profili ISO 4288:1998 standardında yer alan kriterlere göre ölçülmelidir. Çizelge 3.4'te ISO 4288:1998 standardına göre bir 2D ölçümü için önerilen örnekleme ve değerlendirme uzunlukları verilmiştir.

Çizelge 3.4. ISO 4288:1998 standardına göre örnekleme ve değerlendirme uzunlukları

| Ra<br>( $\mu\text{m}$ )                                                           | Pürüzlülük Örnekleme<br>Uzunluğu ( $l_r$ ) (mm) | Pürüzlülük Değerlendirme<br>Uzunluğu ( $l_n$ ) (mm) |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $(0,006) < Ra \leq 0,02$                                                          | 0,08                                            | 0,4                                                 |
| $(0,02) < Ra \leq 0,1$                                                            | 0,25                                            | 1,25                                                |
| $0,1 < Ra \leq 2$                                                                 | 0,8                                             | 4                                                   |
| $2 < Ra \leq 10$                                                                  | 2,5                                             | 12,5                                                |
| $10 < Ra \leq 80$                                                                 | 8                                               | 40                                                  |
| Rz <sup>a</sup><br>Rz1max. <sup>b</sup><br>( $\mu\text{m}$ )                      | Pürüzlülük Örnekleme<br>Uzunluğu ( $l_r$ ) (mm) | Pürüzlülük Değerlendirme<br>Uzunluğu ( $l_n$ ) (mm) |
| $(0,025) < Rz, Rz1max. \leq 0,1$                                                  | 0,08                                            | 0,4                                                 |
| $0,1 < Rz, Rz1max. \leq 0,5$                                                      | 0,25                                            | 1,25                                                |
| $0,5 < Rz, Rz1max. \leq 10$                                                       | 0,8                                             | 4                                                   |
| $10 < Rz, Rz1max. \leq 50$                                                        | 2,5                                             | 12,5                                                |
| $50 < Rz, Rz1max. \leq 200$                                                       | 8                                               | 40                                                  |
| <sup>a</sup> Rz; Rz, Rv, Rp, Rc ve Rt ölçülürken kullanılır.                      |                                                 |                                                     |
| <sup>b</sup> Rz1max; Rz1max., Rv1max., Rp1max., ve Rc1max. ölçülürken kullanılır. |                                                 |                                                     |

Örnekleme uzunluğu ( $l_r$ ) seçimi iki adımda yapılır. Beklenen yüzey pürüzlülüğü, kullanılacak örnekleme ve değerlendirme uzunluğunu ( $l_n$ ) tanımlar. Örnekleme uzunluğu, beklenen yüzey pürüzlülüğü gerçek yüzey pürüzlülüğüyle eşleşene kadar değiştirilir.

### 3.4.1. Yüzey pürüzlülüğü

Aritmetik ortalamalı yüzey pürüzlülüğü, Ra, ISO 4287:2000 standartlarına göre “örnekleme uzunluğu (lr) içindeki ortalama çizgiden yüzey profili yüksekliğinin sapmalarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması” olarak tanımlanır. Toplam tepe ve çukur yüzey pürüzlülüğü, Rz ve en yüksek tepe ve çukur nokta yüzey pürüzlülüğü, Rt, ISO 4287:1984 standartlarına göre “sırasıyla değerlendirme uzunluğu ve örnekleme uzunluğu içindeki en yüksek tepe noktasının ve en düşük çukur noktasının yüksekliğinin toplamı” olarak tanımlanır.

Taşlama operasyonunda, aritmetik pürüzlülüğün hesabı için kabaca bir yaklaşım  $R_t = 4 \times R_a$  ilişkisi kullanılarak yapılır [68]. Diğer yaklaşımlar deneylere dayalı olarak geliştirilmiştir. Bir cam külçenin taşlanması,  $R_z = 5,81 \times R_a^{0.86}$  ilişkisi kurulmuştur [107].

Hed, Edwards ve Davis (1988), yüzey pürüzlülüğünün Young modülü ile ters orantılı olduğunu belirtmiştir. Zhao, Liang, Stephenson ve Corbett (2007), aynı taşlama koşullarında yüzey pürüzlülüğünün kırılma tokluğu arttıkça azaldığını belirtmiştir.

Maksimum deforme olmayan talaş kalınlığı ve talaş kesit alanı, yüzey pürüzlülük değerleri ile orantılıdır [110]. Yüzey pürüzlülüğünü tanımlayabilmek için taşlama parametreleri ve taşlama takımını temel alan farklı denklemler geliştirilmiştir. Eş. 3.29’da verilen taşlama parametrelerine ve taşlama takımı tahmini topografisine dayanan yüzey tarak yüksekliği ( $h_s$ ) örnek olarak verilebilir [110].

$$h_s = \frac{v_w^2}{4 \times v_c^2 \times d_s \times C} \quad (3.29)$$

Eş. 3.29 yüzey pürüzlülüğü Ra ile bir takım benzerlikleri içermektedir. Eş. 3.29’daki  $d_s$ , taşlama takımı çapını ifade eder. Yüzey pürüzlülüğü ile orantılı bir diğer parametre ise teorik kesme kenarı aralığıdır,  $w=C^{1/2}$  [110].

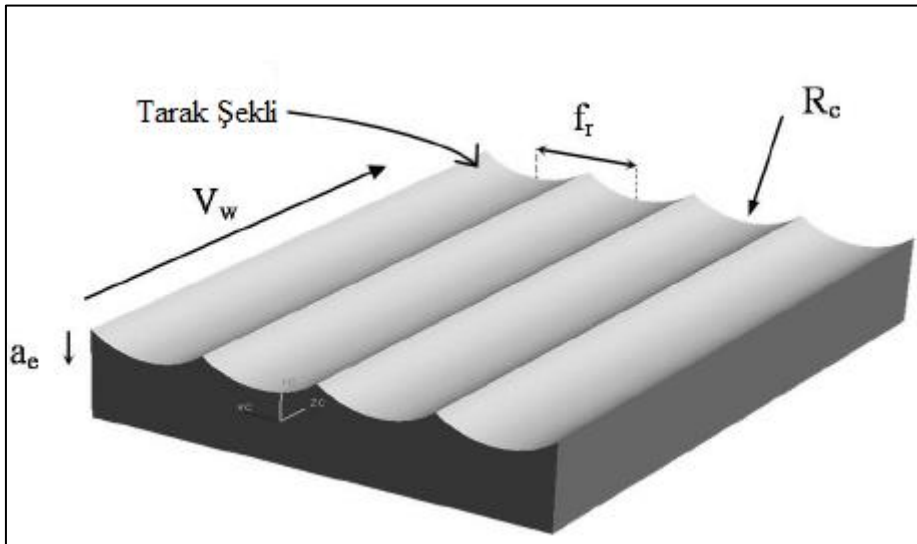
Daha kesin tahminler elde etmek için, başka denklemler geliştirilmiştir. Takım aşınmasının etkisi de yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametredir. Ama, takım topografisi gibi konularda hala bir çok varsayım yapılmaktadır. İstatiksel yaklaşımlar [111] rapor edilmiştir ancak bir

elmas parçacığın oluşturduğu bir oluğun dairesel olduğu gibi önemli varsayımlara dayanmaktadır [112].

Yüzey pürüzlülüğündeki bazı değişimler hesaba katılmalıdır. Yüzey pürüzlülüğünün zemin yüzeyinde her yönde aynı kaldığı varsayılmaktadır. Spesifik taşlama modları kullanarak farklı yüzey desenleri üretilmektedir. Kesme yönü boyunca ve çaprazında ölçülen yüzey pürüzlülüğünün farklı olduğu bildirilmiştir [113].

### 3.4.2. Tepe ve çukur profili

Belirli bir taşlama modu kullanılarak elde edilen teorik yüzey profili Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Tepe ve çukur profili

Bir taşlama modu tarafından üretilen bu tarak şekli, bir elmas torna aleti tarafından oluşturulmuş olabilir. Elmas torna aleti için elde edilen yüzey profili, taşlama takımı aşındırıcı tabakasının kesme yarıçapıyla, elmas takım yarıçapının değiştirilmesiyle geliştirilen bir denklem kullanılarak tahmin edilebilir [114]. Yüzey profili,  $P_t$ , Eş. 3.30 ile verilir.

$$P_t = R_c - \sqrt{R_c^2 - \frac{f_r^2}{4}} = R_c \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{f_r^2}{4 \times R_c^2}} \right] \quad (3.30)$$

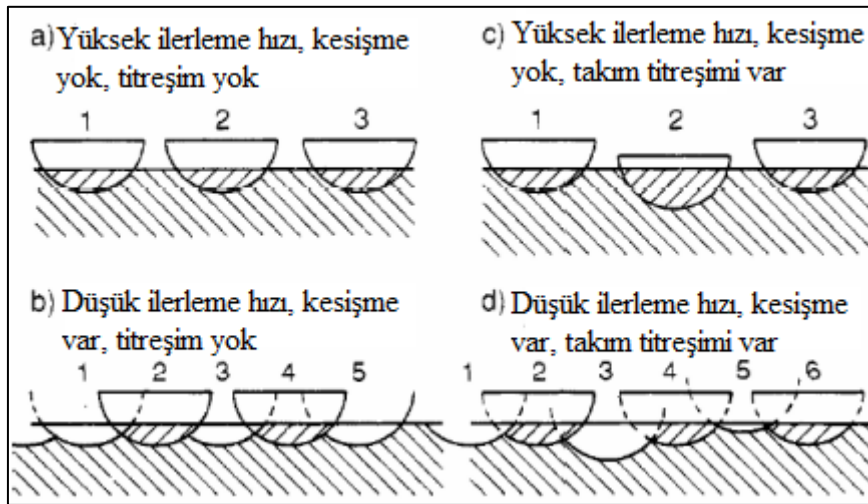
Eş. 3.30'da  $f_r$  devir başına ilerleme hızını ve  $R_c$  takım kesme yarıçapını göstermektedir.

Bu denklem, takım yarı çapı devir başına ilerleme hızından çok daha büyük olduğu zamanlar temel alınarak sadeleştirilebilir [114, 115]. Eş. 3.31'de yüzey profili için sadeleştirilmiş denklem verilmiştir.

$$P_t = \frac{f_r^2}{8 \times R_c} \quad (3.31)$$

Eş. 3.30'dan ve Eş. 3.31'den belirli bir taşlama takımı kesme yarıçapı için, devir başına ilerleme hızının, yüzey profilini etkileyen tek işleme parametresi olduğu çıkarılır. Ancak bu denklemler malzeme özelliklerini ve herhangi bir işlem hatasını dikkate almaz [25].

Kesme derinliği titreşimlerden, taşlama takımı aşınmasından, taşlama takımının sıcaklık artışından ve taşlama tezgahı termal hatalarından etkilenebilir [116-118]. Elmas tornada takım titreşimleri nedeniyle, aşındırıcı uç pozisyonlarının varyasyonlarının yarattığı yüzey profilinin bir örneği Şekil 3.18'de verilmiştir.

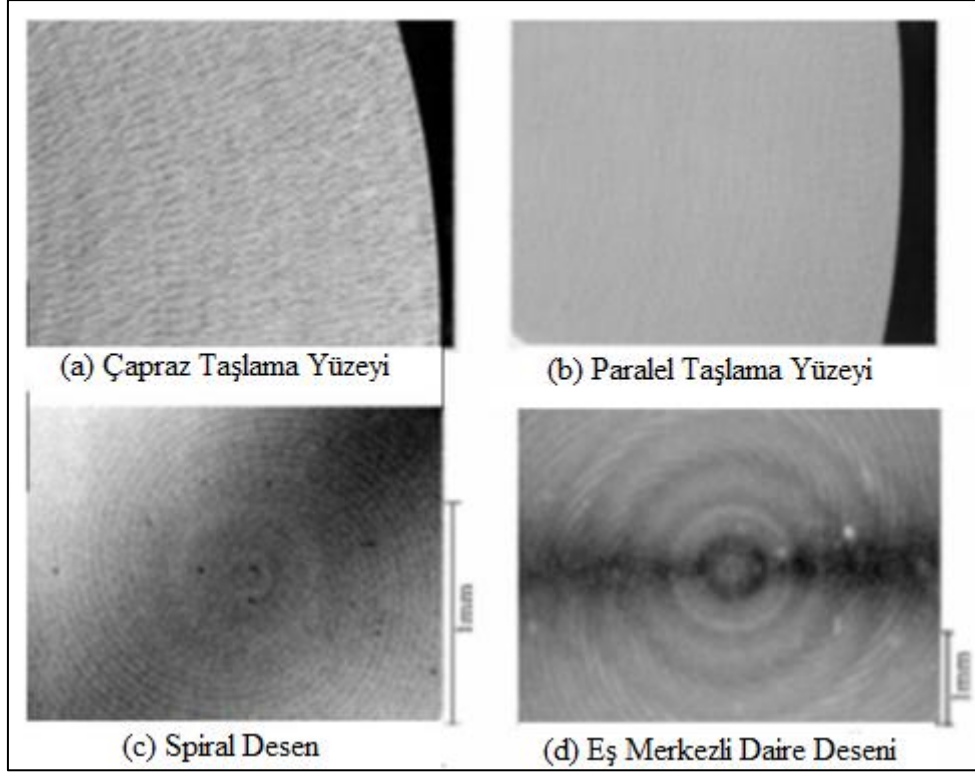


Şekil 3.18. Farklı durumlarda elde edilen yüzey profili [25]

Taşlama işlemi sırasında, iş parçasının her devri arasındaki kesme derinliğinde herhangi bir değişiklik için benzer bir etki beklenir. Yüzey profilinin Eş. 3.31 kullanılarak hesaplanan yüzey profili değerinden farklı olması beklenir.

### 3.4.3. Yüzey desenleri

Kullanılan taşlama modları nedeniyle iş parçasının yüzeyinde farklı yüzey desenleri oluşur. Farklı taşlama modları farklı tanımlanmış taşlama desenleri üretir. Resim 3.9’da bu desenler verilmiştir.



Resim 3.9. Farklı yüzey desenleri [25]

Çapraz taşlama yüzeyi paralel taşlama yüzeyinden daha yüksek yüzey deseni pürüzlülüğüne sahiptir. Paralel taşlama modunda, yüzeyde kendine özgü bir spiral deseni veya eş merkezli daire deseni gözlenir. Taşlama işlemlerinin simülasyonlarına dayanarak, sonuçlar spiral modelin kararlı bir taşlama koşuluna karşılık geldiğini gösterir. Eş merkezli daire deseni kararsız taşlama koşulları ile üretilir. Simüle edilen kararsızlık, taşlama takımı milinin dikey eksen boyunca titreşimidir. Temas noktası değiştikçe bir dalgalanma oluşur [25].

Franse (1991), taşlama desenini tek nokta kesme yöntemiyle simüle etmiştir. Simülasyon, iş parçası ve taşlama takımı arasındaki hız oranının önemini gösterir. Aynı yaklaşım çoklu elmas parçacıklar ile işleme işlemini simüle etmek için kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü deseni,

taşlama takımının aşınmasıyla yani elmas parçacıkların körelmesi ve aktif elmas parçacık sayısının değişmesine göre değişir.

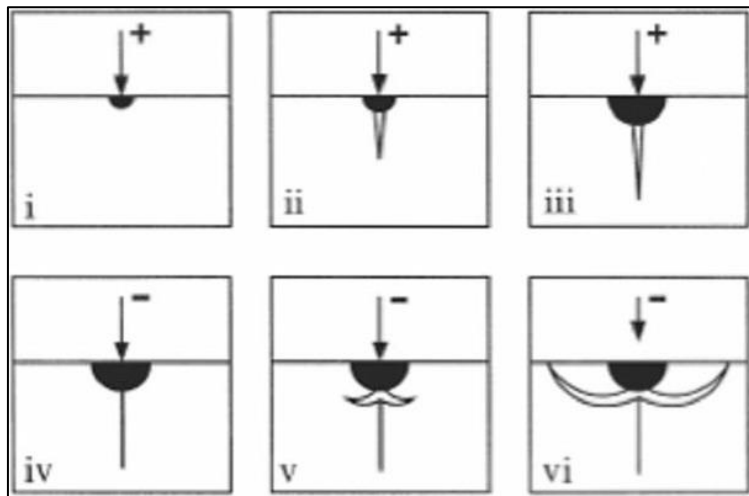
Heinzel, Grimme ve Moisan (2006), taşlama takımı ve iş parçası hızları arasındaki oranda küçük bir dalgalanmanın meydana gelmesi üretilen desenin değiştiğini göstermiştir.

#### 3.4.4. Yüzeyaltı hasarları

Kırılma mekaniği, zemin yüzeylerinde indüklenen yüzeyaltı hasarını incelemek için kullanılmıştır. Girintinin türüne bağlı olarak farklı çatlak tipleri tanımlanmıştır. Yüzeyaltı çatlaklarının derinliğini ölçmek için farklı teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler tahribatlı ve tahribatsız testlerdir. Yüzeyaltı hasar derinliğini tahmin etmek için ölçülen yüzey pürüzlülüğüne dayalı olarak farklı analitik teknikler de geliştirilmiştir.

#### Kırılma mekaniği

Malzeme kaldırma mekanizması bölümünde anlatıldığı gibi kırılğan malzemelerde talaş kaldırma kırılğan, yarı sünek veya sünek mod taşlama ile gerçekteşir. Orta ve yatay çatlakların başlaması ve yayılması Lawn ve Wilshaw (1975) tarafından tanımlanmıştır. şekil 3.19’da çatlakların başlama ve yayılma modeli verilmiştir.



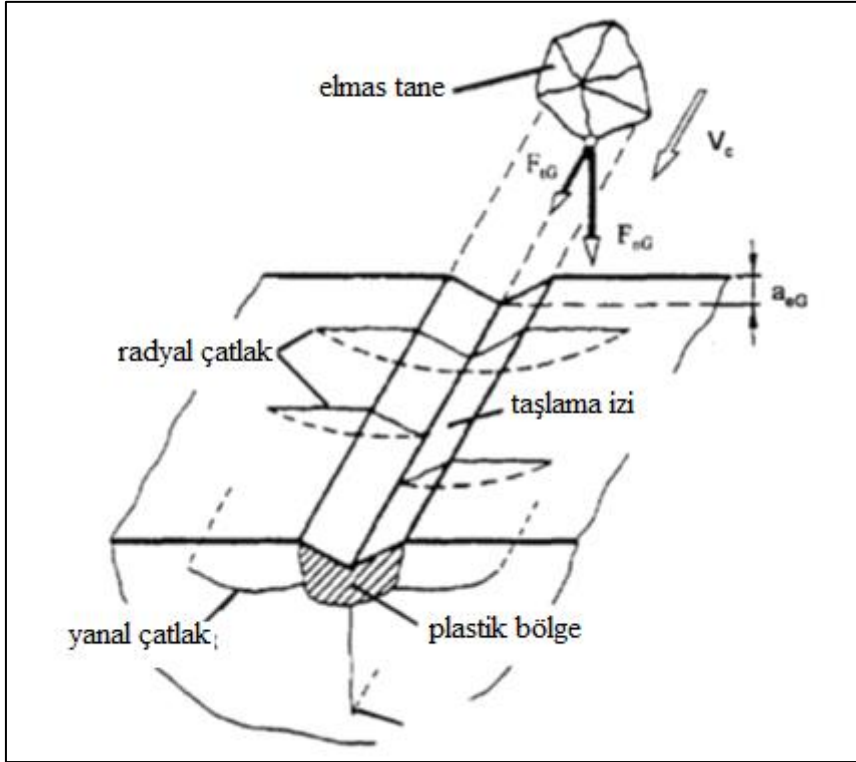
şekil 3.19. Çatlakların başlama ve yayılma modeli [31]

Şekil 3.19'daki çatlakların başlama ve yayılma modelinde 6 evre vardır. İlk olarak bir girinti yükü uygulanır (i). Bu küçük bir orta çatlağın yaratılmasına yol açar (ii). Bu çatlak yükün artması ile büyür (iii). Yükün azalması ile orta çatlak kapanmaya başlar (iv). Yüzeye doğru büyüyen bir yanal çatlak ortaya çıkar (v – vi) [31]. Bu 2 boyutlu bir modeldir ve sivri bir batıcı uç kullanılarak uygulanan statik yüke karşılık gelir.

Cook ve Phar (1990), radyal çatlakların oluşumunun, cam ve seramik için yük uygulama ve yük azaltma döngüsünün farklı aşamasında meydana geldiğini göstermiştir. Kristal malzemeler ve yoğunlaştırılmış camlar (örneğin kaynaşık silika) için yük uygulama sırasında radyal çatlak oluşumu meydana gelir. Diğer camlar için (borosilikat, soda kireç camı gibi) yükün azalması sırasında çatlak oluşur.

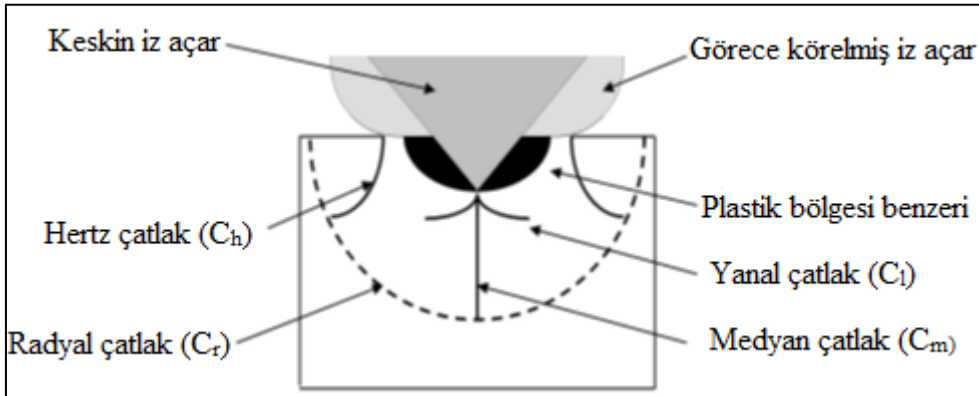
Argon (1959), 7740 Pyrex camda çatlak derinliğine karşı çatlak derinliği başına birim alandaki çatlakların sayısının dağılımının bir güç yasası fonksiyonuna uyduğunu gözlemlemiştir. Kaynaşık silikada, çatlak dağılımı üç kırılma bölgesinde açıklanır. Sığ kırıklar tarafından takip edilen moloz bölgesi vardır. Bu noktadan sonra ağır kırılma ağı yok olur. Gözlenen kırılma deseni ve kırık uzunluğu işlemi karakterize eder.

Bir taşlama izi boyunca bir elmas parçacığı tarafından oluşturulan çatlakların üç boyutlu bir temsilinin örneği Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Taşılama yolu boyunca çatlak oluşumu [122]

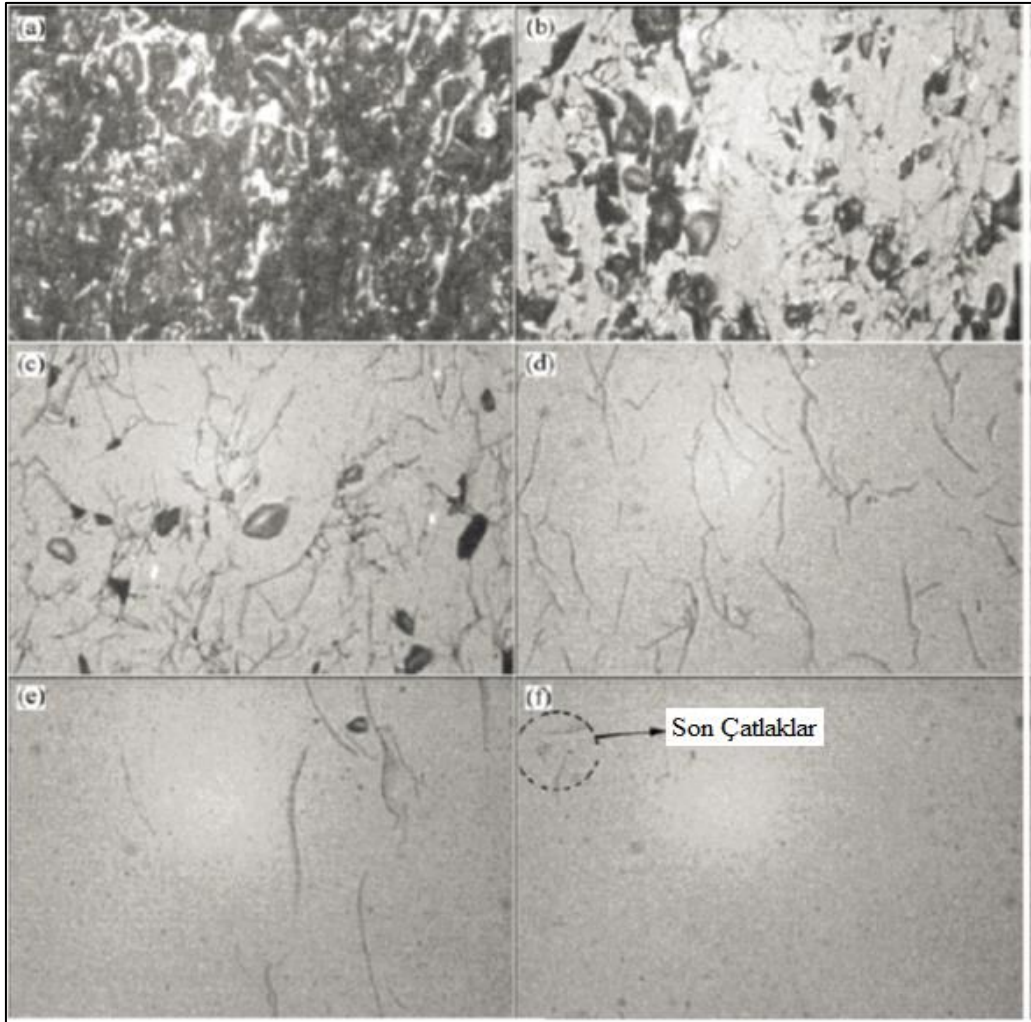
$A_{eG}$ , bir elmas parçacık kesme derinliğini,  $F_{nG}$  ve  $F_{tG}$  sırasıyla elmas parçacık başına normal ve teğetsel kuvvetleri ifade etmektedir. Bu kırılma mekanizmaları yüzey ve yüzeyaltı kusurları ile sonuçlanır. Elmas parçacığının oluşturduğu taşılama yolunun altında bir plastik bölge oluşur. Yanal, orta ve radyal çatlaklar bu plastik bölgeden yayılır. Şekil 3.21’de farklı çatlaklar verilmiştir. Sivri batıcı uç ve aşınmış batıcı uç kullanılan taşılama yolundaki parametreler Lawn ve Whilsaw (1975) tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.21. Yüzeyaltı hasarları [31]

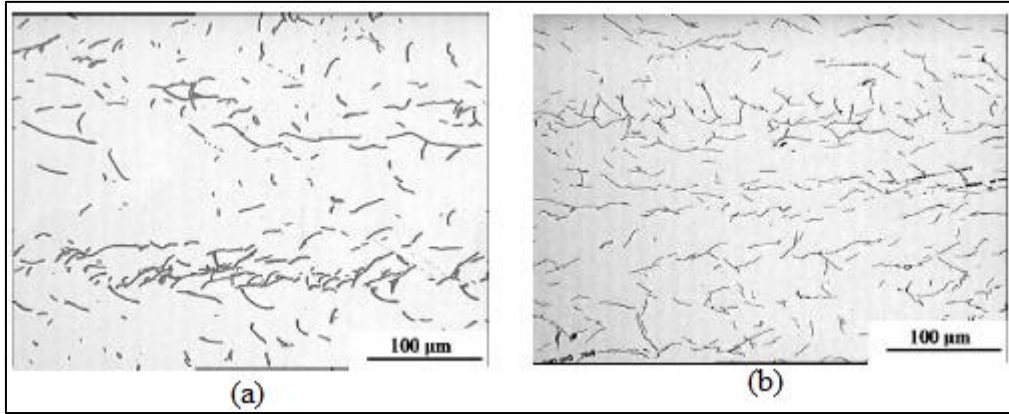
Belirli bir yük altında, bir yarı plastik bölge üretilir. Sivri bir batıcı uç için orta / radyal çatlaklar ( $C_m/C_r$ ) girinti yükünün artmasıyla başlar ve yayılır. Yükün kaldırılması ile, orta çatlaklar kapanmaya başlar ve yanal çatlaklar ( $C_l$ ) yüzeye doğru büyür. Göreceli olarak aşınmış batıcı uç, orta çatlaklar yerine Hertzian ( $C_h$ ) adı verilen çatlakları meydana getirir. Uygulanan bir yük altında indüklenen her çatlak tipi için boyut, genişlik ve derinlik Şekil 3.21’de verilmiştir.

Elek numarası 80 takımla işlenen BK7 cam için yüzeyden farklı derinliklerde oluşan yüzeyaltı hasarlarının mikroskopik görüntüleri Şekil 3.22’de verilmiştir.



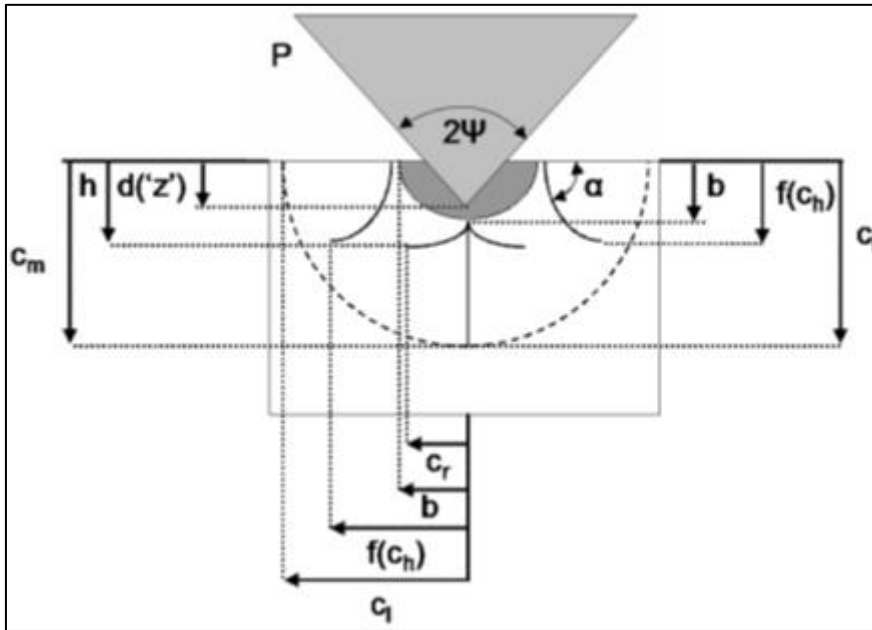
Şekil 3.22. (a) Yüzeyin 0,6 µm altı (b) yüzeyin 3,0 µm altı (c) yüzeyin 7,9 µm altı (d) yüzeyin 16,0 µm altı (e) yüzeyin 34,8 µm altı (f) yüzeyin 52,7 µm altı [126]

D46 takım kullanılarak son kesim işlemi yapılan Zerodur® ve ULE® malzemelerde oluşan yüzeyaltı hasarları Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.23. D64 takım ile işlenen (a) Zerodur® ve (b) ULE® ‘deki yüzeyaltı hasarları [127]

Yüzeyaltı hasarlarının derinliklerini formülize etmek için kullanılan parametreler Şekil 3.24’te verilmiştir.



Şekil 3.24. Yüzeyaltı hasarları derinlikleri [31]

Mikrosertlik ölçüm cihazının ucu olarak da tanımlanabilen sivri batıcı ucun girinti açısı tanımlanır, Şekil 3.24’te  $\Psi$  ile gösterilmiştir. Uygulanan yük ( $P$ ) yüzeye bir penetrasyon ( $d$  veya  $z$ ) indükler. Hertzian çatlak, uygun  $\alpha_h$  eğim açısı (örneğin cam için  $22^\circ$ ) boyunca üretilir. Plastik bölgenin derinliği Şekil 3.24’te  $b$  ile gösterilmiştir. Plastik bölgenin altında, yüzey alanında bulunan çatlaklar; yatay çatlaklar, medyan / radyal çatlaklar ve Hertzian çatlaklardır [31]. Yanal çatlak düzlemi üzerindeki malzemenin kalınlığı Şekil 3.24’te  $h$  ile

gösterilmiştir. Keskin bir aşındırıcı sivri ucun girinti derinliği (d) aşağıdaki Eş. 3.32 ile hesaplanır [123].

$$d = \cos(\Psi) \quad (3.32)$$

Marshall, Lawn ve Evans (1982), yanal çatlakların plastik bölgenin (b) sonunda meydana geldiğini tahmin etmiştir. Yanal çatlak derinliği, h (=b), Eş. 3.33 ile hesaplanır.

$$b \approx h \approx \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} (\cos \Psi)^{1/3} \left(\frac{P}{H}\right)^{1/2} \quad (3.33)$$

Radyal ve medyan çatlaklar benzerdir. Lawn, Evans ve Marshall (1980), yüzeyaltı hasarına dönüşen çatlaklar için “medyan” teriminin kullanılmasını kuvvet testi çatlakları için “radyal” teriminin kullanılmasını önermiştir. Medyan çatlak derinliği Eş. 3.34 kullanılarak hesaplanır.

$$C_m = \left(\frac{a_m P}{K_C}\right)^{2/3} \quad (3.34)$$

Seramik malzemelerde medyan çatlak derinliği Eş. 3.35 kullanılarak hesaplanır.

$$l_{mc} = C_m = \left(\frac{0.034(\cot \Psi)^{2/3} E^{1/2} F}{H^{1/2} K_C}\right)^{2/3} \quad (3.35)$$

Aşınmış batıcı uç ile kesim yapıldığında, Hertzian adı verilen çatlaklar oluşur.  $\alpha_h$  açısı malzeme tipine bağlı olarak değişir. Yüzeyaltındaki derinliği Eş. 3.36 kullanılarak hesaplanır [31].

$$C_h = \left(\frac{a_h P}{K_c}\right)^{2/3} \quad (3.36)$$

Medyan çatlaklara benzer form Hertzian çatlaklar için de benimsenmiştir.

Girinti dinamik olduğundan kayma etkisi de düşünülmelidir. Sürtünme katsayısı hesaba katılır. Kayma yükü Eş. 3.37 ile hesaplanır [123].

$$P' = P(1 + \mu^2)^{1/2} \quad (3.37)$$

Bu kayma etkisinin dahil edildiği yük Eş. 3.33, Eş. 3.34 ve Eş. 3.35’de yer alan P’nin yerini alır. Statik derinlikten daha derin olan iz derinliği elde edilir. Statik yük için,  $\mu = 0$  olur ve P ile P’ aynı değeri alır. Yüzeyaltı hasarı başlangıcı ve giricilik derinliği, çalışma parçasının karakteristik özelliklerinden etkilenir. Hesap için önemli olan parametre, malzeme kırılkanlığıdır. Belirli bir malzeme için mikro sertliğin kırılma tokluğu ile bölünmesiyle hesaplanır.

Lawn ve Evans (1977), bir ilk giricilik çatlak derinliği oluşturmak için bir başlangıç yükünün uygulanması gerektiğini göstermiştir. Bu asgari yük Eş. 3.38 ile hesaplanır. İlk giricilik çatlak derinliği ise Eş. 3.39 ile hesaplanır.

$$P^* \approx [(54.47\alpha)/(\eta^2\theta^4)] \times (K_C/H)^3 K_C \quad (3.38)$$

$\alpha=2/\pi$ ,  $\theta=0,2$  ve  $\eta=1$ ’dir ve boyutsuz faktörlerdir.

$$C^* \approx (1.767/\theta^2) \times (K_C/H)^2 \quad (3.39)$$

Çizelge 3.5’te farklı malzemelere ait mikro sertlik, kırılma tokluğu, kırılkanlık ve hesaplanan başlangıç yükleri ile başlangıç giricilik derinliği verilmiştir.

Çizelge 3.5. Farklı malzemeler için mikro sertlik, kırılma tokluğu, kırılkanlık, P\*, C\*

| Malzeme         | Mikro Sertlik<br>H<br>(GPa) | Kırılma Tokluğu<br>K <sub>C</sub><br>(MPa.m <sup>1/2</sup> ) | Kırılkanlık<br>B<br>H/K <sub>C</sub><br>(1/m <sup>1/2</sup> ) | İlk Uygulanan<br>Yük<br>P*<br>(N) | Başlangıç<br>Giricilik<br>Derinliği<br>C*<br>(µm) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
| Kaynaşık Silika | 4,8                         | 0,74                                                         | 6490                                                          | 0,06                              | 1,05                                              |
| ULE             | 4,6                         | 1,8                                                          | 2560                                                          | 2,37                              | 6,74                                              |
| Zerodur         | 6,2                         | 0,9                                                          | 6890                                                          | 0,06                              | 0,93                                              |
| SiC             | 27,4                        | 3,5                                                          | 7830                                                          | 0,16                              | 0,72                                              |

İncelenen materyallerden, yüzeyaltı hasarı oluşturmak için uygulanan ilk yük ULE® için en yüksektir. Kaynaşık silika ve Zerodur®, ULE®'den kırk kez daha düşük eşik değere sahiptir. İlk giricilik derinliği için de benzer eğilim gösterilmiştir. ULE® en yüksek çatlak derinliğine sahipken Zerodur® 7 kat daha sığdır. Kaynaşık silikada, gerekli olan ilk uygulanan yük Zerodur® ile aynı olmasına rağmen daha derin hasar derinliğine sahiptir. İlginç bir şekilde, yüzeyaltı hasarı oluşturmak için gerekli olan ilk yük ULE®'de en yüksektir ancak yine ULE®'de en derin hasara ulaşılması beklenilir.

P\* ve C\* için yapılan gözlemler, malzemenin kırılmalık parametresi kullanılarak açıklanır. Daha düşük bir malzeme kırılmalık değeri, yüzeyaltı hasarı oluşturmak için daha yüksek bir başlangıç yüküne yol açar. Yüzeyaltı hasarları başladıktan sonra, kırılma tokluğu ana kontrol faktörüdür [125].

#### Tahribatsız testler

Brinksmeier (1989), yüzeyaltı hasarlarını gözlemlemek için kullanılan farklı tahribatsız tekniklerin bir incelemesini yapmıştır. Raman spektroskopisi, ultrason ve X ışını teknikleri, tartışılan tekniklerin birkaç örneğidir. Ultrasonik Rayleigh dalga ölçümü gibi bazı tahribatsız yüzeyaltı hasarı inceleme teknikleri, önemli ve derin çatlaklar için yeterli bilgi vermede başarılı olmuştur. Bu yöntemlerin sınırlaması, derinlik açısından ölçüm çözünürlüğüdür.

Kesitsel, geçirmeli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscopy - TEM) analizi cam ve kristallerde mikron altı skalada kusurların saptanması için son derece bilgilendirici bir yaklaşımdır [129]. Ancak TEM işlemi, çok fazla ileri seramiklerde büyük hatalar için zaman alıcı ve daha az uygulanabilir olabilir [25].

Pfeiffer ve Hollstein (1997), kalıntı gerilimleri ve mikroplastik deformasyonu ölçmek için X ışını kırınım yönteminin kullanabileceğini göstermiştir. Lucca, Brinksmeier, Goch (1998), özellikle cam ve seramikler için farklı tekniklerin incelemesini yapmıştır.

Goch ve arkadaşları (1999), var olan tekniklerde iyileştirme çalışmaları yapmıştır. Küçük film kalınlığı ve kaplamalarının incelenmesine yönelik yöntemlerin talebi, yüzeyaltı hasar değerlendirmesine uygulanabilecek tekniklerin ilerlemesine yardımcı olmuştur.

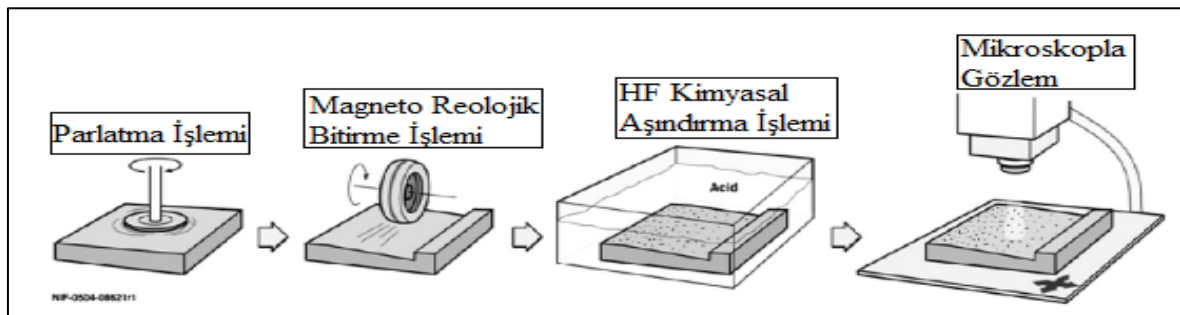
Kaynaşık silikada lazer hasarının ölçülmesinde, parlatılmış yüzeylerde 300 µm derinliğe sahip yüzey altı hasar bölgelerini tespit etmek için modifiye edilmiş bir ticari optik koherens tomografi sistemi kullanılmıştır [133].

### Tahribatlı testler

Tahribatlı testler, mikron ve mikron altı ölçeğinde çatlakların tespitinde başarılı olmuştur. Yüzey altı hasar derinliğine ve iş parçası malzeme tipine bağlı olarak çok çeşitli teknikler açıklanmıştır. Bu teknikler, her bir özel değerlendirmenin müteakip çatlaklar oluşturmayacağı veya mevcut olanları genişletmediği varsayımına dayanarak kullanılır. Testlerin bir sınırlaması, gerçek üretilmiş parçalarda ölçüm eksikliğidir. Bu, temsili deneylerin dikkatli bir seçimine ve değerlendirilen taşlama işleminin tekrarlanabilirliğine dayanır.

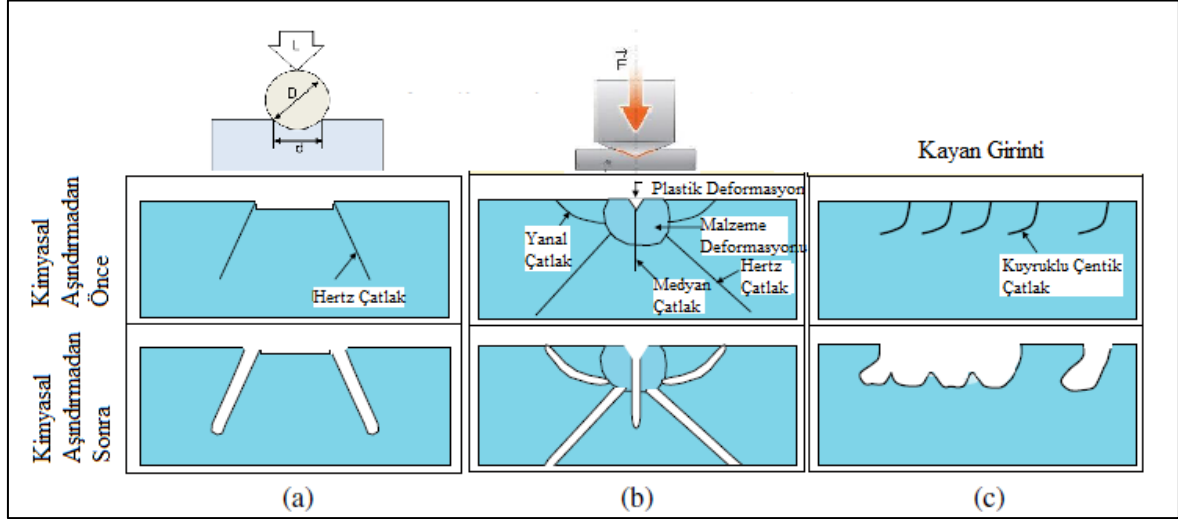
Parlatma teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İş parçasındaki yüzey altı hasarlarını gözlemlemek için tekrarlı parlatma, kimyasal aşındırma ve optik mikroskop ile gözleme kullanılmıştır [29, 108, 134, 135]. Parlatıldıktan sonra, tekrar hidratlanmış cam tabakasının çıkarılması için asitle aşındırma gereklidir [136]. Bu tekrar eden parlatma ve kimyasal aşındırma yönteminin bir çeşidi, uca doğru incelme vererek parlatma yaklaşımıdır. Bu uca doğru incelme vererek parlatma otomatik kontrollü bir proses ile örneğin CNC parlatma tezgahları [137] ve metalografi laboratuvarı parlatma ekipmanları [76] gibi parlatma teknikleri kullanılarak elde edilir.

Menapace ve arkadaşları (2005(b)), Şekil 3.25’de gösterildiği gibi magneto reolojik bitirme tekniği ile uca doğru incelme vererek parlatma uygulaması yapmıştır.



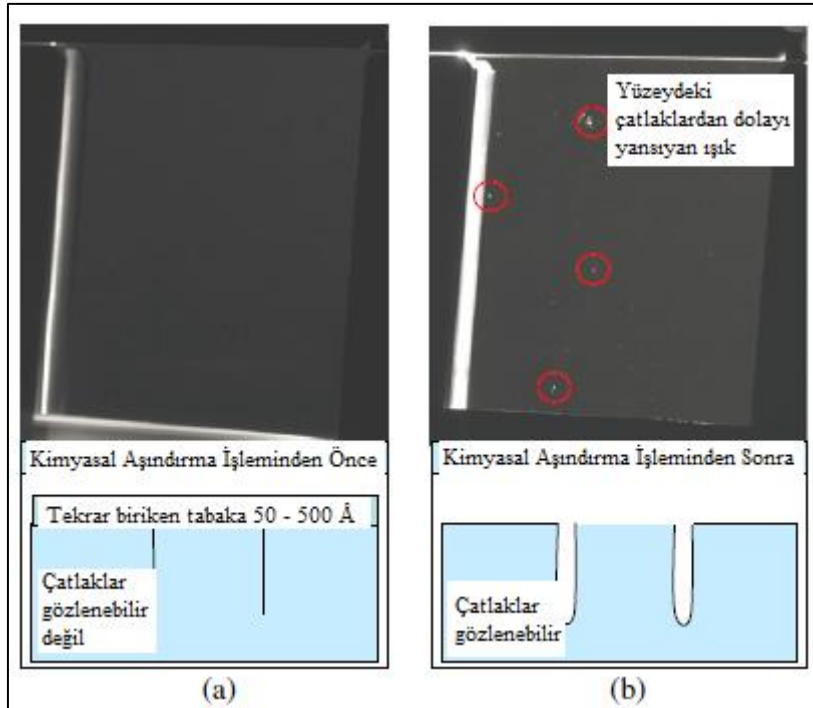
Şekil 3.25. Uca doğru incelme vererek yapılan parlatma işlemi ile yüzeyaltı hasarların incelenmesi [137]

Farklı optik malzemelerde, geniş alanlar değerlendirilebilir. Aşındırma işleminden sonra, çatlaklar bir mikroskop ile gözlenmiştir. Çatlakların asit ile etkileşimi Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. Kimyasal aşındırma işleminden önce ve sonra çatlakları değişimi (a) aşınmış batıcı ucun yarattığı çatlak (b) sivri batıcı ucun yarattığı çatlaklar (c) Kayan iz açarın yarattığı çatlak [139]

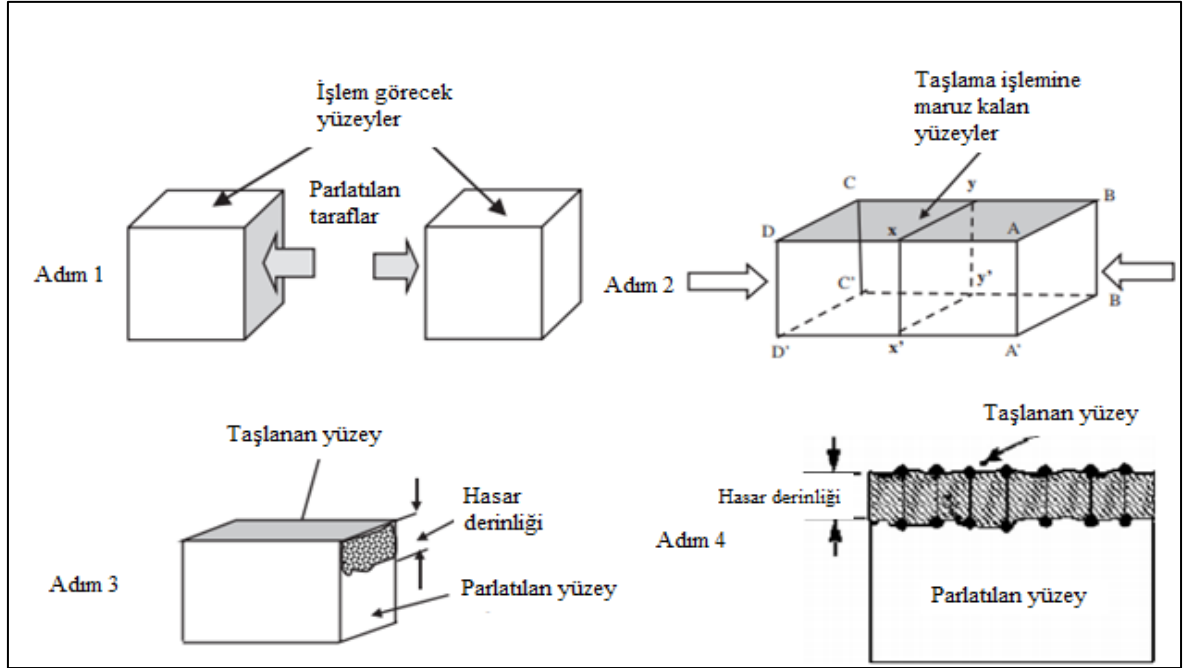
Ölçüm işlemini otomatik hale getirmek için, zemin yüzeyinin altındaki, farklı derinlikteki kararmalar ölçülür. Tonnellier ve arkadaşları (2007), deterministik bir parlatma işlemi ile uca doğru incelme vererek parlatma yapmıştır. Aşındırmadan sonra, gözlem için bir optik mikroskop kullanarak  $\text{mm}^2$  başına çatlak sayısını elle saymışlardır. Bu ölçümlerle, zemin yüzeyinin altındaki derinliğe göre  $\text{mm}^2$  başına çatlak sayısı grafiğini elde edilmiştir [25, 28, 121]. Çatlakların mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27. Parlatılmış kaynaşık silikanın (a) kimyasal aşındırma işleminden önce ve (b) sonra mikroskop görüntüsü [139]

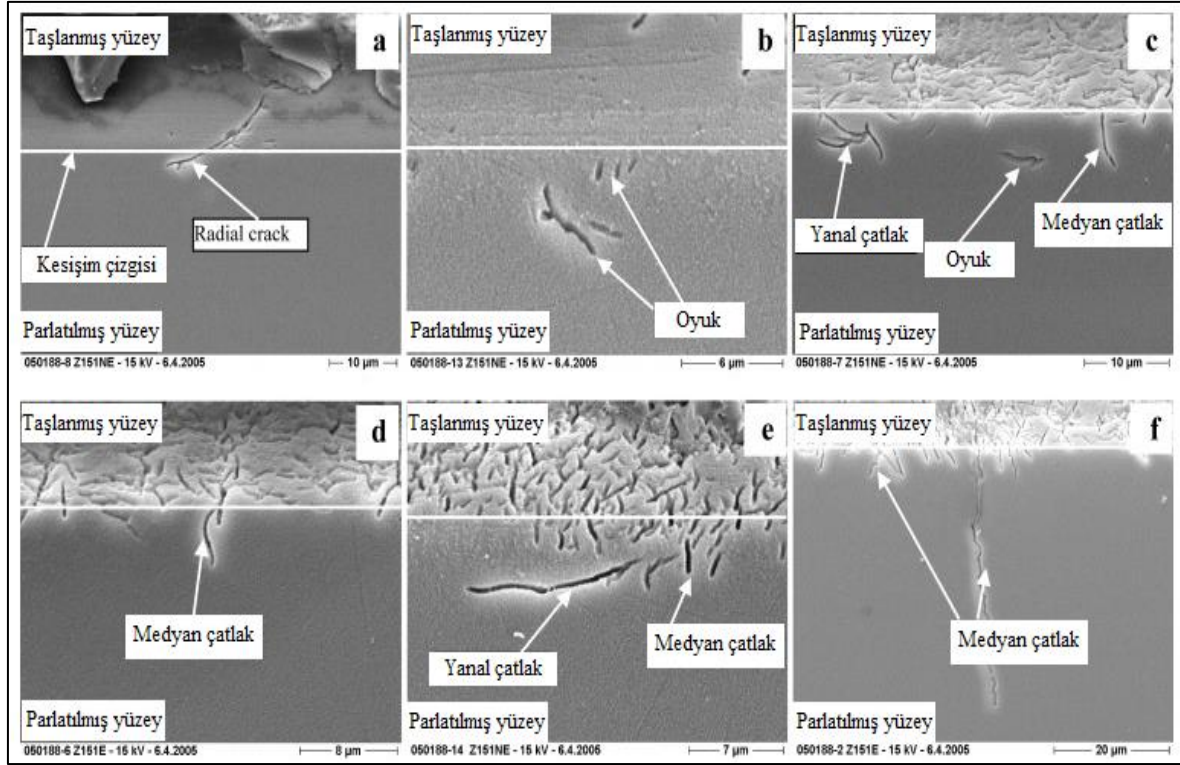
Zhao ve arkadaşları (2006), numuneyi 135 derecelik bir elmas testere ile en kesitini çıkararak, uca doğru incelme vermiştir. Numunelerde yüzeyaltı hasarlarını gözlemlenebilir hale getirmek için, kimyasal aşındırma, parlatma işlemi yapılmıştır ve sonrasında haritalanmıştır. Numune altın kaplandıktan sonra taramalı elektron mikroskop ile (SEM) gözlemler yapılmıştır. Değerlendirme uzunluğu ve dolayısıyla derinlik çözünürlüğü, magneto reolojik parlatma tekniği ile elde edilen sonuçlardan daha düşüktür.

Xu ve Jahanmir (1994), başka bir değerlendirme tekniği açıklamıştır. Bir örnek iki parçaya dilimlenir. Her yüzey taşlanır ve parlatılır. İki parça, çok ince bir yapışkan tabakası ile birlikte yapıştırılır. Sabit yapıştırıcı kalınlığını  $1\text{ }\mu\text{m}$ 'nin altında tutmak için sıkma kuvveti uygulanır. Örnek taşlanır. Yapıştırıcı çıkarıldıktan sonra iki parça ultrasonik banyoda asetonla temizlenir ve altın kaplanır. Gözlem için Nomarski optik mikroskop kullanılır. Agarwal ve Venkateswara Rao (2008), gözlem için SEM kullanarak SiC iş parçasında yüzey hasarını gözlemlemek için aynı dilimleme tekniğini kullanmıştır. Teknik Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Yüzeyaltı hasarlarını incelemek için kullanılan Xu ve Jahanmir'e ait teknik

Adım 1’de gösterildiği gibi, iş parçası yeniden birleştirilmiştir. Adım 2’de taşlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından adım 3’te SEM kullanılarak iş parçasında yüzeyin ve yüzey altının kesit ve düzlemsel incelemeleri yapılmıştır. Adım 4 ise yüzey altı hasar derinliğinin ölçümünü gösterir (derinlik, üniform olmayan bir ortalama değer olarak alınır) [100]. Bu teknikte görüntülenen yüzeyaltı hasarları Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29. Zerodur® malzemede meydana gelen yüzeyaltı hasarlarının morfolojisi ve derinliği (a) yüzeyaltı hasarları ile birlikte taşlanmış yüzey (b) mikro oyuklar içeren yüzey altı (c) çeşitli yüzeyaltı hasarı ve oyuk içeren taşlanmış yüzey (d) medyan çatlaklar içeren taşlanmış yüzey (e) medyan ve yanıl çatlaklar içeren taşlanmış yüzey (f) iş parçasının derinliklerine nüfuz eden bir medyan çatlak içeren taşlanmış yüzey [141]

Preston (1922), camdaki yüzey altı hasar derinliğini ölçmek için kimyasal aşındırma tekniği kullanmıştır. Bu teknik, kullanılan yüzey ile belirli bir yüzey kalitesi ve temas alanı için aşındırma hızında bir tutarlılığa dayanır. Çatlaklı bir yüzey için daha yüksek kimyasal aşındırma oranı elde edilir. Parçayı düzenli aralıklarla tartarak ölçülen aşındırma oranı stabil hale geldiğinde, yüzeyde hasar olmadığı anlamına gelir. Bu teknik, parlatma tekniklerinden daha kolay ve daha ucuzdur. Yüzey altı hasarı gözlemleri için operatörün deneyimlerine dayanmamaktadır [108]. SiC gibi oda sıcaklığında kimyasal aşındırmaya yüksek dirençli malzeme için, yüzey altı hasarları açığa çıkarmak için plazma aşındırma tekniği başarılı şekilde kullanılmıştır [25].



## 4. OPTİK METROLOJİ TEKNİKLERİ

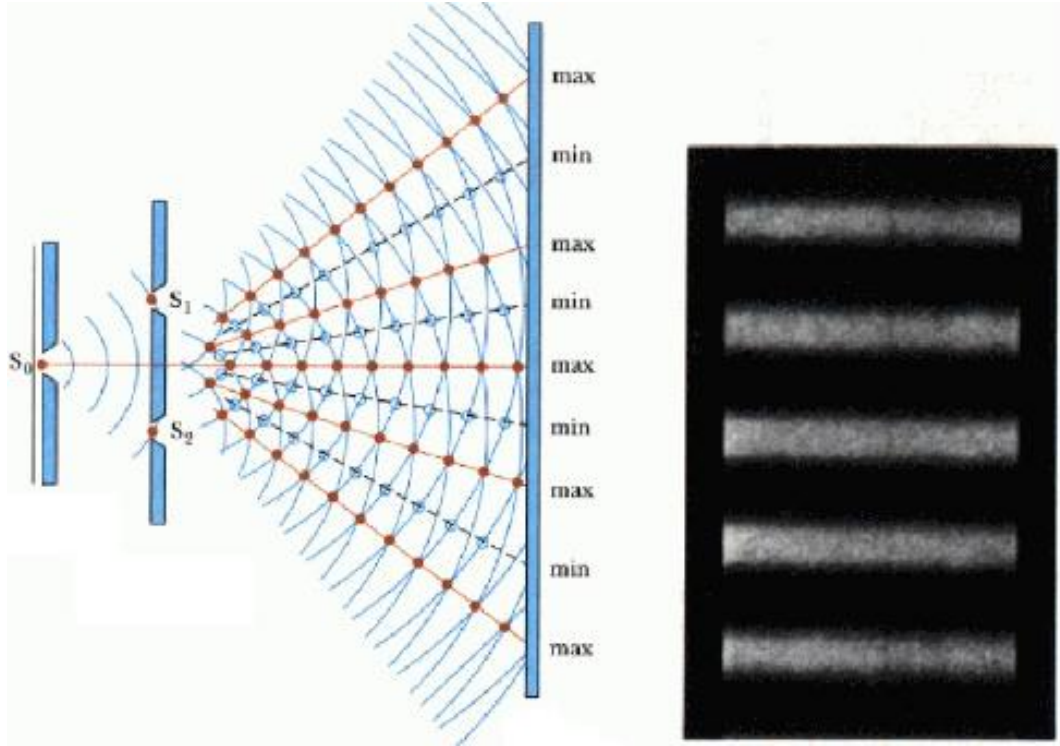
İşlenen malzemenin işlenebilirlik parametrelerini optimize edebilmek ve yüzeyaltı hasarlarını tespit edebilmek için çeşitli ölçüm, kontrol ve muayene metodları kullanılır. İşlenebilirlik parametrelerini yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirmek doğru olacaktır. Yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için pek çok cihaz ve teknik kullanılır. Temas uçlu ve ışık – optik – interferometrik ölçüm sistemleri mühendislik açısından en önemli olanlarıdır. İnterferometrik ölçüm ile ayrıca yüzeyaltı hasarları hakkında da bilgi edinilir. Yüzeyaltı hasarlarını ayrıca taramalı elektron mikroskobu ile de incelenebilir. Bu çalışmada bu teknikler kullanılarak inceleme yapılmıştır.

### 4.1. İnterferometre

Tek bir kaynaktan çıkan iki ayrı ışık değişik istikametlerde yol aldıktan sonra bir noktada çakıştıkları zaman su dalgalarında olduğu gibi girişimde bulunurlar. Işığın interferans etkisinin çok net ve açık görülmesi için aşağıdaki şartları sağlamış olması gerekir;

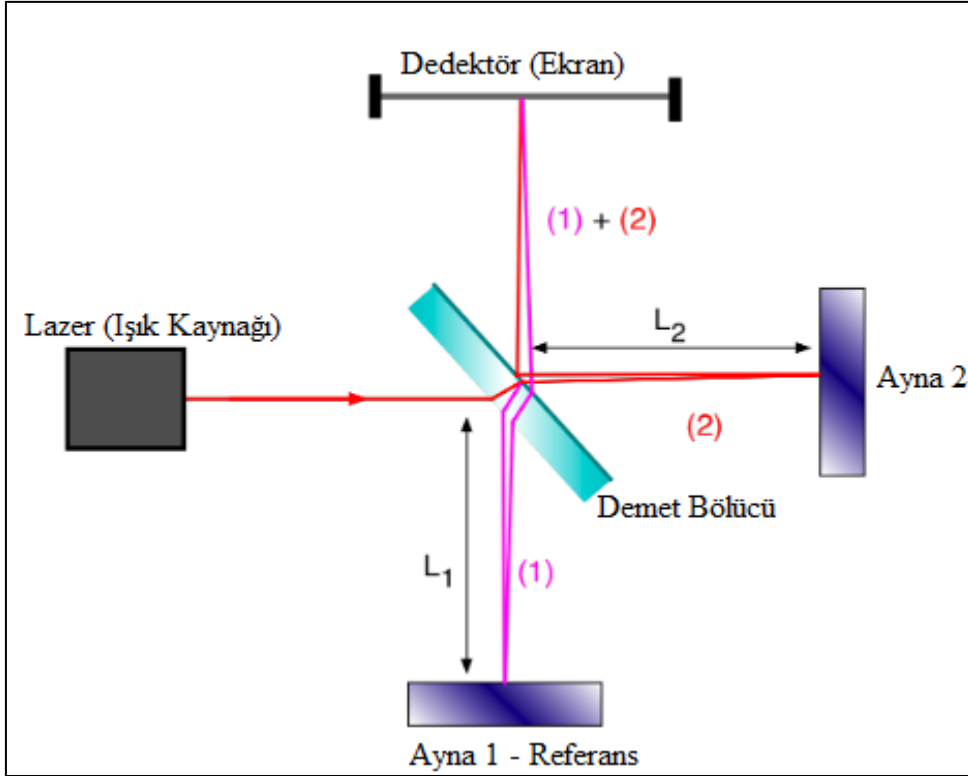
- Işık düzgün frekans vermeli ve dalga boyu düzgün olmalıdır.
- Işığın var olan faz farklılıkları zamanla değişmemelidir.
- Işığın amplitüdlere eşit veya eşite yakın olmalıdır.

Young çift yarık deneyinde ışığın interferans etkisi gözlemlenir. Şekil 4.1’de Young deney düzeneğinin basitleştirilmiş hali verilmiştir.



Şekil 4.1 Young çift yarık deneyine ait şematik gösterim

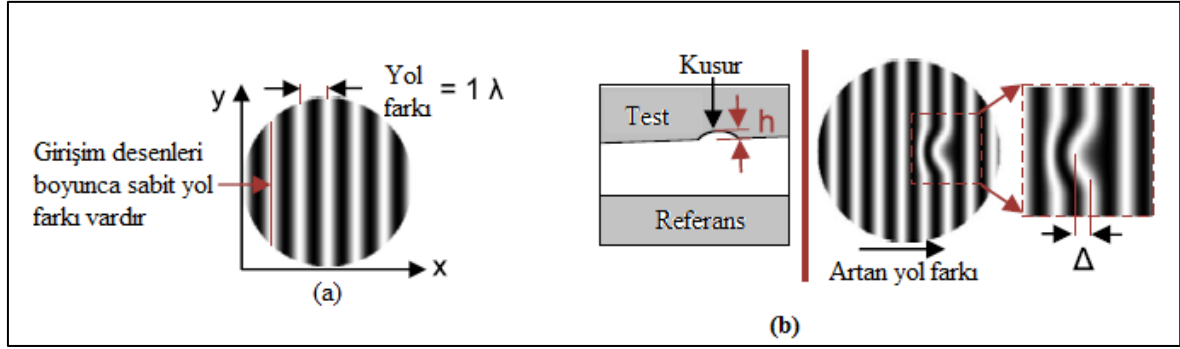
Girişim yoluyla çok küçük uzunlukları ölçebilmek için Michelson kendi adıyla bilinen bir sistem geliştirmiştir. Michelson interferometresinin şematik gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Michelson interferometresi şematik gösterimi

Kaynaktan yayılan ışık demet bölücü yardımıyla iki bölüme ayrılır ve ışığı ayna 1 ve ayna 2'ye gönderir. Bu ışınların her biri, yol olarak adlandırılan, farklı bir rotada hareket eder ve dedektöre gelmeden yeniden birleşirler. Her bir ışının aldığı mesafe arasındaki fark, bu ışınlar arasında bir faz farkı oluşturur. Faz farkı  $2\pi$ 'nin tam katı ise maksimum aydınlanma meydana gelir. Tıpkı Young'un çift yarık deneyinde olduğu gibi. Dedektör üzerinde de girişim deseni oluşur.

Eğer test edilen iş parçasında bir kusur var ise tümseklik ya da çukur gibi gözlenen girişim deseninde eğrilikler meydana gelir. Şekil 4.3'de iş parçası mükemmel olduğu durumda ve kusurlu durumlarda elde edilen girişim deseni verilmiştir.



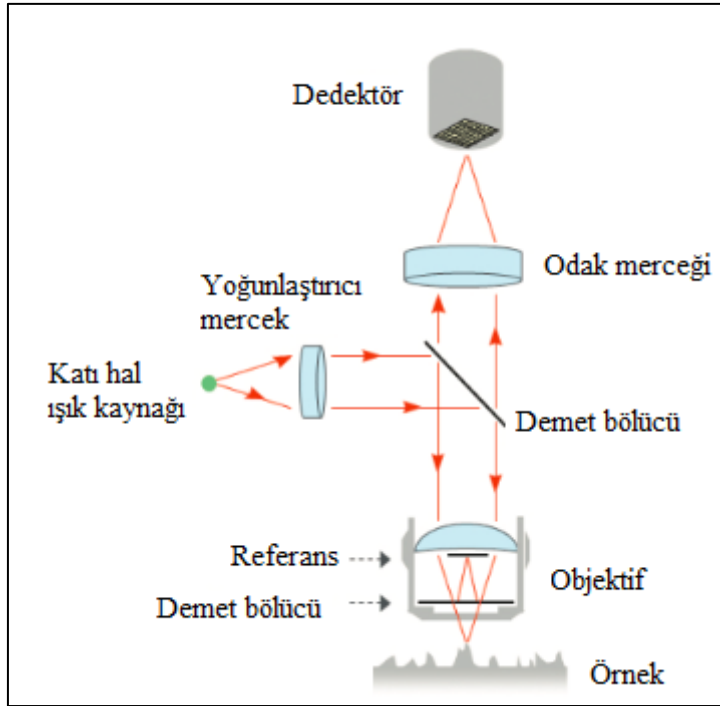
Şekil 4.3.(a) İş parçası kusursuz olduğunda (b) iş parçası yüzeyinde tümsek veya çukur olduğunda elde edilen girişim deseni [142]

Girişim desenlerini analiz ederek yüzey hakkında bilgi sahibi olmak önemli hesaplama gücü ve çeşitli hesaplama modellerini gerektirir. Bunlarda sistemsel yazılımlar ile sağlanır.

#### 4.1.1. Beyaz ışık interferometeresi

Beyaz ışık interferometresi, yüzey profili onlarca nanometre ve birkaç santimetre arasında değişen 3 boyutlu yapılar üstünde yüzey yüksekliği ölçümü için kullanılan temassız bir optik yöntemdir. Genellikle alternatif ad olarak koherans taramalı interferometre kullanılır. Işık kaynağı olarak spektral geniş bantlı, beyaz ışık kullanılır. Hassasiyeti artırmak için birçok dalga boyunda ışık kullanılması dışında lazer interferometreye çok benzerdir. Bu, numune üzerindeki aynı alandaki çoklu veri noktalarına ve numuneden renk verilerinin çıkarılmasına izin verir.

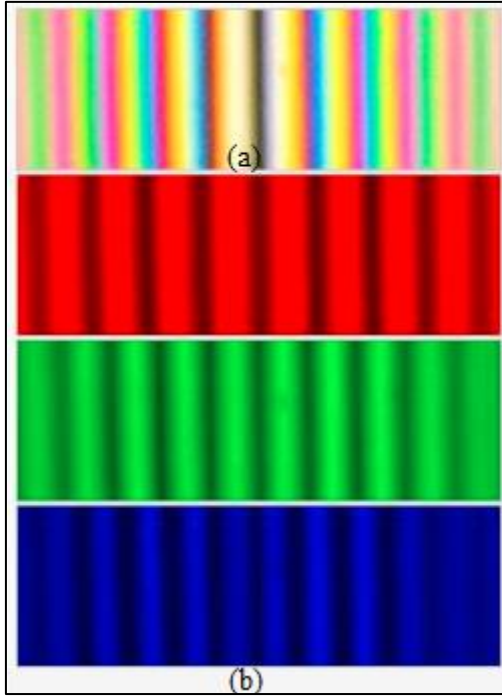
Şematik yapıyı görselleştirmek için, bir interferometreyi bir mikroskop optiği ile birleştirmek gerekir. Şekil 4.4'te beyaz ışık interferometresine ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.4. Beyaz ışık interferometresi şematik gösterim

Beyaz ışık interferometresinde, bireysel bir dalga boyunun kırınım modeli, bir lazer interferometresine benzer şekilde analiz edilir. Ancak hassasiyeti artırmak için diğer birçok dalga boyu ile birlikte kullanıldığı unutulmamalıdır [143].

Bu teknik, ışığı otomatik olarak kırmızı, mavi, yeşil sinyallere bölen renkli kameralar tarafından büyük ölçüde etkinleşir. Şekil 4.5'te beyaz ışık interferometresindeki renk sinyalleri verilmiştir. Ancak, söz konusu optikler standart bir lazer interferometreden çok daha karmaşıktır ve ayrıca yazılımın yeniden yapılandırılması da karmaşıktır.



Şekil 4.5. Beyaz ışık interferometresindeki renk sinyalleri (a) beyaz ışık interferogramı (b) beyaz ışık interferogramının kırmızı, yeşil ve mavi kanalları [143]

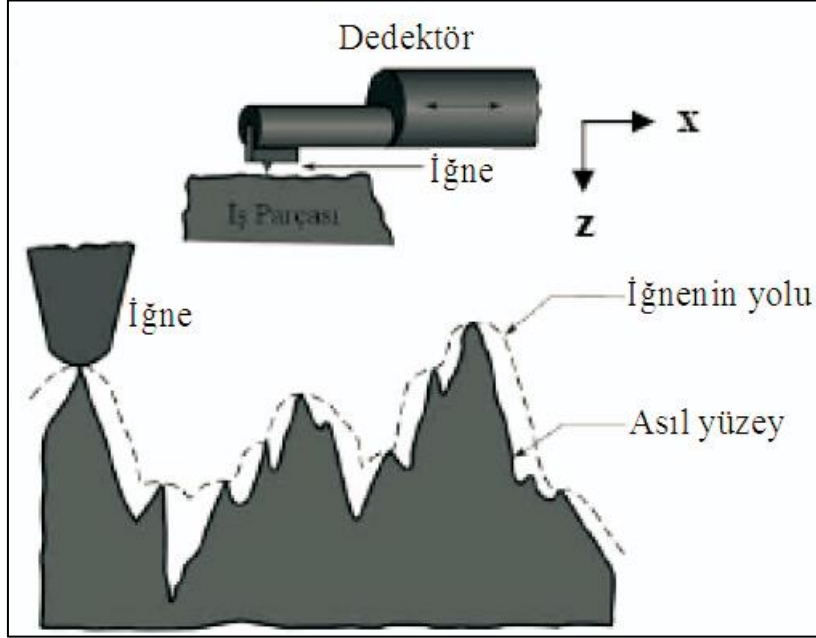
Lazer interferometresi, bu beyaz ışık interferogramının dışındaki spektrumdan kırmızı kanalı kullanmak olarak düşünülebilir. Diğer ışık frekanslarında ilave olarak daha fazla bilgi mevcuttur [143].

Bu yöntemde, önemli hesaplama gücü ve çeşitli hesaplama modellerini gerektirir. Buda yüzey geometrisi analizi ve modelleme artefaktları üzerinde kısıtlamalara yol açabilir.

#### 4.2. Temaslı Profilometre

İlk temas uçlu (iğneli) ölçme sistemi, 1929 yılında G. Schmaltz tarafından yüzey dokusunun değerlendirilmesi için geliştirilir. Schmaltz'dan sonra sırasıyla 1936 yılında Dr. E. Abbot ve 1939 yılında Taylor Hobson yüzey ölçme teknolojisini ilerlettiler. Son yıllarda temas uçlu ölçme cihazları kullanılarak daha küçük yüzey pürüzlülük değerleri ölçülebilmektedir [144]. Temas uçlu ölçme sistemlerine ait temel çalışma prensibi Şekil 4.6'da verilmiştir. Dedektör, sürücü ünitesine bağlıdır, bir motor vasıtasıyla yatay olarak iş parçası üzerinde ileri geri hareketini yapar. Dedektörün parça üzerindeki yatay hareketi esnasında yüzey üzerindeki pürüzlülüklere değen dedektöre bağlı elmas uçlu iğnenin dikey hareketinin oluşturduğu mekanik sapmaların sürücü ünitesi tarafından elektrik sinyallerine çevirip yükseltilmesi;

verilere göre filtrelenmesine, yüzey pürüzlülük parametrelerinin hesaplanmasına, ekranda gösterilmesine ve istenilen durumda çıktısının alınmasına dayanır [144].



Şekil 4.6. Temas uçlu ölçme sistemlerine ait yemel çalışma prensibi [144]

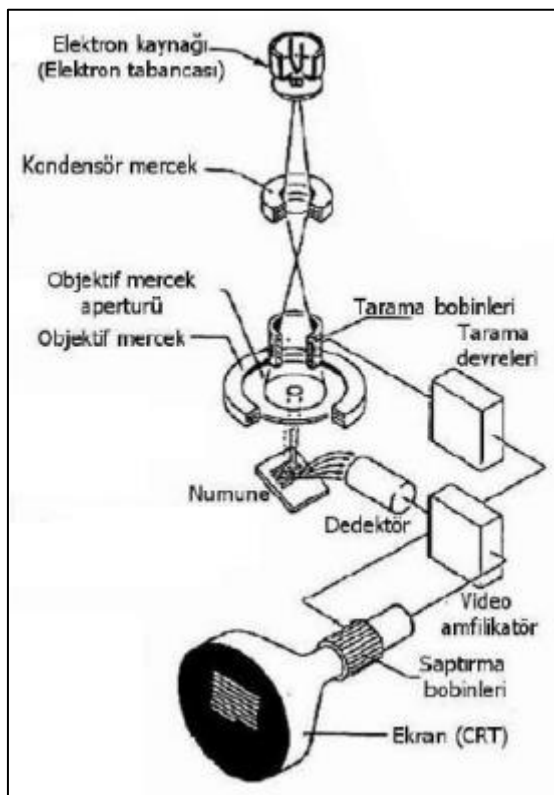
#### 4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Elektron mikroskoplarında, dalga boyu görünür bölgedeki ışığın dalga boyundan yüz bin kat küçük elektronlar kullanılır ve bu sayede optik mikroskoplardan çok daha gelişmiş görüntüleme yapılabilir. Malzeme yüzeyine düşürülen elektronların, saçılması ya da tünellenmesi sonucunda bir plaka üzerine düşürülmesi ile malzemenin görüntüsü oluşturulur [145].

Taramalı elektron mikroskobunda, odaklanmış bir elektron demetin malzeme yüzeyini taraması sonucu görüntü elde edilir. Gönderilen elektronlar malzemedeki atomlarla etkileşerek sinyal üretirler ve sinyallerin konumları ile gönderilen elektron demetinin konumu eşleştirilerek görüntü oluşturulur. Bu sayede malzeme yüzeyinin topografisi ve kompozisyonu hakkında bilgi edinilebilir [145].

Malzemedeki atomlarla, esnek olmayan elastik çarpışma yapan (yüzeydeki atomların elektronlarına enerjilerini transfer eden) elektronlar ikincil elektronlardır. Yüzeyin 10 nm

civarındaki derinlikten çıkarlar ve enerjileri ortalama 50 eV’dir. İkincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüp ile toplanarak görüntü elde edilir. Daha yüksek enerjili ve daha derinlere (300 nm’ye kadar) saçılan elektronlar ise geri saçılma elektronları olarak bilinir. Bunlar da katı hal detektörleri ile tespit edilir. 1000 nm civarındaki derinliklerde ise elektronların atomla etkileşimi sonucu yayılan karakteristik X-ışınları incelenir. Bu yöntem, enerji ayırıcı X-ışını spektrometresi (EDS) olarak adlandırılır. Bu sayede SEM de incelenen malzemelerin elementel analizlerini de yapmak mümkün olur [145]. SEM’in temel bileşenleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Taramalı elektron mikroskobuna ait temel bileşenler [145]

## 5. DENEYSEL EKİPMAN VE YÖNTEMLER

Taşılama operasyonunda kullanılacak iş parçası için yurt dışından temin edilmesi diğer cam ve cam-seramik malzemelere göre daha kolay olduğu düşünülerek cam ULE® ve cam seramik Zerodur® malzeme seçilmiştir. İşlenebilirlik parametreleri yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir. Malzeme işlenebilirliği ve yüzeyaltı hasarlarının tayini için 2 ayrı deneysel set kullanılmıştır. Deney seti 1’de Zerodur® ve deney seti 2’de ULE® kullanılmıştır. Deney seti 1’de yapılan çalışmalar Tübitak Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü – Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı’nda ve Roketsan A.Ş.’de, deney seti 2’de yapılan çalışmalar Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Deney Seti 1

Bu sette taşılama operasyonu, Satisloh firmasına ait GI-2P olarak adlandırılan 5 eksenli dikey taşılama sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

İşleme parametrelerinden elmas parçacık büyüklüğü, kesme derinliği ve takım ilerleme hızı değiştirilerek, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ve yüzeyaltı hasarlarına etkisi incelenerek işlenebilirlik değerlendirilmiştir. İş parçası olarak 100 x 100 x 25 mm boyutlarında düşük genleşme katsayılı Zerodur® ve kıyas için optikte en çok kullanılan ve ucuz camlardan olan BK7® malzeme seçilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü Taylor Hobson marka Talysurf PGI dimension profilometresi kullanarak ölçülmüştür.

Yüzeyaltı hasarlarını incelemek için farklı elmas parçacık büyüklükleri kullanılmıştır. Elmas parçacık büyüklüğünün yüzeyaltında oluşan hasarların derinliğine ve morfolojisine etkisi olarak değerlendirilmiştir. Parlatma ve kimyasal aşındırma operasyonunun yüzeyaltı hasarı meydana getirmediği varsayılarak, taşılama işleminden sonra, tekrar eden döngüde parlatma ve kimyasal aşındırma operasyonu sonrası interferometrik ölçümler alınmıştır. Yüzeyden kaldırılan toplam malzeme miktarına göre farklı elmas parçacık büyüklükleri için oluşan yüzeyaltı hasarlarının derinliği ve morfolojisi tayin edilmiştir. Parlatma operasyonu Stock Konstruktion marka NLP 300 konvansiyonel parlatma tezgahında yapılmıştır. İnterferometrik ölçüm için Zygo Zegage Plus beyaz ışık interferometresi kullanılmıştır.

### 5.1.1. Taşlama tezgahı

Deneyleyler için ticari olarak temin edilebilen Almanya menşeli Satisloh marka GI-2P model taşlama tezgahı kullanılmıştır. Optik küresel/asferik, serbest formlu ve plano yüzeylerin kaba ve hassas taşlama operasyonları ile üretilmesini ve ayrıca delme, çaplama, kaşıklama gibi operasyonların gerçekleşmesini sağlayan CNC tabanlı 5 eksenli taşlama tezgahıdır. Yüksek talaş kaldırma oranına sahiptir ve geniş optiklerin üretilmesi için tasarlanmıştır. Şartnamelere göre 100 cm'lik çapa ve 300 mm eğrilik yarıçapına sahip olan konveks BK7® için PV değeri 2 mikrometreden daha iyi olacak şekilde form doğruluğu sağlanmalıdır. Tezgahın kontrol sistemi Rextroth Bosch MTX'dir. Taşlama tezgahına ait görsel Resim 5.1'de verilmiştir.



Resim 5.1. Satisloh GI-2P taşlama tezgahı

Tezgah 4 ana ünitelerden oluşmaktadır.

**Parça işleme ünitesi:** İlgili parçanın içerisine yerleştirilerek taşlama işleminin hareketli aşındırıcı takım kullanılarak şekillendirildiği CNC ünitedir.

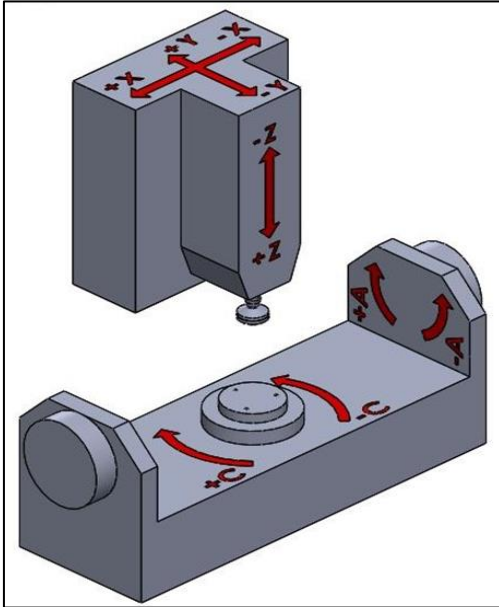
**Hava aspiratör ünitesi:** Parça işleme ünitesine üst kısımdan yaklaşık 45 inçlik bir hortum ile bağlı olan ve işleme sırasında buharlaşan soğutma sıvısını çalışma atmosferine karıştırmadan ortamdaki tahliye ederek uzaklaştırıp filtreleyen ünitelerdir.

Soğutma sıvısı tank/santrifüj/sirkülasyon ünitesi: Yaklaşık 200 litre kapasitede soğutma sıvısını içinde bulunduran, parça işleme ünitesinden gelen kullanılmış sıvıyı santrifüj girişinden alarak sıvı ile iş parçasının toz talaşını ayrıştırdıktan sonra tanka geri besleyen ve sonrasında soğutma sıvısını soğutma ünitesine basan ünedir.

Kapalı devre sıvı soğutma ünitesi: Tanktan gelen ve ısınmış olan soğutma sıvısını içinde yer alan hava soğutmalı sistem yardımı ile soğutup sıcaklığını  $21^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutarak çıkışında parça işleme ünitesinde yer alan sıvı enjektörlerine veren ünedir. Bu ünite aynı zaman da ayrı bir kapalı çevrim hattı kullanarak yüksek devirlerde dönen aşındırıcı takım mil motorunu da soğutma görevini üstlenir.

### Eksenler

CNC tezgahı 5 eksenlidir. Eksen doğrultuları ve yönleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Belirtilen tezgâh için X, Y, Z doğrusal eksen hareketleri torna mili üzerinden gerçekleşirken, açısal dönü konumlandırmaları iş parçasının bağlı olduğu beşik (A ekseni) ve takım tutucu tabla (C ekseni) üzerinden sağlanmaktadır.



Şekil 5.1. Taşlama sistemi hareket eksenleri

X ekseni, takımın sağa ve sola hareketini sağlayan eksen; Y ekseni, takımın öne ve arkaya hareketini sağlayan eksen; Z ekseni, takımın aşağı ve yukarı hareketini sağlayan eksen; C ekseni, iş parçasının kendi eksenine etrafında dönmesini sağlayan eksen; A ekseni, iş

parçasının mil etrafında dönmesini sağlayan eksendir. X ekseninin hareket aralığı 380 mm, Y ekseninin 680 mm, Z ekseninin 250 mm, C ekseninin 360°'dir, A ekseninin +90° ile -30° arasındadır. X, Y, Z eksenlerinin hareket sistemi bilyalı, vidalı sistemli dijital servo motordur. Pozisyon bildirimi Heidenhain doğrusal ölçeği ile sağlanır. A ve C eksenlerinin hareket sistemi su soğutmalı yüksek torklu servo motordur. Pozisyon geri bildirimi yine yüksek çözünürlüklü Heidenhain ölçüm sistemi ile sağlanır.

### Parça bağlama teknikleri

Parça bağlamak için kullanılan tutucu ekipmanları, CNC tezgâhın C eksen tablası üzerinde yer alan dairesel simetrik 6 adet vida deliği kullanılarak tezgâha sabitlenir. Tezgâhın C eksen tablasının ortasında bir vakum ve basınç hattına bağlı bir delik bulunur. Sıkıştırma ya da vakum işlemleri, bu pnömatik hat sayesinde yapılır. CNC tezgâhın vakum ve basınç işlemleri ise tezgâha bağlı bir pedal yardımı ile ilgili tutucu tipi seçildikten sonra aktif hale getirilir ya da boşaltılır.

CNC tezgâhta parça bağlama aparatları iki ayrı grup olarak tanımlanmaktadır. Her bağlantı tipi için bu iki grubun yüksekliği tezgâha yazılım üzerinden ayrı ayrı tanıtılmalıdır. Bu gruplar tek ya da daha fazla parçalardan oluşmaktadır. Bu gruplardan ilki 'chuck' olarak tanımlanan temel bağlantı grubudur. Bu grup parçaları C eksen üzerine tutturulur. İkinci grup ise 'reception' olarak tanımlanan adaptör parçasıdır ve bu grup chuck üzerine vidalama yöntemi kullanılarak sabitlenir. Chuck grubu parçası, kullanılan bağlantı tipine göre farklılık gösterirken, aynı bağlantı tipinde farklı iş parçaları için farklı reception grupları kullanılabilir. Dolayısıyla, reception, iş parçasının geometrisine bağlı bir ekipmandır.

Sıkıştırma ile bağlama, vakum ile bağlama, yapıştırıcı ile bağlama teknikleri ile parça işleme ünitesine bağlanabilir. Deneysel çalışmamız için yapıştırıcı ile bağlama tekniği tercih edilmiştir.

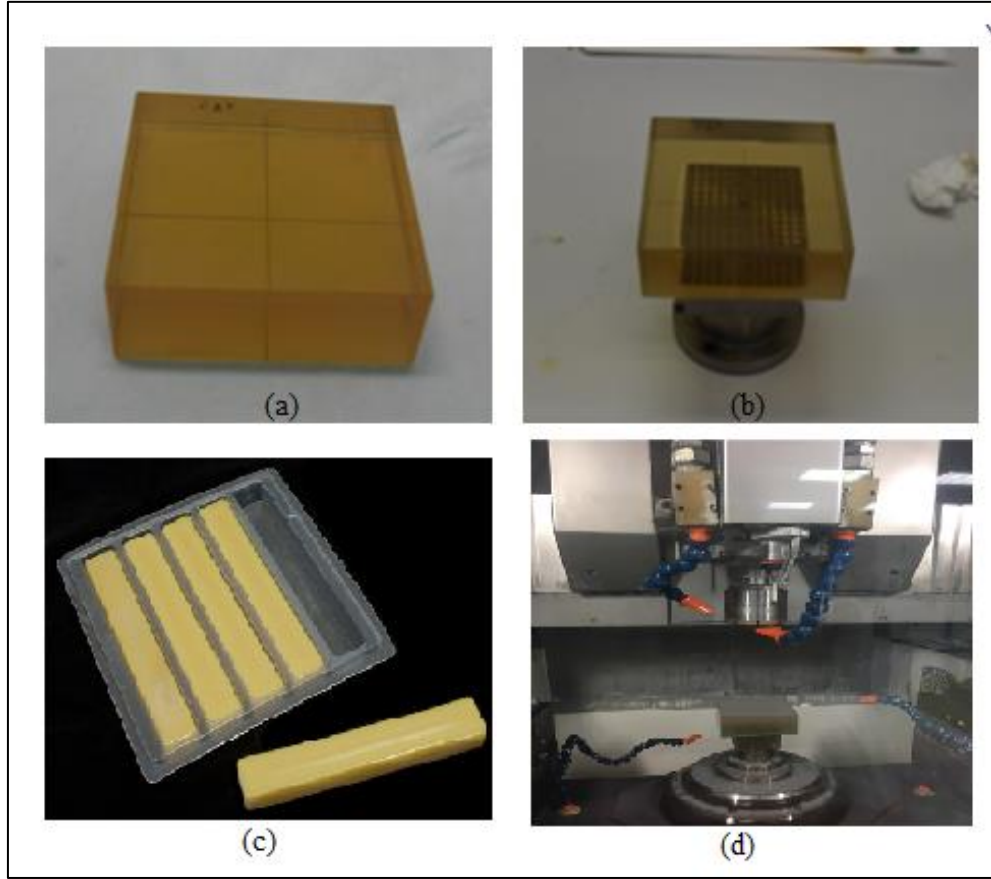
### 5.1.2. Taşlama ekipmanı

#### Örnek hazırlama

Taşlama işlemi yapılacak parça sisteme yapıştırma tekniği ile bağlanır. Yapıştırma metodunda, chuck grubu tek parçadan oluşmaktadır. Bu parça, 6 adet vida yardımı ile C eksenine sabitlenir. Sabitleme işlemi, dairesel salgı komparatörü kullanılarak, chuck parçasının C eksen ile merkezliliği ölçülerek vidalar üzerinden ayarlanır. Bu parçanın salgısı 3-4  $\mu\text{m}$  değerlerini aşmamalıdır.

Reception parçası, chuck parçasına 3 adet açisal simetrik konumlanmış vida ile tutturulur. Bu parça, iş parçası ile yapıştırılan yüzeyi ve taban yüzeyi hassas olarak taşlanmış, genel işler için düzlemsellik toleransı 10  $\mu\text{m}$  değerinin altında olan, salgı toleransı yine 25-30  $\mu\text{m}$  değerinin altında olan, üst yüzeyi simetrik kanallar ve girintilerden oluşan paslanmaz çelik bir parçadır. Yapıştırıcı bu kanallara dolarak iş parçası ile daha mukavim bir tutma gerçekleştirir.

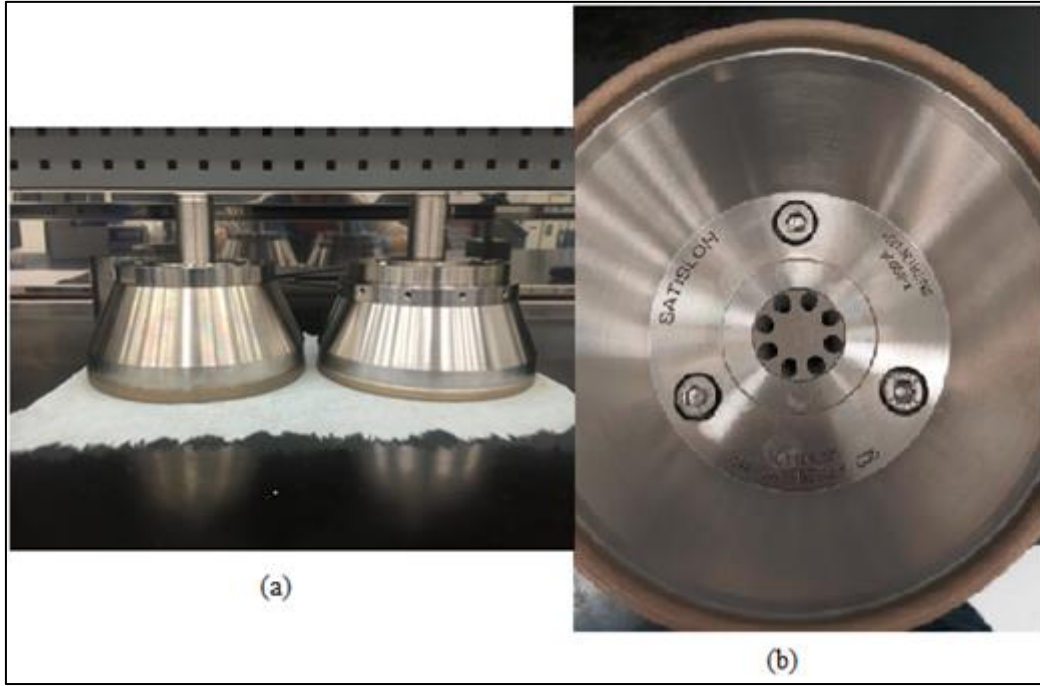
Bu yöntemde iş parçası ve reception parçası aynı anda yaklaşık 150°C derece sıcaklığa homojen şekilde ısıtılır, yapıştırıcı ilgili sıcak yüzeye sürülerek eriyik halde iken parçalar birbirine tutturularak yapıştırıcı donmadan tezgâh içinde merkezlilik ayarları yapılır ve parçalar soğumaya bırakılır. Merkezlilik ayarı yapılırken A ekseninin 0 konumunda olması gerekir. Yapıştırma işlemi için Satisloh marka C20 balmumu yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırma yöntemi ile bağlanan parça ve balmumu yapıştırıcı Resim 5.2’de verilmiştir.



Resim 5.2. (a) Tutucu armetüre bağlanmadan önce iş parçası (b) armetüre bağlandıktan sonra iş parçası (c) yapıştırma işleminde kullanılan balmumu yapıştırıcı (d) tezgah içine bağlandıktan sonra iş parçası

#### Taşıma takımları

İşlenebilirlik parametrelerinin incelenmesi için, elmas parçacık büyüklüğü 126, 46, 25  $\mu\text{m}$  olan, metal bağlı, 12F2 şekilli kap taşıma takımları kullanılmıştır. Takımların elmas parçacık konsantrasyonu %35'tir. Takım çapı ise 145 mm'dir. Resim 5.3'te işlenebilirlik parametrelerini incelemeye kullanılan taşıma takımları verilmiştir.



Resim 5.3. İşleme parametrelerinin incelenmesinde kullanılan (a) D126 ve D46 taşlama takımları (b) takımların içten görünümü

Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesi için, elmas parçacık büyüklüğü 126, 64, 35  $\mu\text{m}$  olan, metal bağlı, 12F2 (126 ve 35) ve 6F2 (64) şekilli kap taşlama takımları kullanılmıştır. 126 ve 35  $\mu\text{m}$  elmas parçacık büyüklüğü olan takımların takım çapı 150 mm, 64  $\mu\text{m}$  elmas parçacık büyüklüğü olan takımın takım çapı 80 mm'dir. 126 ve 64  $\mu\text{m}$  elmas parçacık büyüklüğü olan takımların elmas parçacık konsantrasyonu %50 ve 35  $\mu\text{m}$  elmas tane büyüklüğü olan takımın elmas parçacık konsantrasyonu %40'tır. Resim 5.4'te yüzeyaltı hasarlarını incelemeye kullanılan taşlama takımları verilmiştir.



Resim 5.4. Yüzeyaltı hasarlarını incelemede kullanılan (a) D126 ve (b) D64 taşlama takımları

#### Takım tutucu

CNC tezgâhlar için kullanılan takım tutucu standartları V flanş, BT, HSK ve NMTB'dir. Satisloh GI-2P tezgâhında kullanılan standart HSK standardıdır. Bu standardın tercih edilme sebebi diğerlerine göre daha hafif, daha kısa, daha rijit bir yapıda olması ve eksenel ve radyal doğruluğunun daha fazla olması sebebi ile daha hassas işlemleri çok yüksek hızlarda bile gerçekleştirebilmesidir.

#### Takımlarda elmas açma

Bağa gömülü aşındırıcı elmasları açmak için Wendt marka, Art-Nr./No: U51A 100-25-12-Wendt No: 2 kodlu elmas açma çubuğu kullanılmıştır. Resim 5.5'te elmas açma çubuğu gösterilmiştir.



Resim 5.5. Elmas açma çubuğu

### Soğutma sıvısı ve diğer kimyasallar

Su bazlı işleme sıvıları seçilmiştir. Satisloh marka K 50A soğutma sıvısı tanka %2 oranında eklenmiştir. Diğer kimyasallar bakteri önleyici ve köpük gidericidir. Bakteri önleyici Satisloh marka Biozid 92-005-405'tir. Tanka %0,1 oranında eklenir. Köpük giderici Satisloh marka Defoamer SPF MP 92-005-78'dir. Tanka %0,05 - %0,10 oranında eklenir.

### **5.1.3. Taşlama işlemi parametreleri**

İşleme parametrelerinin cam seramik malzemenin yüzey kalitesi ve yüzeyaltı hasarlarına etkisinin incelenmesi için yapılan deneysel çalışmada kesme hızı 15 m/s'de, iş parçası dönme hızı 150 devir/dk'da sabit tutulmuştur. Bu sayede, taşlama takımı elmas parçacık büyüklüğü, takım ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Düşük genleşme katsayısına sahip Zerodur® ile optikte en çok kullanılan malzeme olan görece çok daha ucuz ancak uzay uygulamaları için uygun olmayan BK7® cam da aynı işleme parametreleri kullanılarak işlenmiş ve oluşan yüzey pürüzlülüğü Zerodur® malzeme ile kıyaslanmıştır. Taşlama işlemi parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. İşleme parametrelerinin incelenmesi için kullanılan taşlama parametreleri (Kesme hızı 15 m/s'de, iş parçası dönme hızı 150 dk<sup>-1</sup>'de sabit tutulmuştur)

| Malzeme  | Takım | Kesme Derinliği (µm) | Takım İlerleme Hızı (mm/dk) |
|----------|-------|----------------------|-----------------------------|
| Zerodur® | D126  | 100                  | 0,10                        |
|          | D126  | 100                  | 0,25                        |
|          | D126  | 100                  | 0,50                        |
|          | D126  | 200                  | 0,25                        |
|          | D126  | 300                  | 0,25                        |
|          | D46   | 100                  | 0,10                        |
|          | D46   | 100                  | 0,25                        |
|          | D46   | 100                  | 0,50                        |
|          | D46   | 200                  | 0,25                        |
|          | D46   | 300                  | 0,25                        |

Çizelge 5.1. İşleme parametrelerinin incelenmesi için kullanılan taşlama parametreleri (Kesme hızı 15 m/s’de, iş parçası dönme hızı 150 dk<sup>-1</sup>’de sabit tutulmuştur)

|          |      |     |      |
|----------|------|-----|------|
| Zerodur® | D25  | 100 | 0.10 |
|          | D25  | 100 | 0,25 |
|          | D25  | 100 | 0,50 |
|          | D25  | 200 | 0,25 |
|          | D25  | 300 | 0,25 |
| BK7®     | D126 | 100 | 0,10 |
|          | D46  | 100 | 0,10 |
|          | D25  | 100 | 0,10 |

Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde, hasar oluşumuna en çok etki eden faktör elmas parçacık büyüklüğüdür. Bu sebeple, taşlama parametreleri her takım için aynı tutulurken, üç farklı elmas parçacık büyüklüğünde takım kullanılmıştır. Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde kullanılan taşlama parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde kullanılan taşlama parametreleri

|                                           |                |
|-------------------------------------------|----------------|
| Takımlar                                  | D126, D64, D35 |
| Kesme Derinliği (µm)                      | 250            |
| Takım İlerleme Hızı (mm/dk)               | 0,05           |
| Kesme Hızı (m/s)                          | 15             |
| İş Parçası Dönme Hızı (dk <sup>-1</sup> ) | 150            |

#### 5.1.4. Yüzeyaltı hasarlarının incelenmesinde kimyasal aşındırma ve parlatma operasyonu

Parlatma ve kimyasal aşındırma operasyonunun yüzeyaltı hasarı meydana getirmediği varsayılarak, taşlama işleminden sonra tekrar eden döngüde parlatma ve kimyasal aşındırma işlemi yapılarak interferometrik ölçüm alınmıştır. Devamında, yüzeyden kaldırılan toplam malzeme miktarına göre farklı elmas parçacık büyüklükleri için oluşan yüzeyaltı hasarlarının derinliği ve morfolojisi tayin edilmiştir.

### Kimyasal aşındırma işlemi

Malzeme aşındırma, stres alma, yüzeyaltı hasarları ortadan kaldırma, hasarları açarak görünür hale getirme veya kimyasal bileşimin içeriğine göre kaba parlatmada kullanılan işlemdir. Kimyasal karışımın içeriği, iş parçasına göre değişir. Zerodur® için hazırlanan karışım, %70'lik hidroflorik asit (HF), sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve fosforik asitten ( $H_3PO_4$ ) oluşmaktadır. Karışım hazırlanırken, manyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Hazırlanan asit karışımı, teflon ya da kestamit (asit dayanımı olan) kaplarda muhafaza edilmiş ve asit dolabı içerisinde saklanmıştır.

Bu işlem, taşmalı küvetler şeklinde tasarlanmış, asit dayanımı olan ıslak tezgâhlarda yapılmıştır. Islak tezgâhların, asit buharını çekecek bir çeker ocak şeklinde olması gerekir. Asit ve yıkama işlemleri için en az 4 adet taşar banyo bölmesine sahip olması gerekir. Kimyasal aşındırma işleminde kullanılacak taşmalı küvetlere örnek Resim 5.6'da verilmiştir. İşlem yapılırken her türlü koruyucu donanım giyilmiştir.



Resim 5.6. Kimyasal aşındırma operasyonunda kullanılan taşmalı küvetli ıslak tezgahlar

Oluşan yüzey altı hasarların kimyasal aşındırma işlemi ile nasıl değiştiğini incelemek için D126'lık takım kullanarak işlenen malzeme 60 s kimyasala daldırılmıştır. Çatlakların değişimi interferometrik ölçümle tayin edilmiştir.

### Parlatma işlemi

Parlatma işlemi için ticari olarak temin edilebilen Stock Konstruktion marka NLP 300 model konvansiyonel parlatma tezgahı kullanılmıştır. Konvansiyonel tezgahlar CNC tabanlı

tezgahlara göre daha manueeldir ve daha çok plano olarak adlandırılan düz yüzeyler ile küçük siferik yüzeylerin parlatma operasyonları için kullanılmaktadır. Resim 5.7’de konvansiyonel parlatma tezgahına ait görsel verilmiştir.



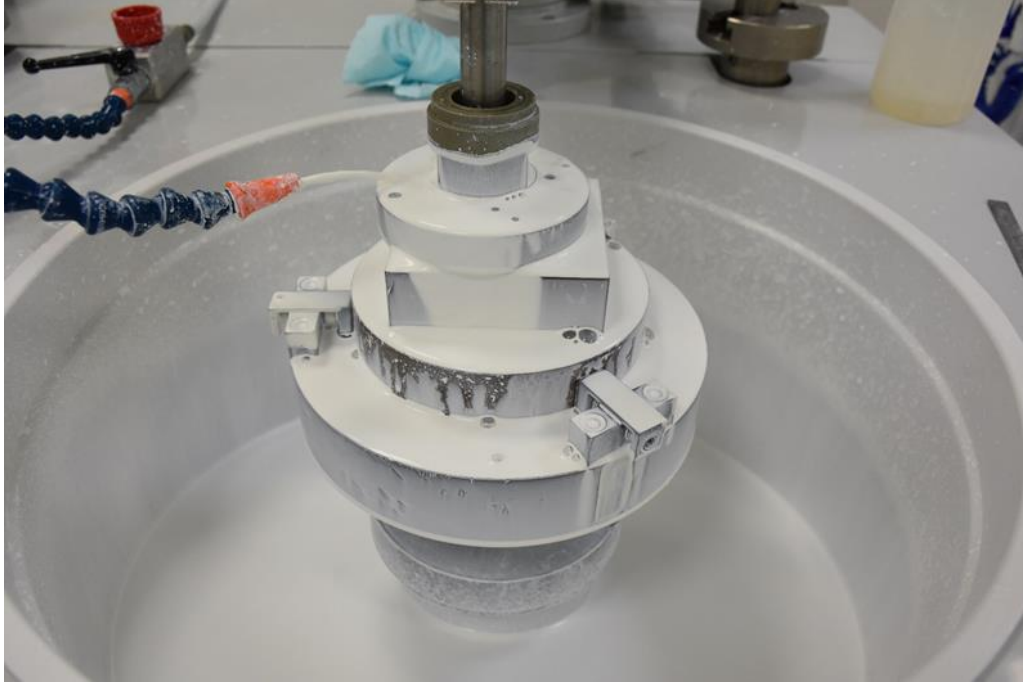
Resim 5.7. Konvansiyonel parlatma tezgahı

Bu tezgahla yapılan parlatma işleminde, işlenecek parça yüzeyi ile dezmapon<sup>®</sup> veya poliüretandan yapılan parlatma pedleri arasına seryum oksit içeren akışkan verilerek parçalar dairesel olarak birbiri üzerinde hareket ettirilmiştir. Parçaya veya parlatma pedine belirli bir osilasyon hareketi vererek de malzeme üzerindeki belirli bölgelerden kaldırma işlemi yapılabilir. Parlatma işlemi, mekanik ve kimyasal olarak yüzeyden malzeme kaldırır. Malzeme kaldırma oranı, CNC taşlama ve kimyasal aşındırma işlemine göre çok düşüktür ve ortalama 10-20 mikron civarındadır ve iş parçasında yüzey altı hasarı yaratmadığı varsayılır.

Çalışma basıncı uygulama şekli kaydırmalı ağırlık şeklindedir. 10 ile 50 N arasında kuvvet uygulanabilir.

Deneylerimizde parlatma işlemi için dezmapon parlatma pedi ve Universal Photonics Firmasına ait olan %98 oranında seryum oksit parçacıklardan oluşan Hastilite Po parlatma sıvısı kullanılmıştır. Parlatma sıvısının ortalama parçacık büyüklüğü 0,4 ile 0,7  $\mu\text{m}$ ,

yoğunluğu 1,5027 – 1,6727 g/ml arasındadır ve azami parçacık büyüklüğü 4  $\mu\text{m}$ 'dir. Zerodur® malzeme için pH 8,0 tutulmuştur. Resim 5.8'de parlatma işlemi verilmiştir.



Resim 5.8. Parlatma işlemi

Parlatma işlemi parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Parlatma işlemi parametreleri

|                                                   |                                  |
|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| Ana iş mili dakikadaki devir sayısı (1/dk)        | 50                               |
| Eksantirik milin dakikadaki salınım sayısı (1/dk) | 10                               |
| Basınç                                            | Fazladan bir yük uygulanmamıştır |

### 5.1.5. Metroloji teknikleri

#### Profilometre

İşlenebilirlik parametrelerini değerlendirmede taşlama işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Taylor Hobson marka Talysurf PGI dimension profilometresi kullanarak yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Bu cihaz, 300 mm çapa kadar küresel, küresel olmayan,

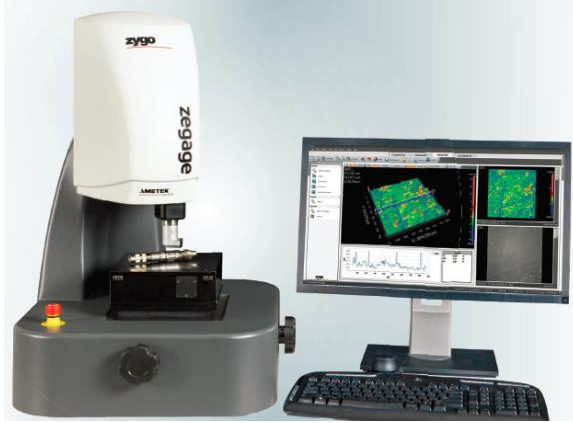
difraktif optiklerin 2D ve 3D analizi için tak otomatik, tek dokunuşlu ölçüm sağlar. Çözünürlüğü 0,2 nm'dir. Talysurf PGI dimension profilometresi Resim 5.9'da verilmiştir.



Resim 5.9. Taylor Hobson - Talysurf PGI dimension profilometresi

### İnterferometre

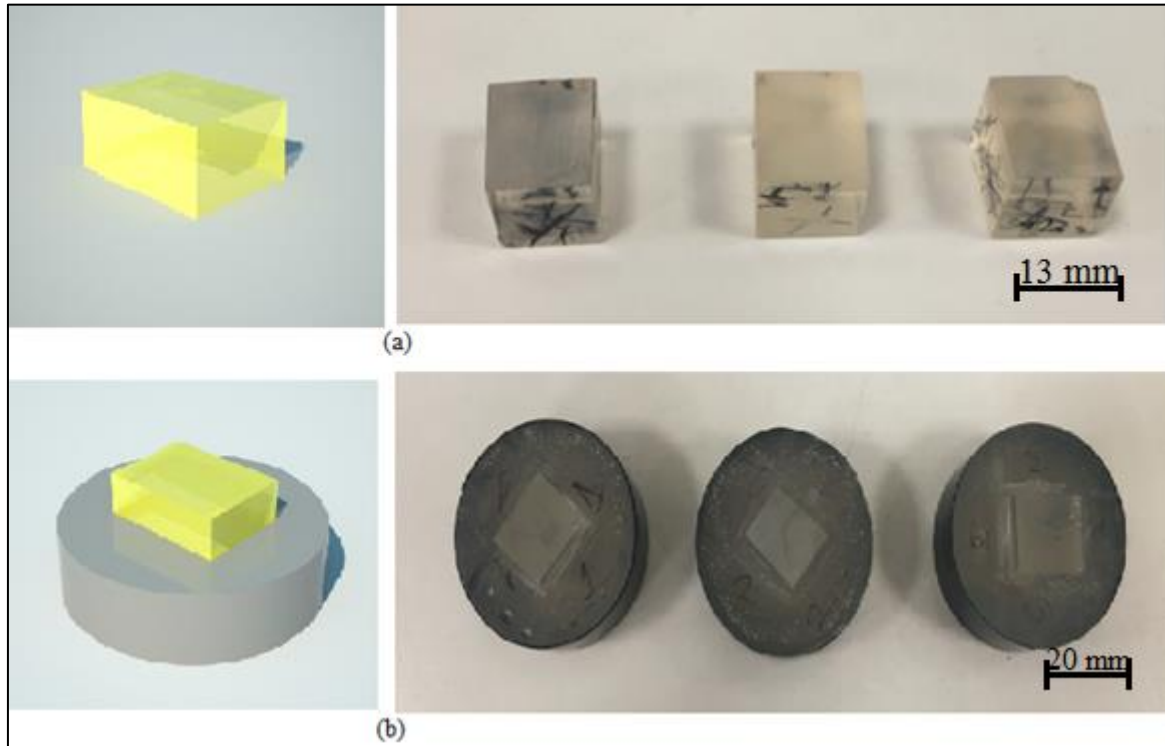
Deneysel çalışmamızda Zygo Zegage Plus beyaz ışık interferometresi kullanılmıştır. Temassız olarak üç boyutlu yüzey topografisi çıkartabilen beyaz ışık interferometresidir. İnterfeormetre ile yüzey pürüzlülüğü, adım yüksekliği gibi parametreleri ölçülüp üç boyutlu yüzey haritası çıkarılabilmektedir. Cihazın ölçüm tekniği, temassız 3 boyutlu Koherans Taramalı İnterferometre esasına dayalıdır. Taramalı mod beyaz ışık interferometresi tekniği ile çalışır. Ölçüm numuneye dokunmadan, temassız olarak gerçekleşir. Işık kaynağı olarak beyaz LED ışık kullanılır. 4 objektif takılabilir. Objektifler 1X – 50X arası büyötmeye sahip, Michelson veya Mirau interferometresi tasarımıdır. Deneysel süreçte 5X büyötmeli Michelson tipi objektif kullanılmıştır. Görüntü büyüklüğü 1,40 mm x 1,05 mm'dir. Resim 5.10'da Zygo Zegage Plus beyaz ışık interferometresi verilmiştir.



Resim 5.10. Zygo Zegage Plus beyaz ışık interferometresi

## 5.2. Deney Seti 2

Bu sette, 3 tane serbest numune ve 3 tane soğuk gömmeli numuneler olmak üzere 2 ayrı örnek grubu oluşturulmuştur. Serbest numunelerin ortalama boyutları 13 x 15 x 13 mm'dir. Soğuk gömmeli numuneler ise 40 mm çapında epoksinin içine gömülmüştür. Örnekler Resim 5.11'de verilmiştir.



Resim 5.11. (a) Serbest numuneler (b) Soğuk gömmeli numuneler

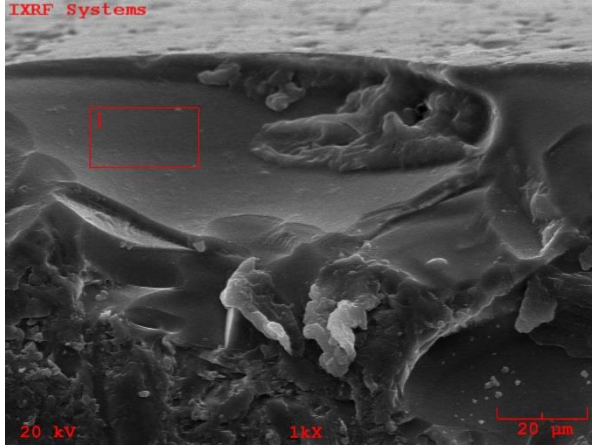
Zımparalama işlemi kararlı ve kendinden yapışkanlı, su geçirmez, farklı parçacık büyüklüğüne sahip silisyum karbür zımpara kağıdı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Parçacık numarası P120, P220 ve P320 olan taşlama kağıtları kullanılmıştır.

3 adet serbest numune 40 N kuvvet uygulayarak P120, P220 ve P320'lik zımpara kağıtları kullanılarak manuel olarak zımparalanmıştır. Her zımpara kağıdının oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Taşlanan yüzeye komşu 4 yüzey parlatılmıştır ve P120 ve P220 ile zımparalanan örneklerden zımparalanan yüzeyleri ile parlatılan yüzeyin kesiştiği köşeler ve yüzeyleri SEM'de incelenmiştir. İncelemeler JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Ayrıca kullanılan P120 ve P320 taşlama diskleri ve yeni disklerden de aşındırıcı parçacıkların değişimini görmek için SEM görüntüsü alınmıştır. ULE® malzemenin kimyasal içeriği hakkında bilgi edinmek için taşlanmış malzemenin artık talaş veya aşındırıcı parçacık kalmadığı düşünülen bölgesinde elemental yapı analizi (EDS) yapılmıştır.

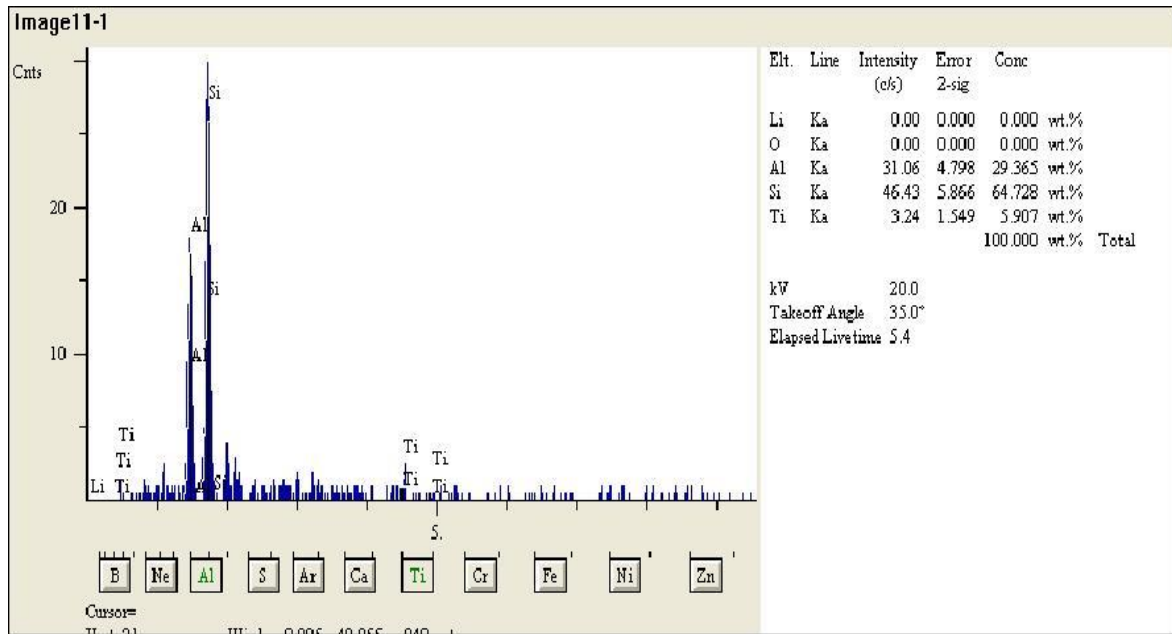
Soğuk gömmeli numunelerde P120, P220 ve P320 zımpara kağıtları kullanarak ATM marka Saphir 520 model otomatik taşlama ve parlatma sistemi kullanılarak taşlanmış ve parlatılmıştır. Taşlama esnasında belirli periyotlarla ağırlık ölçülerek aşınma miktarı belirlenmiştir. Ağırlık değişimi AND marka HM-200 model dijital hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Daha sonra 3 numune de otomatik sistemde 6, 3 ve 1 µm'lik parlatma keçesi ve elmas pasta solüsyonu kullanarak parlatılmış ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri alınmıştır. Serbest numunelerin ve soğuk gömmeli numunelerin yüzey pürüzlülükleri Mahr marka Perthometer M1 profilometresi ile ölçülmüştür.

### 5.2.1. Malzeme

Bu sette, genleşme katsayısı düşük cam olarak ULE® malzeme kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal kompozisyonunu ve element yoğunluğunu belirlemek için EDS analizi yapılmıştır. Resim 5.12'de EDS analiz bölgesi, Resim 5.13'te analiz sonuçları verilmiştir.



Resim 5.12. ULE® EDS analiz bölgesi

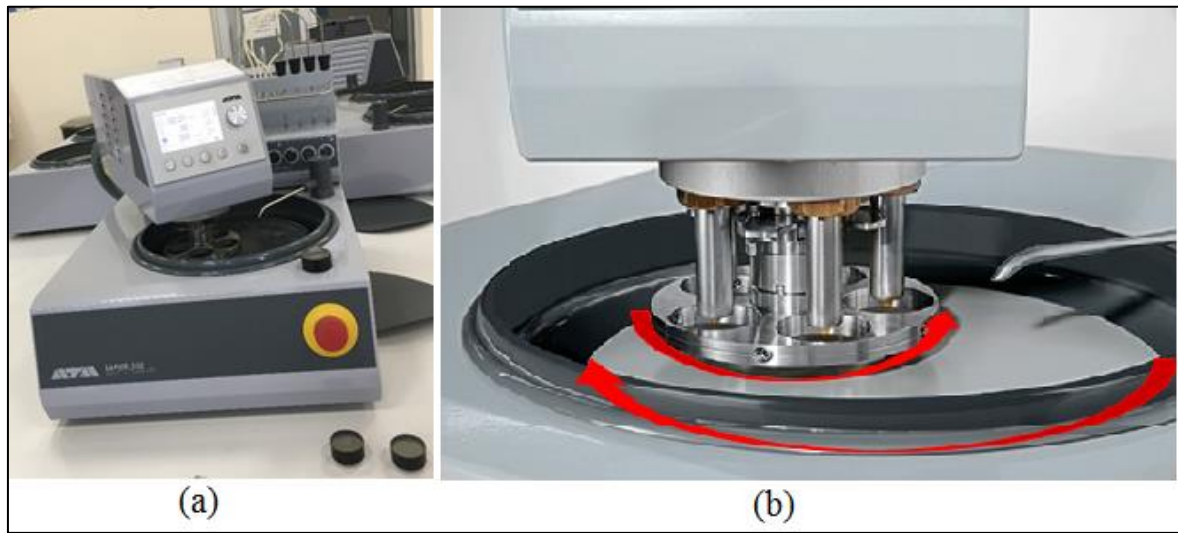


Resim 5.13. ULE®'ye ait EDS analizi

Resim 5.13'te verilen EDS analiz sonuçlarına göre, titanyum – silika cam olarak bilinen ULE® cam malzemenin kimyasal kompozisyonu alüminyum, silika ve titanyumdan oluşmaktadır. Bu durum literatürde ULE için yazan kimyasal kompozisyon içeriği ile uyumludur [14]. Ancak kimyasal yapının yüzdesi bilinmemektedir. Literatürde Zerodur® malzemenin kimyasal kompozisyonu ise lityum, alüminyum, silika olarak verilir [146]. 2 malzemeninde termal genleşme katsayısı neredeyse 0 olmasına rağmen, iki malzeme kimyasal içerik olarak birbirinden ayrılır. 2 malzeme farklı üretim teknikleri ile elde edilmiş olup, termal özellikleri benzerdir.

### 5.2.2. Zımparalama ve parlatma sistemi

Deneyleler için ticari olarak temin edilebilen Almanya menşeli ATM marka Saphir 520 model taşlama ve parlatma yapabilen tezgah kullanılmıştır. Sisteme ait görsel Resim 5.14.a’da verilmiştir. Su soğutmalı bir sistemdir. 5 adet numune koyma yeri vardır. Aynı anda 5 parça zımparalanabilir veya parlatılabilir. Ayrıca bu parçalara tekli veya merkezi basınç uygulanabilir. Zımpara devri ve örnek tutucu dönüş yönü değiştirilebilir. Resim 5.14.b’de zımpara ve örnek tutucunun dönüş yönleri verilmiştir.



Resim 5.14. (a) ATM marka Saphir 520 model taşlama parlatma sistemi (b) zımpara diski veya parlatma keçesi ve örnek tutucu dönüş yönleri

### 5.2.3. Zımparalama ve parlatma ekipmanı

#### Zımpara diskleri

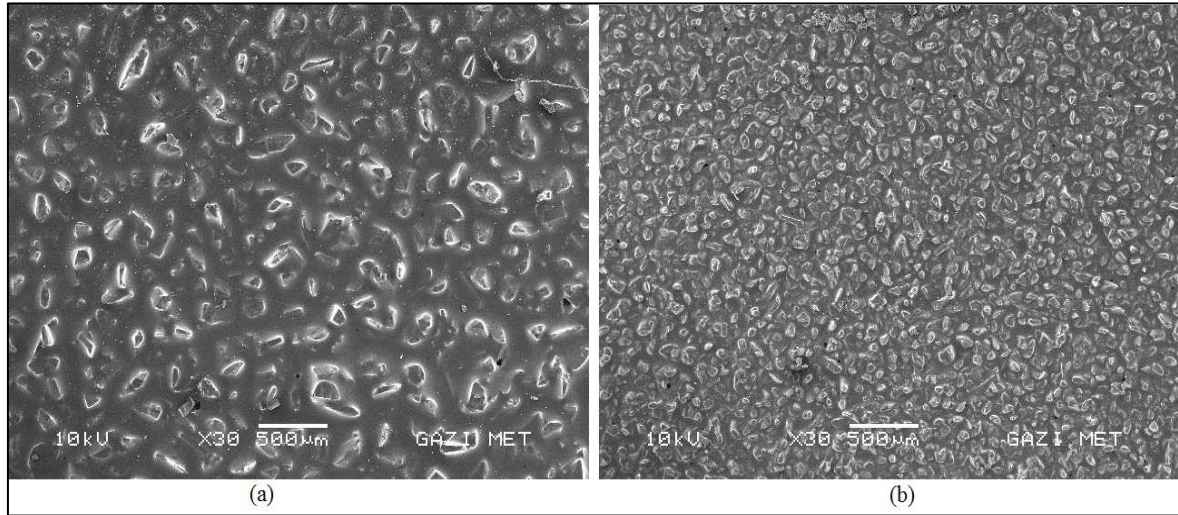
Taşlama amaçlı kullanılan zımpara diski olarak Hermes Schleifwerkzeuge marka kararlı ve kendinden yapışkanlı su geçirmez silisyum karbür zımpara kağıdı kullanılmıştır. Esnek, katlanmaya ve yırtılmaya karşı dirençli stabil lateks kağıt üzerine aşındırıcı parçacıklar bağlanmıştır. Islak veya kuru kullanılabilir. Metalografi endüstrisinde çok fazla kullanılmaktadır. Metal malzemeler için çok uygun olmasına rağmen cam ve seramikler için daha az tercih edilirler. Reçine bağ yapısına sahiptir. Deneysel çalışmada Avrupa standartlarında sırasıyla D126, D76 ve D54’e denk gelen ve 125 - 106, 75 – 83, 53 – 45  $\mu\text{m}$

aralığında parçacık büyüklüğü olan P120, P220, P320 diskler kullanılmıştır. Resim 5.15'te örnek disklerin önden ve arkadan görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.15. Önden ve arkadan taşlama diskleri

Zımparalama işlemi yapılmadan önce, P120 ve P320 disklerine ait SEM ile alınan yüzey görüntüsü Resim 5.16'da verilmiştir.

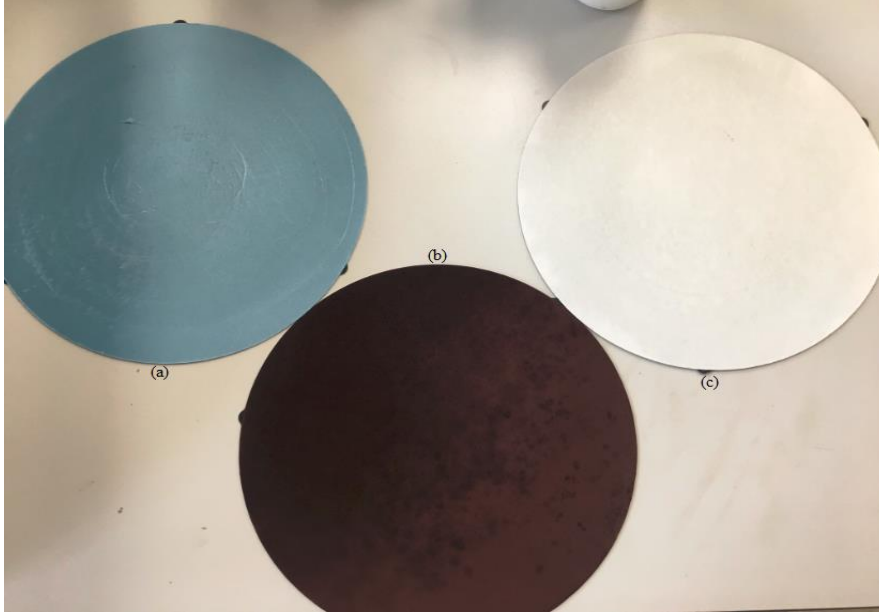


Resim 5.16. (a) P120 ve (b) P320 zımparalama diskleri

Resim 5.16'da görüldüğü gibi, aşındırıcı parçacık büyüklüğü P320 zımpara diskinde daha küçüktür.

### Parlatma keçeleri ve pastaları

Parlatma keçesi olarak Akasel marka, Mag-Napal (1  $\mu\text{m}$ ), Mag-Ramda (3  $\mu\text{m}$ ), Mag-Daran (6  $\mu\text{m}$ ) parlatma keçeleri kullanılmıştır. Mag-Ramda ve Daran asetat dokumadır. Mag-Napal ise floklu viskondur. Kullanılan parlatma keçeleri Resim 5.17’de verilmiştir.



Resim 5.17. (a) 3  $\mu\text{m}$ ’lik (b) 1  $\mu\text{m}$ ’lik (c) 6  $\mu\text{m}$ ’lik parlatma keçesi

Parlatma pastası olarak Akasel marka, DiaDoublo 1, 3 ve 6  $\mu\text{m}$  elmas büyüklüğü olan monokristal, su bazlı elmas süspansiyonlar kullanılmıştır. Ayrıca ilave yağlayıcı olarak Akasel marka Lube Green kullanılmıştır.

#### **5.2.4. Zımparalama ve parlatma işlemi parametreleri**

3 adet serbest numunenin taşlanacak yüzey ile buna komşu 4 yüzey, 3 ve 6  $\mu\text{m}$ ’lik elmas parlatma solüsyonu ve keçeleri ile manuel olarak parlatılıp yüzey pürüzlülüğü ölçüldükten sonra, 120, 220, 320’lik silisyum karbür zımparalarla doğrusal şekilde yaklaşık 40 N kuvvet uygulanarak manuel olarak taşlanmıştır.

3 adet soğuk gömmeli numunenin taşlama ve parlatma işlemleri aynı sistemde yapılmıştır. Taşlama işlemi parametreleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Soğuk gömmeli numunelerin taşlama işlemi parametreleri

| Numune | Taşlama Diski | Taşlama Diski Devri (1/dk) | Uygulanan Yük (N) |
|--------|---------------|----------------------------|-------------------|
| 1      | P120          | 300                        | 30                |
| 2      | P220          |                            |                   |
| 3      | P320          |                            |                   |

Bu parametrelerle taşlanan numunelerde malzeme kaldırma oranı ağırlığındaki azalma ile tayin edilmiştir. Zımparalama işlemine her 20 s’de ara verilerek ağırlık ölçümü alınmış ve 7. ölçüme kadar ikinci kullanımdan sonra taşlama diskisi aynı disk numarasına sahip yeni bir diskle değiştirilmiştir. 11 ölçüm sonunda kaldırılan toplam malzeme miktarı ağırlık cinsinden tespit edilmiş ve numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Daha sonra 3 numune aynı anda sırasıyla 6, 3 ve 1  $\mu\text{m}$ ’lik elmas parlatma solüsyonu ve keçesi ile parlatılmıştır. Parlatma işlemine belli noktalarda ara verilerek yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve taşlama işleminden parlatma sürecinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Parlatma işlemi parametreleri Çizelge 5.5’te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Soğuk gömmeli numunelerin parlatma işlemi parametreleri

| Numune    | Parlatma Solüsyonu ve Keçesi ( $\mu\text{m}$ ) | Parlatma Keçesi Devri (1/dk) | Uygulanan Yük (N) |
|-----------|------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1, 2 ve 3 | 6, 3, 1                                        | 150                          | 10                |

### 5.2.5. Metroloji teknikleri

#### Profilometre

Hem serbest numunelerde hem de soğuk gömmeli numuneler de işlenebilirlik parametrelerini değerlendirmede silisyum karbür taşlama diskleri ile yapılan taşlama işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Mahr marka Perthometer M1 profilometresi ile zımparalama yönüne dik doğrultuda ölçüm yapılmıştır. Örneklem uzunluğu  $L_t = 5,6 \text{ mm}$ ’dir. Profilometreye ait görsel Resim 5.18’de verilmiştir.



Resim 5.18. Mahr marka Perthometer M1 profilometresi

#### Taramalı elektron mikroskobu

P120 ve P220 ile zımparalanan serbest numuneden zımparalanan yüzey ve buna dik yan yüzeylerinden, ek olarak kullanılan P120 ve P320 taşlama diskleri ve yeni disklerden de aşındırıcı parçacıkların değişimini görmek için SEM görüntüsü alınmıştır. ULE® malzemenin kimyasal kompozisyonu ve element yoğunluğunu belirlemek için EDS analizi yapılmıştır. JEOL JSM-6060LV taramalı elektron mikroskobu ile görüntü alınmıştır. Örneklerden ölçüm alabilmek için ilk başta  $10^{-1}$  mbar basınç altında %60 altın, %40 paladyum ile kaplanmıştır. Resim 5.19’da kaplama işlemi ve taramalı elektron mikroskobuna ait görsel verilmiştir.



Resim 5.19. (a) Numunelerin kaplanma işlemi (b) taramalı elektron mikroskobu



## 6. DENEY SONUÇLARI

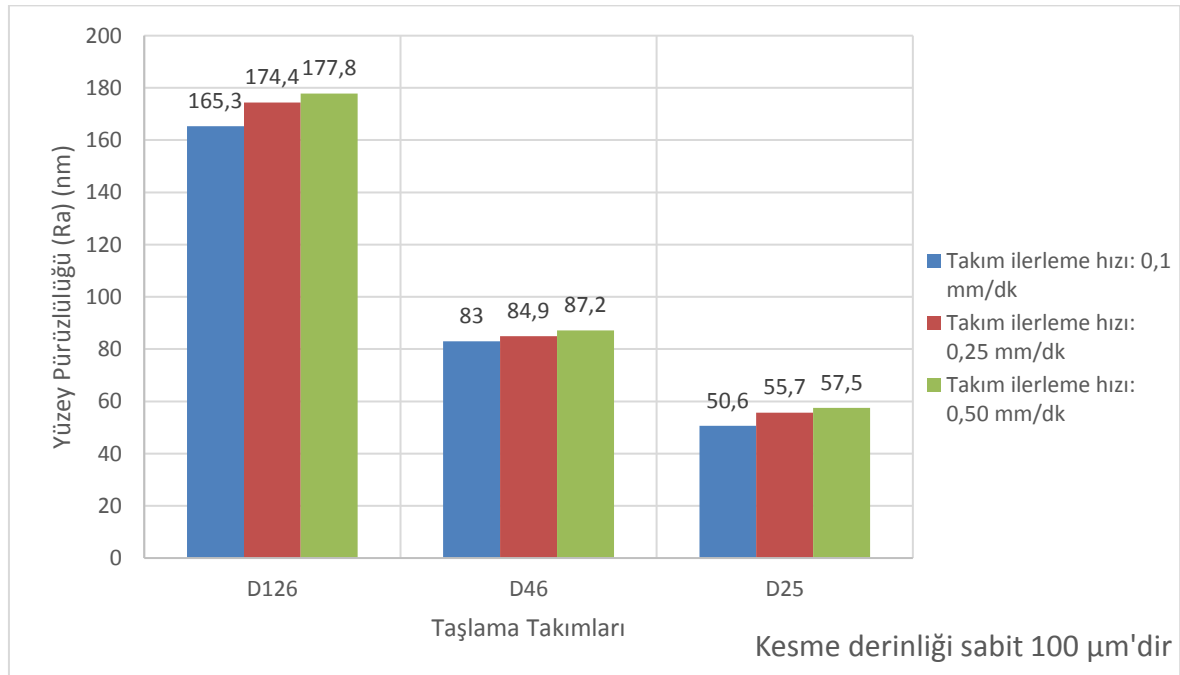
Deney seti 1 ve deney seti 2’den elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırma açısından uygun değildir. Her set kendi içinde değerlendirilmiştir.

### 6.1. Deney Seti 1

Sonuçlar işleme parametreleri ve yüzeyaltı hasarları dikkate alınarak ayrı ayrı incelenmiştir.

#### 6.1.1. İşlenebilirlik parametreleri

Zerodur® malzemenin işlenmesinde, taşlama parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi değerlendirilmiştir. Kesme derinliği sabit ve 100  $\mu\text{m}$  tutularak, taşlama takımının ve takım ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 6.1’de verilmiştir.

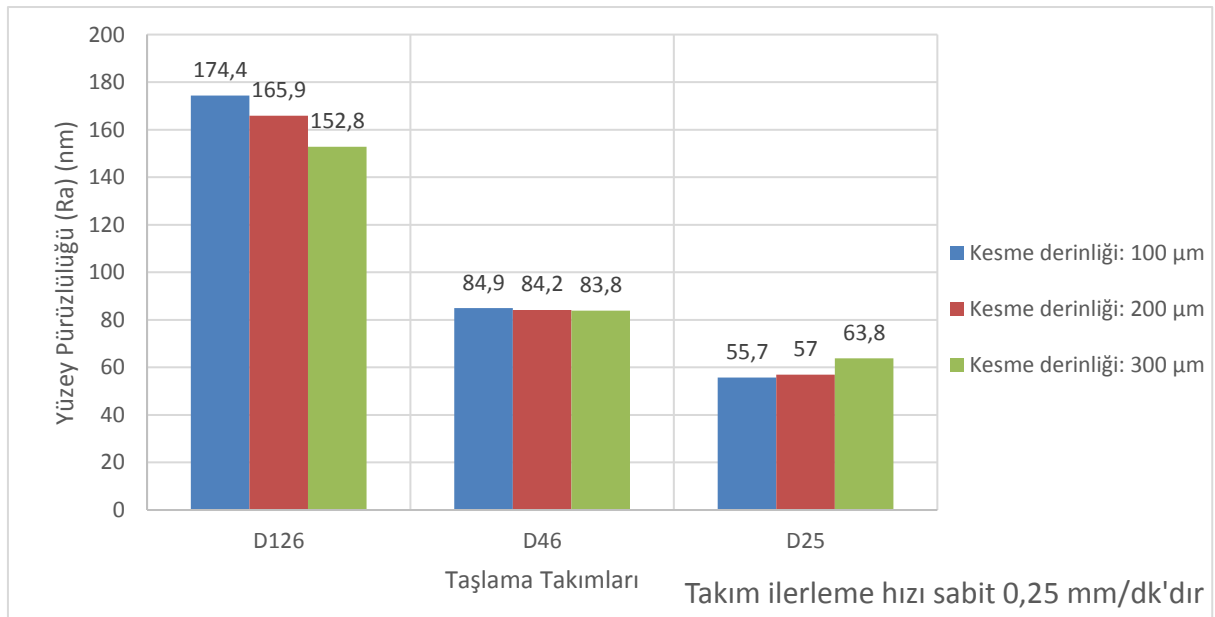


Şekil 6.1. Taşlama takımının ve takım ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.1’e göre, en yüksek yüzey pürüzlülüğü, en kaba elmas parçacık büyüklüğüne sahip taşlama takımı (D126) kullanarak en yüksek takım ilerleme hızında elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ise, en ince elmas parçacık büyüklüğüne sahip taşlama takımı (D25)

kullanarak en düşük takım ilerleme hızında elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü benzer aşındırıcı tabaka kullanılırken daha büyük parçacık büyüklüğüyle artar [25], ancak her koşulda 180 nm'nin altında kalmıştır. Kullanılan taşlama takımı aynı kaldığında, takım ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğüde artar [110]. Bölüm 3'te verilen Eş. 3.31 de bu sonucu doğrulamaktadır. Ancak elde edilen yüzeyi iyileştirmek için, takım ilerleme hızı düşürülürse, işlem süresi çok uzar ve parçanın üretimi için maliyet artar. Takım ilerleme hızı, en kaba takımda yüzey pürüzlülüğünü toplamda 12,5 nm iyileştirirken, en ince takımda bu fark daha azdır ve 6,9 nm'dir. Kaba takım ile işleme yaparken, takım ilerleme hızının etkisi belirgin şekilde görülmüştür. Esmaeilzare, Rahimi ve Rezaei (2014), Zerodur® malzemede işleme parametrelerinden kesme derinliğini 50  $\mu\text{m}$ , ilerleme hızını 0,04 mm/dk, kesme hızını 9 m/s tutarak ve D76'lık takım kullanarak tepe ve çukur profili olarak (PV) en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini 10  $\mu\text{m}$  elde etmiştir. Her durumda bizim elde ettiğimiz yüzey pürüzlülük değerleri bu değerden daha iyidir. Kullanılan tezgahın yeni olması, görece daha hassas ve rijit olması bu farka sebep olan etkenlerdendir. Dinamik olarak rijit bir tezgah, minimum yüzeyaltı hasarı ve göreceli olarak daha yüksek malzeme kaldırma oranı ile yüksek kaliteli yüzey oluşturur [28, 29].

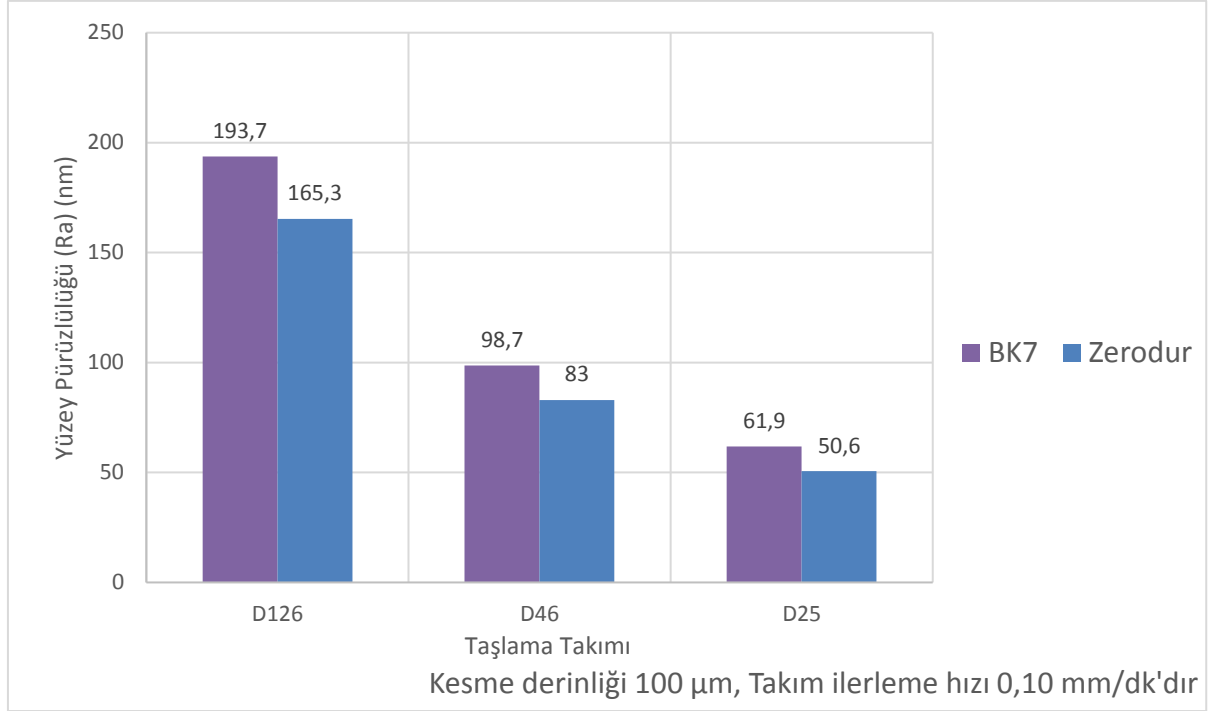
Takım ilerleme hızı sabit 0,25 mm/dk tutularak, taşlama takımının ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Taşlama takımının ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.2'e göre, kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenirken her bir farklı elmas parçacık büyüklüğüne sahip takım ile yapılan taşlama işlemi kendi içinde değerlendirilir. Çünkü elmas parçacık büyüklüğü artıkça kaldırılması gereken ideal malzeme miktarı artar. Daha kaba takımlar ile daha yüksek miktarlarda malzeme kaldırılır. Kullanılan takımlar arasında en yüksek talaş kaldırma oranına sahip takım, D126'dır. 3 ayrı kesme derinliğinden D126 takım için ideal olanı 300  $\mu\text{m}$  kesme derinliğidir. Bunu belirleyen elmas parçacıkların büyüklüğüdür. En kaba takımda kesme derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülüğünde azalma eğilimi varken, en ince takımda kesme derinliği artması ile yüzey pürüzlülüğünde artma eğilimi vardır. Elmas parçacık büyüklüğü ortalama 25  $\mu\text{m}$  olan bir takım ile kaldırılacak malzeme oranı idealde en fazla 50  $\mu\text{m}$  tutulmalıdır. Her koşulda yüzey pürüzlülüğü 175 nm'nin altında kalmıştır. Her koşulda taşlama takımının elmas parçacık büyüklüğü küçüldükçe elde edilen yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Metal bağlı taşlama takımları cam seramik malzemelerin işlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Kesme derinliği 100  $\mu\text{m}$  ve takım ilerleme hızı 0,10 mm/dk'da sabitlenerek malzeme özelliklerinin yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğini incelenmiştir. Bunun için düşük genleşme katsayılı Zerodur® cam seramik malzeme ve optik bileşen olarak en çok tercih edilen camlardan olan BK7® cam malzeme birbiri ile yüzey pürüzlülüğü açısından kıyaslanmıştır. Şekil 6.3'te bu 2 malzemeye ait aynı taşlama koşullarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir.



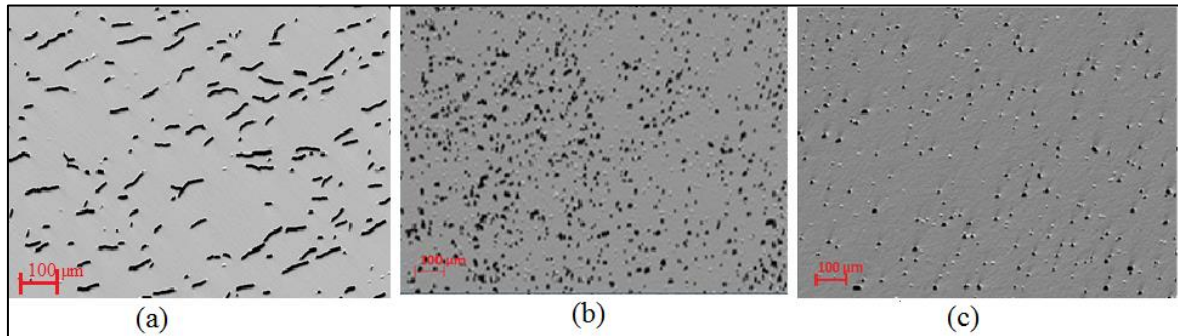
Şekil 6.3. Aynı taşlama parametreleri ile işlenen Zerodur® ve BK7®’de elde edilen yüzey pürüzlülüğü

Şekil 6.3’e göre, aynı taşlama parametreleri ile işlenen 2 ayrı malzemede aynı yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmez. Malzemenin özellikleri, işlenebilirliğini etkilemektedir. Mikro sertlik, kırılma tokluğu, kırılma tokluğu gibi parametreler malzemede meydana gelen hasarları doğrudan etkiler [25]. Yüzeyaltı hasarlarının derinliği, giderek artan yüzey pürüzlülüğü ile artar, aralarında doğrusal olmayan monoton bir artış vardır [126, 147]. Dolayısıyla malzeme özellikleri meydana gelen hasarları doğrudan etkilediği gibi yüzey pürüzlülüğünü de doğrudan etkiler. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü Zerodur® ve BK7® malzemenin işlenebilirliklerinin farklı olmasından dolayı farklıdır [141]. Zhao, Liang, Stephenson ve Corbett (2007), aynı taşlama koşullarında yüzey pürüzlülüğünün yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemede daha düşük çıktığını bildirmiştir. Zerodur® malzemenin kırılma tokluğu  $0,9 \text{ MPa.m}^{1/2}$  ve BK7® malzemenin  $0,82 \text{ MPa.m}^{1/2}$  ‘dir. Zerodur malzemede aynı taşlama koşullarında daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılmıştır. Malzeme karakteristiği, elmas parçacık büyüklüğü, takım ilerleme hızı baskın şekilde yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.

### 6.1.2. Yüzeyaltı hasarları

Farklı elmas parçacık büyüklüğüne sahip taşlama takımlarının meydana getirdiği yüzeyaltı hasarları incelenmiştir.

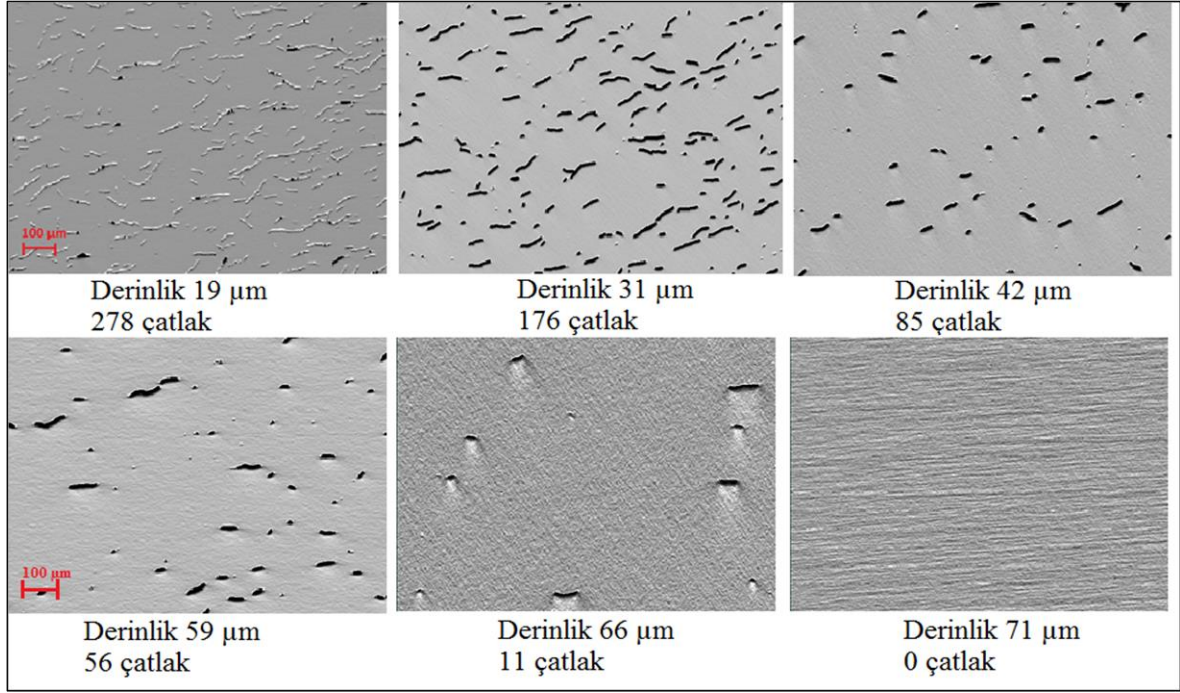
Deneysel prosedür detayları bölüm 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.2’de verilen işleme parametrelerinde, işleme sonu oluşan hasarlar Resim 6.1’de verilmiştir.



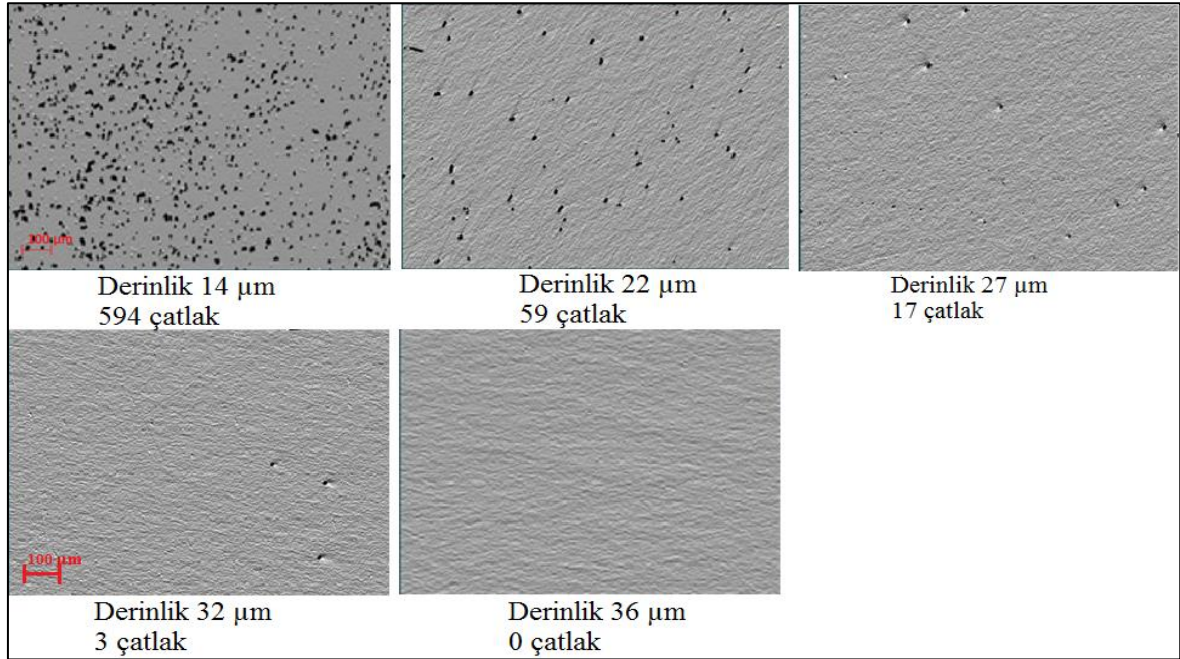
Resim 6.1. (a) D126 (b) D64 (c) D35 taşlama takımları ile işleme sonu oluşan yüzeyaltı hasarları

Resim 6.1’i incelediğimizde, D126 ile taşlama yapıldığında oluşan çatlaklar diğerleriyle kıyaslandığında çok daha ince ve uzundur. Çatlak uzunluğu taşlama takımının parçacık büyüklüğü ile artar [148]. Takım parçacık büyüklüğü inceldikçe yüksek konsantrasyonda küçük çatlaklar meydana gelir. Özellikle kaba taşlama takımının oluşturduğu çatlaklar, çatal tipinde bir çatlağa neden olacak şekilde bitişik bir çatlak oluşturacak kadar uzundur [25]. Bu gibi durumlarda çatlak sayısının sayılması zorlaşır. Ancak daha derin çatlaklarda, manuel gözlem kolaylaşır ve daha doğru saymaya olanak sağlar. Çatlakların uzunluğu ve genişliği D64 ve D35 taşlama takımları için benzerdir, D126’lık takımın oluşturduğu çatlaklara göre daha küçüktürler. İnterferometrik ölçüm görüntüleri, çatlakların her bir taşlama takımı için farklı karakter sergilediğini göstermektedir.

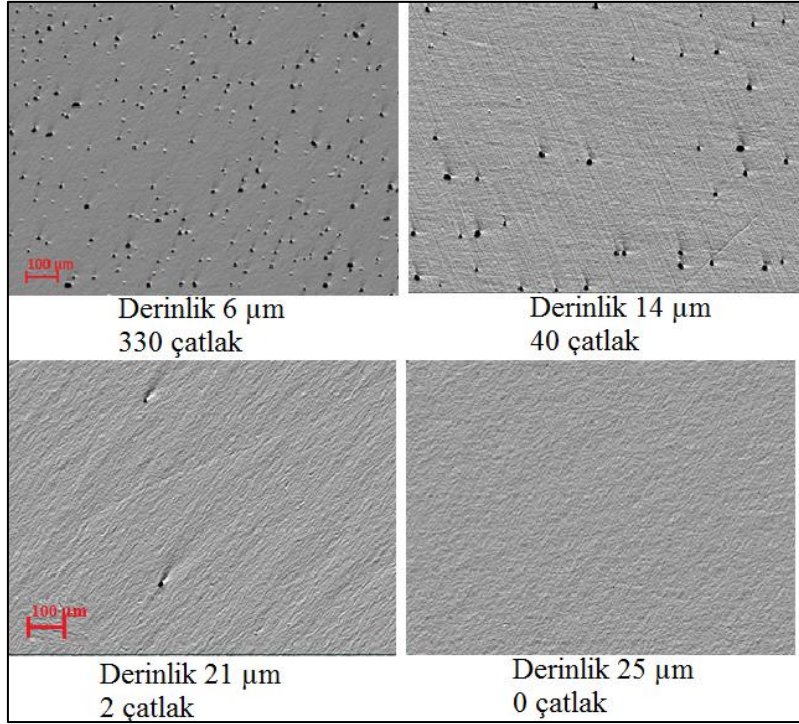
Resim 6.2, Resim 6.3 ve Resim 6.4’te farklı takımlarla işlenen Zerodur® malzemede işleme sonu oluşmuş, yüzeyden farklı derinliklerde, interfeormetrik ölçümle tespit edilen yüzeyaltı hasarları verilmiştir.



Resim 6.2. D126'lük takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar

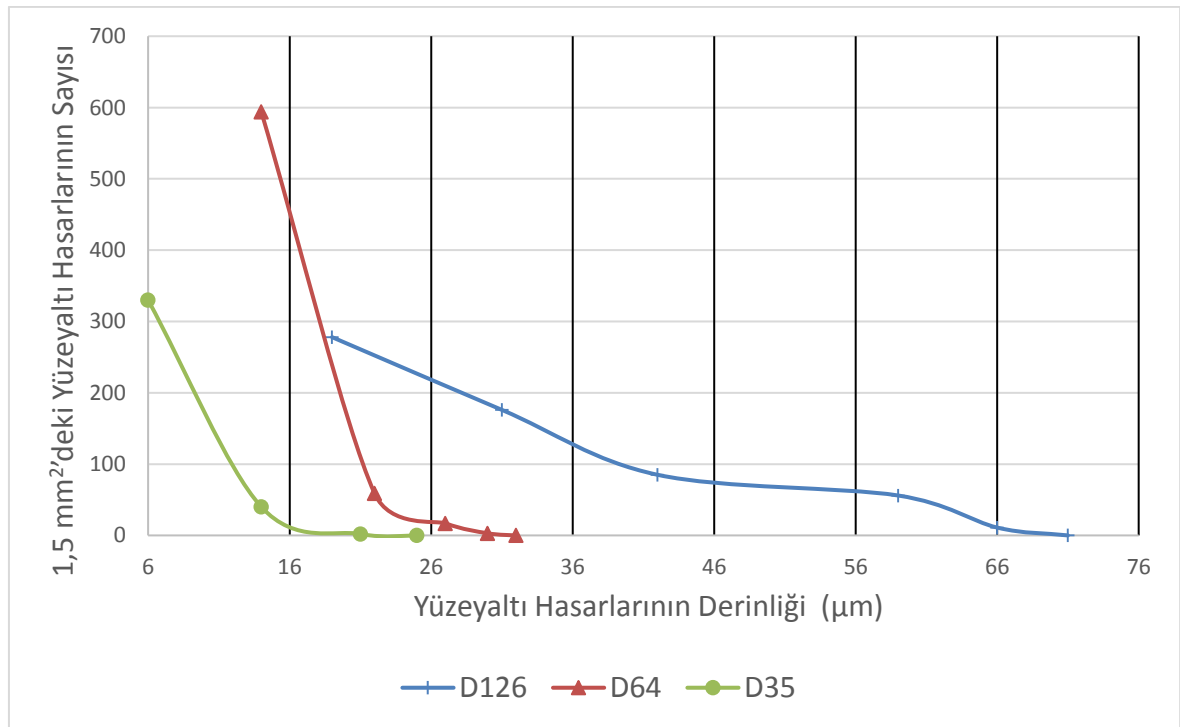


Resim 6.3. D64'lük takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar



Resim 6.4. D35'lik takım ile işleme sonu yüzeyden farklı derinliklerde oluşan hasarlar

Üç takım içinde, Zerodur<sup>®</sup> malzemenin işlenmesi sürecinde yüzeyden derine indikçe yüzeyaltı hasarlarının sayısının değişimi Şekil 6.4'te verilmiştir.



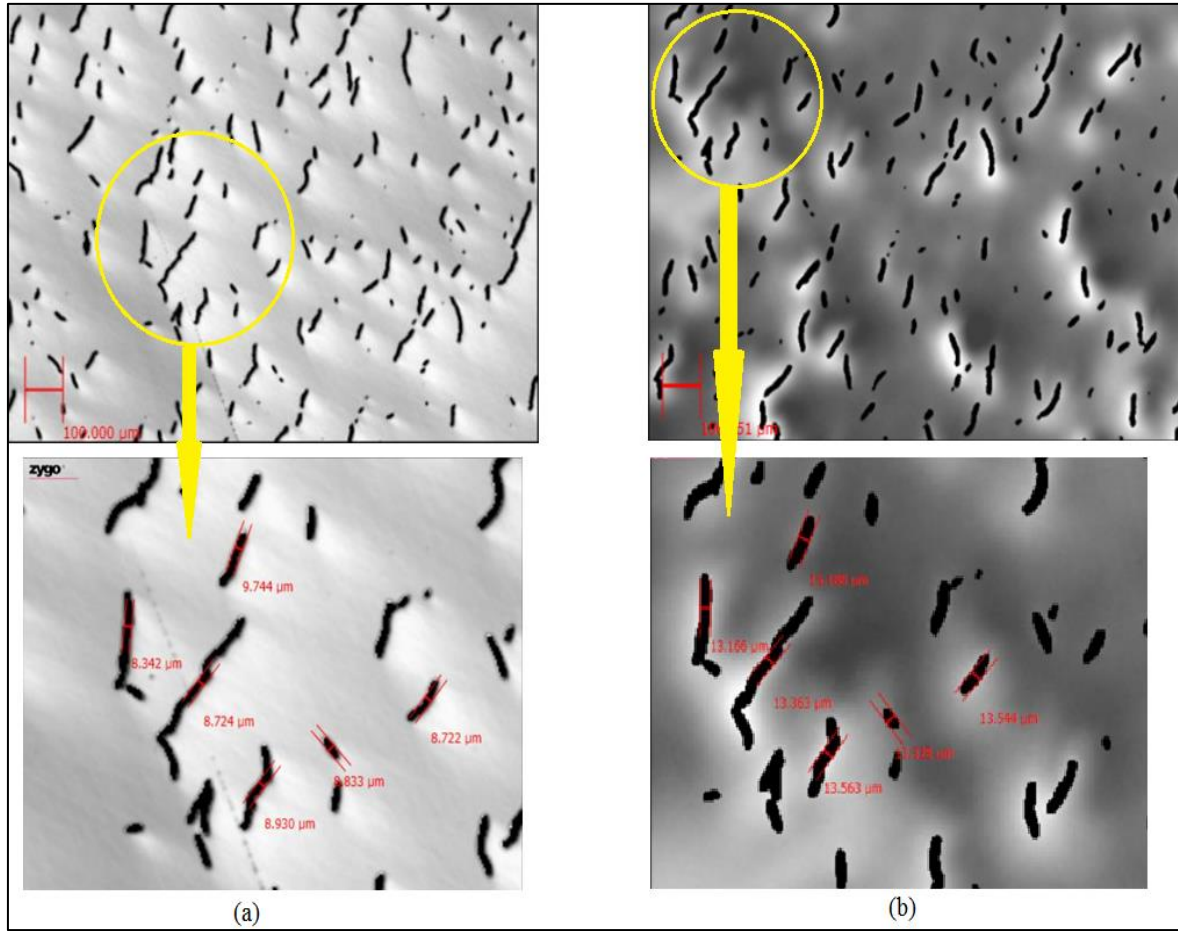
Şekil 6.4. D126, D64 ve D35'lik takımın oluşturduğu yüzeyaltı hasarlarının derinliği

Şekil 6.4'e göre D126, D64 ve D35'lik takımın indüklediği yüzeyaltı hasarlarının derinliği sırasıyla 71, 36 ve 25  $\mu\text{m}$ 'dir. Esmailzare, Rahimi ve Rezaei (2014), benzer bir çalışma yapmıştır. D76'lık takım kullanarak ve işleme parametrelerinden kesme derinliği 250  $\mu\text{m}$ , takım ilerleme hızı 0,04 mm/dk, kesme hızı 5 m/s belirlenerek yapılan taşlama işleminde Zerodur® malzemede yaratılan yüzeyaltı hasarlarının derinliğini 41,8  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. Kullanılan elmas parçacık büyüklüğünün yüzeyaltı hasarlarının derinliğine oranı hem bu çalışmada hem de referans çalışmada 1,8 civarındadır. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur.

Yüzeyaltı hasarları beklendiği ve literatürde bildirildiği gibi elmas parçacık büyüklüğü ile orantılıdır. Elmas parçacık büyüklüğü değiştikçe başlangıç çatlak morfolojisinde değişir ve genel olarak küçük kesici elmas parçacıklara sahip takımlarda doğrusal çatlaklar yerine yumrusal çatlaklar oluşur [148]. Üretim sürecinde malzemenin mekanik dayanımı için 2 faktör önemlidir. Birincisi, mikro çatlakların derinliğini ve yüzey yapısını tanımlayan taşlama takımının parçacık büyüklüğüdür. İkincisi, yeni hasar yaratmadan kaldırılacak malzemenin doğru miktarda olmasıdır [149]. Aynı taşlama sistemini kullanarak, belirlediğimiz işleme parametrelerinde işlenen parçada, bir sonraki üretim sürecinde kaldırmamız gereken en küçük malzeme miktarını belirlenmiştir. Taşlama işlemi kaba taşlamadan başlayıp hassas taşlama yapacak şekilde sıralı yapıldığında, bir takımın yarattığı yüzeyaltı hasarlarının derinliğinden daha büyük olacak şekilde, bir sonraki aşamada asgari malzeme kaldırma oranı belirlenir.

#### Yüzeyaltı hasarlarının asit ile etkileşimi

D126'lık takımın yarattığı yüzeyaltı hasarlarının 60 s'lik kimyasal aşındırma işlemi ile değişimi incelenmiştir. 60 s kimyasal aşındırma işlemi ile 6,5  $\mu\text{m}$  malzeme kaldırılmıştır. Kimyasal işlem literatürde de yer aldığı gibi varolan çatlakları genişleterek daha görünür hale getirmiştir ancak yeni bir çatlak yaratmamıştır. Kimyasal işlemden önceki ve sonraki yüzeyaltı hasarı görüntüsü Resim 6.5'te verilmiştir.



Resim 6.5. (a) Asit işleminden önce (b) asit işleminden sonra varolan yüzeyaltı hasarları

60 s'lik asit işlemi ile çatlakların ne kadar genişlediği 6 adet çatlakların genişliklerindeki değişimin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 6.1'de bu değişim verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kimyasal aşındırma işlemi ile çatlak yapısındaki değişim

| Kimyasal aşındırma işleminden önceki genişlik ( $\mu\text{m}$ ) | Kimyasal aşındırma işleminden sonraki genişlik ( $\mu\text{m}$ ) | Fark (Genişlik) ( $\mu\text{m}$ ) | Ortalama ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 8,342                                                           | 13,166                                                           | 4,824                             | 4,842                      |
| 8,724                                                           | 13,363                                                           | 4,639                             |                            |
| 8,930                                                           | 13,563                                                           | 4,633                             |                            |
| 9,744                                                           | 15,188                                                           | 5,444                             |                            |
| 8,833                                                           | 13,528                                                           | 4,695                             |                            |
| 8,722                                                           | 13,544                                                           | 4,822                             |                            |

60 s kimyasal aşındırma işlemine maruz kalan Zerodur® malzeme de var olan çatlaklar ortalama 4,8 µm genişlemiştir.

## 6.2. Deney Seti 2

Serbest numuneler ve soğuk gömmeli numuneler kendi içinde değerlendirilmiştir. Serbest numunelerde işlenebilirlik parametreleri ve yüzeyaltı hasarları incelenmiştir. Soğuk gömmeli numunelerde farklı işleme parametrelerinin malzeme kaldırma oranı (ağırlık cinsinden) ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir.

### 6.2.1. İşlenebilirlik parametreleri

#### Serbest numuneler

3 numune sırasıyla P120, P220 ve P320 zımpara diskleri ile zımparalanmıştır. Ayrıntılı bilgi bölüm 5.2.3'te verilmiştir. Zımpara ile taşlama işleminden önceki ve sonraki yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.2 ile verilmiştir.

Çizelge 6.2. Serbest numunelerde zımparalama işleminden önce ve sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri

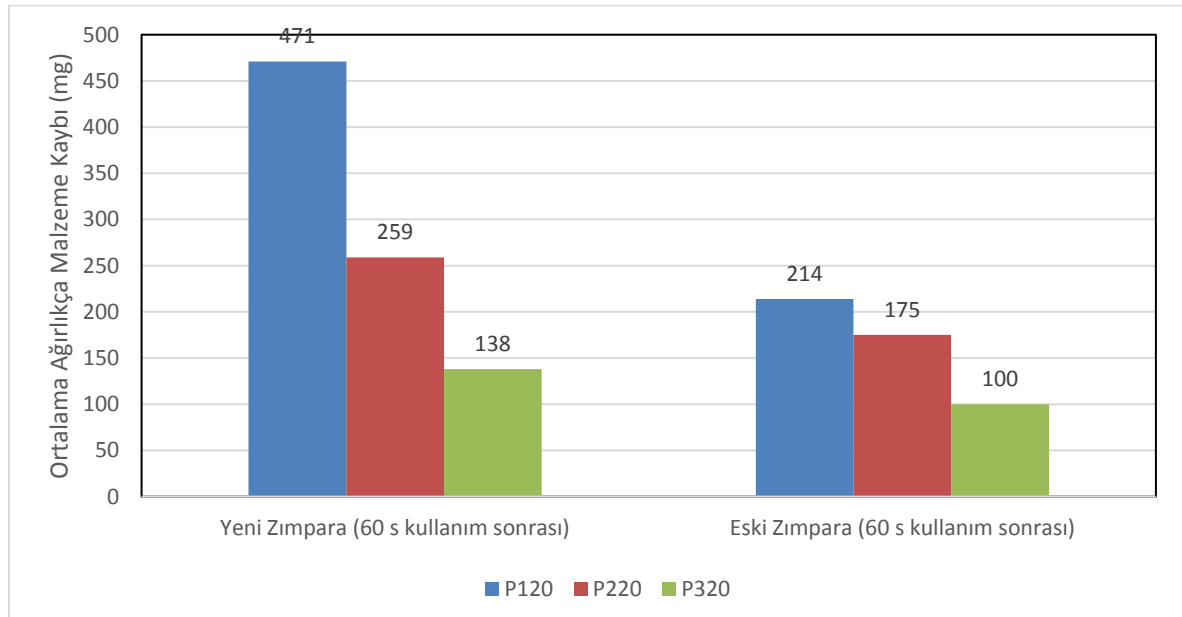
| Numune | Zımpara diski | Başlangıç yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra)<br>(µm) | Manuel zımparalamadan sonraki yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra)<br>(µm) |
|--------|---------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1      | P120          | 0,016                                           | 2,001                                                               |
| 2      | P220          | 0,028                                           | 1,201                                                               |
| 3      | P320          | 0,019                                           | 0,650                                                               |

Çizelge 6.2'e göre, başlangıç yüzey pürüzlülüğü birbirine çok yakın olan 3 numune, farklı parçacık büyüklüğüne sahip aşındırıcı malzemesi silisyum karbür (SiC) zımpara diskleri ile taşlanmıştır. Aşındırıcı SiC tane büyüklüğü doğrudan yüzey pürüzlülüğünü etkiler. SiC parçacık büyüklüğü ne kadar küçük ise o kadar düşük yüzey pürüzlülüğü üretilir. Bu durum hem literatür ile hem de bir önceki deney seti 1 ile uyumludur.

### Soğuk gömmeli numuneler

3 numune sırasıyla P120, P220 ve P320 zımpara diskleri Bölüm 5.2.3'te anlatıldığı gibi işlenmiştir. İşleme parametrelerine göre malzeme kaldırma oranı, numunelerin ağırlığındaki azalma ile tayin edilmiştir. Zımpara disklerinin yeni kullanımında ve ikinci kez kullanımında kaldırdığı malzeme miktarı tayin edilmiştir. Zımpara diskini hiç değiştirmeden P120 zımpara diski ile 20 s aralıklarla, P220 zımpara diski ile 30 s aralıklarla ve P320 zımpara diski ile 40 s aralıklarla kaldırılan malzeme miktarı tayin edilmiştir.

Şekil 6.5'te yeni ve eski P120, P220 ve P320 zımpara disklerinin 60 s kullanımı ile ortalama malzeme kaybı ağırlıkça verilmiştir.

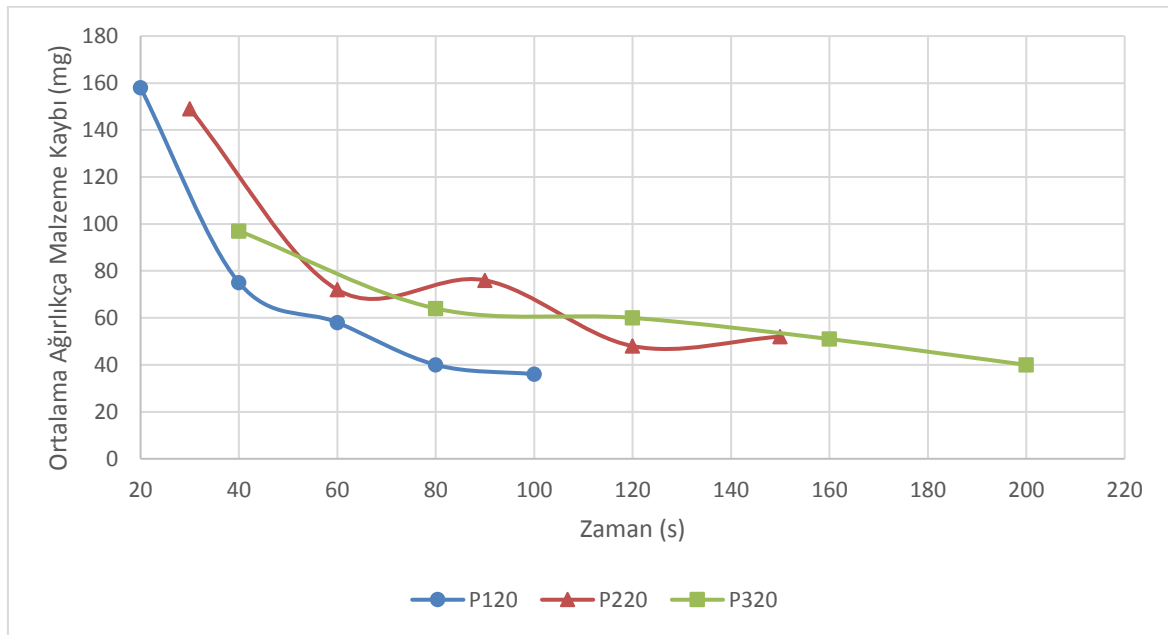


Şekil 6.5. Yeni ve eski P120, P220 ve P320 zımpara disklerinin 60 s kullanımı ile ortalama malzeme kaybı

Aşındırıcı SiC parçacıkların büyüklüğü arttıkça kaldırılan malzeme miktarı da artmaktadır. Diğerlerine göre daha büyük SiC aşındırıcı parçacıklara sahip olan P120 zımpara diski ile kaldırılan malzeme miktarı daha fazladır. Bu sonuç deney seti 1'de elmas aşındırıcı parçacıklarla gerçekleştirilen deneyler ile de uyumludur. Daha büyük elmas aşındırıcı parçacıklara sahip D126 ile yapılan taşlama işleminde daha yüksek kesme derinliğinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Yeni ve eski taşlama disklerinin malzeme kaldırma oranı birbirinden farklıdır. Aşındırıcı parçacıkların reçine matristen ayrılmasından, bağ ile aynı seviyeye gelmesinden, körelmesinden ve kırılmasından kaynaklı ortalama ağırlıkça

malzeme kaybında azalma olmuştur. Her bir zımparalama diskinin aşınma ömrü de birbirinden farklıdır. 60 s’de P120 zımpara diskinin ortalama ağırlıkça malzeme kaldırma oranı %45, P220 zımpara diskinin ortalama ağırlıkça malzeme kaldırma oranı %67, P320 zımpara diskinin ortalama ağırlıkça malzeme kaldırma oranı %72 azalmaktadır. Küçük aşındırıcı SiC parçacıklara sahip P320 zımpara diskinin ömrü daha kısadır.

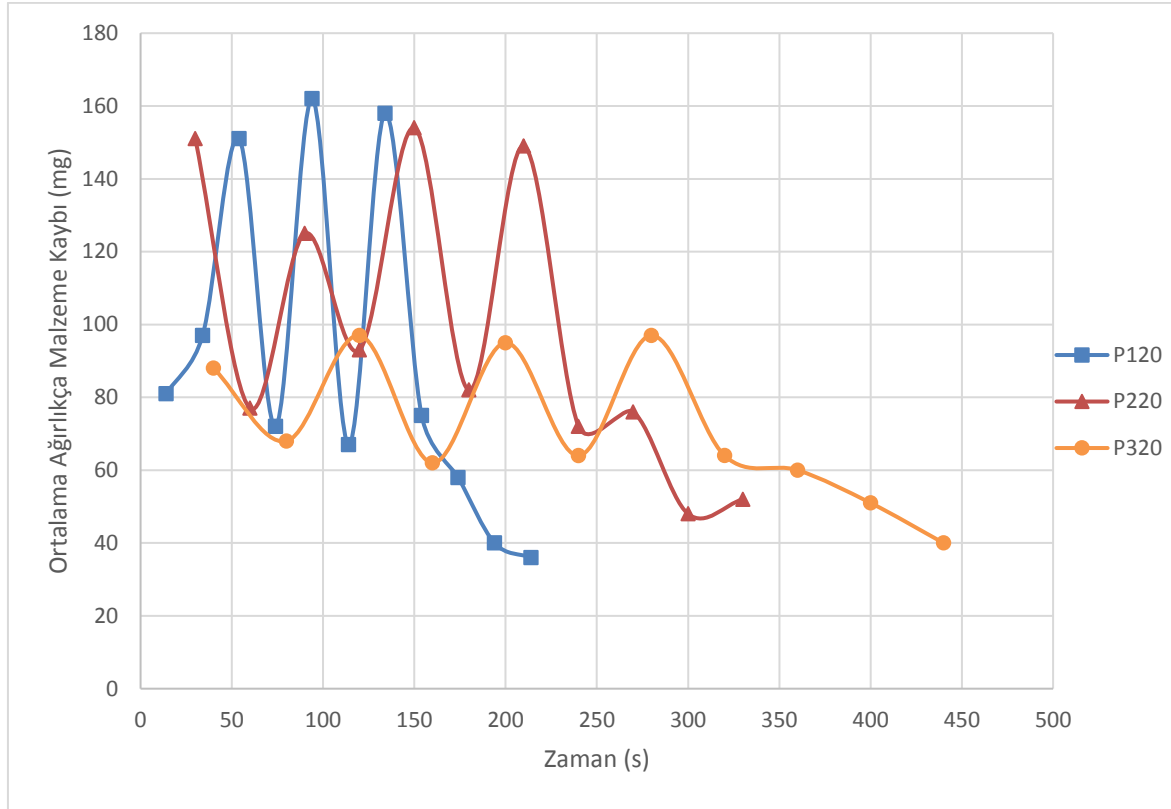
Şekil 6.6’da P120, P220 ve P320 zımpara diski kullanılarak yapılan taşlama işleminde sırasıyla toplam 100 s, 150 s ve 200 s’de ağırlıkça ortalama malzeme kaybı verilmiştir.



Şekil 6.6. P120, P220 ve P320 zımpara diskleri ile ağırlıkça ortalama malzeme kaybı

Şekil 6.6’daki sonuçlara göre, P120 zımparalama diski 100 s’de toplam 367 mg, P220 zımparalama diski 150 s’de toplam 397 mg, P320 zımparalama diski ile 200 s’de toplam 312 mg malzeme kaldırılmıştır. Aşındırıcı SiC parçacıkların boyutu küçüldükçe malzeme kaldırma oranı azalmaktadır. P120 ile 100 s’de kaldırılan malzeme miktarı, P320 ile 200 s’de kaldırılan malzeme miktarından daha fazladır. Aşındırıcı parçacık büyüklüğü malzeme kaldırma oranında belirgin şekilde etkindir. Zımparalama diskinin bağ yapısında ve aşındırıcı parçacıklarında zamanla meydana gelen hasarlardan dolayı, ortalama ağırlıkça malzeme kaybı bütün disklerde de zamanla azalmıştır.

Şekil 6.7’de toplam zımparalama işlemi boyunca farklı disklerin kaldırdığı ortalama ağırlıkça malzeme kaybı verilmiştir.



Şekil 6.7. P120, P220 ve P320 zımparalama diskisi ile işlenen malzemede farklı taşlama süresine göre kaldırılan malzeme miktarı

P120 ile toplam 214 s işlenen ULE® malzemeden toplamda 997 mg, P220 ile toplam 330 s işlenen malzemede toplamda 1079 mg, P320 ile toplam 440 s işlenen malzemede toplamda 786 mg malzeme kaldırılmıştır. Aşındırıcı parçacık boyutu küçüldükçe malzeme kaldırma oranı azalmaktadır bunun için zaman artırılmıştır. Ancak yine de en küçük malzeme kaldırma oranı P320 ile elde edilmiştir. Elde edilen grafiğin sinüsoidal çıkmasının sebebi 7. döngüye kadar her bir zımparalama diskisi ile 2 defa zımparalama işlemi yapılmasıdır. Aynı disk 2. kez kullanıldığında malzeme kaldırma oranı azalmaktadır ve yeni diske geçildiğinde bu oran yeniden artmaktadır. Yeni ve eski zımparalama disklerinin malzeme kaldırma oranı birbirinden farklıdır. 7. döngüden sonra taşlama diskisi hiç değiştirilmemiştir ve diskin malzeme kaldırma oranı bariz bir şekilde azalmıştır. Bütün disklerde aynı eğilim vardır. Ancak P220 diskinde 11. döngüde bir artma yaşanmıştır, bunun sebebi malzeme disk üzerinde yıpranmamış parçacıklar ile kesilmiştir.

Bu zımparalama işlemi ile 3 soğuk gömmeli numunede elde edilen ve karşılaştırma yapmak için 3 serbest numunede manuel zımparalama işlemi elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Çizelge 6.3 ile verilmiştir.

Çizelge 6.3. Soğuk gömmeli numunelerde zımparalama işleminden sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri

| Numune | Zımpara diski | Otomatik zımparalamadan sonraki yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) ( $\mu\text{m}$ ) | Manuel zımparalamadan sonraki yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | P120          | 0,432                                                                           | 2,001                                                                         |
| 2      | P220          | 0,327                                                                           | 1,201                                                                         |
| 3      | P320          | 0,249                                                                           | 0,650                                                                         |

Çizelge 6.3'teki sonuçlara göre, yine aşındırıcı parçacık büyüklüğünün doğrudan yüzey pürüzlülüğünü etkilediği görülüyor. Aşındırıcı parçacık ne kadar büyükse, pürüzlülük değeri o kadar artıyor. Ancak serbest numunelerin manuel zımparalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, zımpara cihazında işlem gören soğuk gömmeli numunelerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerinden ortalama 3,64 kat daha büyüktür. Ayrıca bu fark, P120 kaba zımpara diskinde 4,63'e çıkarken, göreceli olarak daha ince kesici parçacıkara sahip P320 taşlama diskinde 2,61'e inmektedir. Zımparalama şartlarından en kaba takım en çok etkilenir. Manuel zımparalama yönteminin ULE® malzeme yüzeyinde oluşturduğu hasar ve oluşan yüzey pürüzlülüğü değeri otomatik zımpara cihazı ile yapılan zımparalama yöntemine göre çok daha büyüktür.

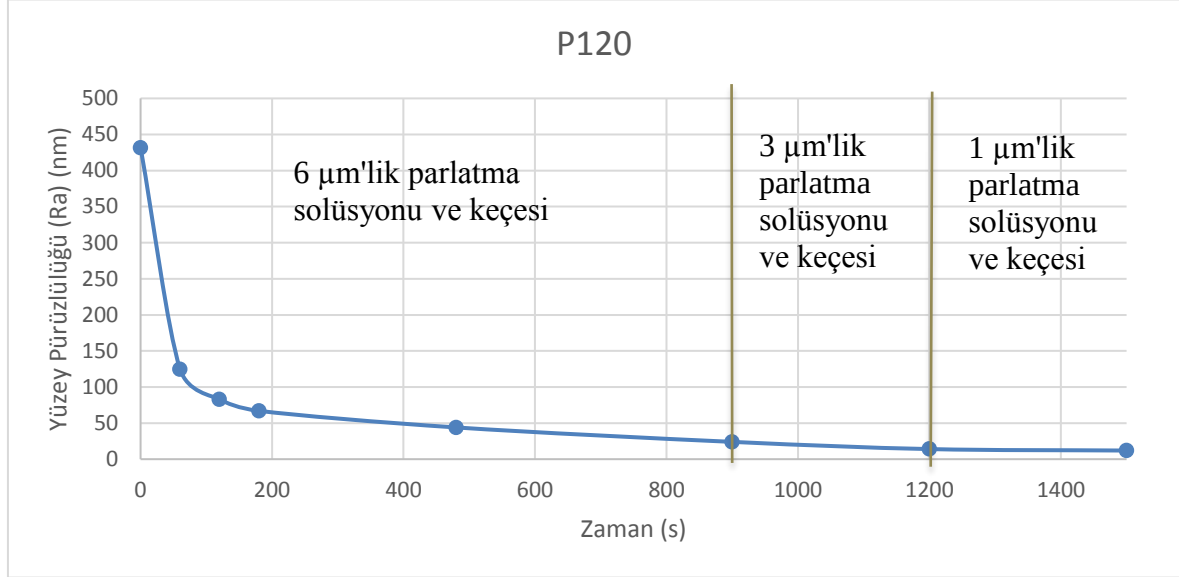
3 adet soğuk gömmeli numune aynı anda belirli sürelerle 6, 3, ve 1  $\mu\text{m}$ 'lik parlatma solüsyonu ve keçesiyle parlatılmış ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 3 numunenin parlatma işleminden önceki yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 0,432, 0,327 ve 0,249  $\mu\text{m}$ 'dir. Çizelge 6.4'te parlatma süresi, parlatma solüsyonu ve keçesine bağlı olarak 3 numunenin yüzey pürüzlülüğündeki değişim verilmiştir.

Çizelge 6.4. Soğuk gömmeli numunelerde parlatma süresi, parlatma solüsyonu ve parlatma keçesine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri

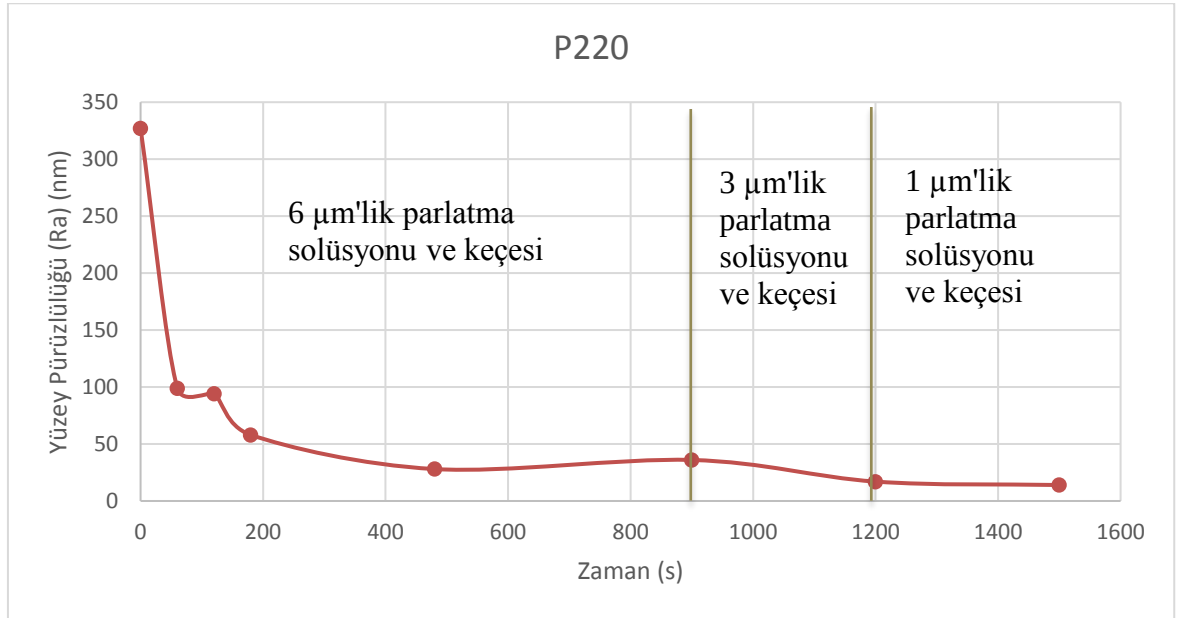
| Parlatma solüsyonu ve keçesi<br>( $\mu\text{m}$ ) | Zaman (s) | Numune | Yüzey pürüzlülüğü değeri<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------------------------------|-----------|--------|-----------------------------------------------|
| 6                                                 | 60        | 1      | 0,125                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,099                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,057                                         |
|                                                   | 60        | 1      | 0,083                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,094                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,050                                         |
|                                                   | 60        | 1      | 0,067                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,058                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,034                                         |
| 6                                                 | 300       | 1      | 0,044                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,028                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,026                                         |
|                                                   | 420       | 1      | 0,024                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,036                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,014                                         |
| 3                                                 | 300       | 1      | 0,014                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,017                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,014                                         |
| 1                                                 | 300       | 1      | 0,012                                         |
|                                                   |           | 2      | 0,014                                         |
|                                                   |           | 3      | 0,014                                         |

Farklı zımparalama diskleri ile zımparalanan yüzeyler aynı şartlar altında parlatıldığında ilk etapta elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri yine aşındırıcı parçacık büyüklüğüyle orantılı olarak değişmektedir. Her bir numune aynı işleme tabii tutulsa bile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin zamanla değişimi birbirinden farklıdır. 6  $\mu\text{m}$ 'lik parlatma solüsyonu ve keçesiyle daha kaba parlatma yapılırken, göreceli olarak daha hassas parlatma için 3 ve 1  $\mu\text{m}$ 'lik parlatma solüsyonu ve keçesi tercih edilir. P120, P220 ve P320 zımpara diskleri ile

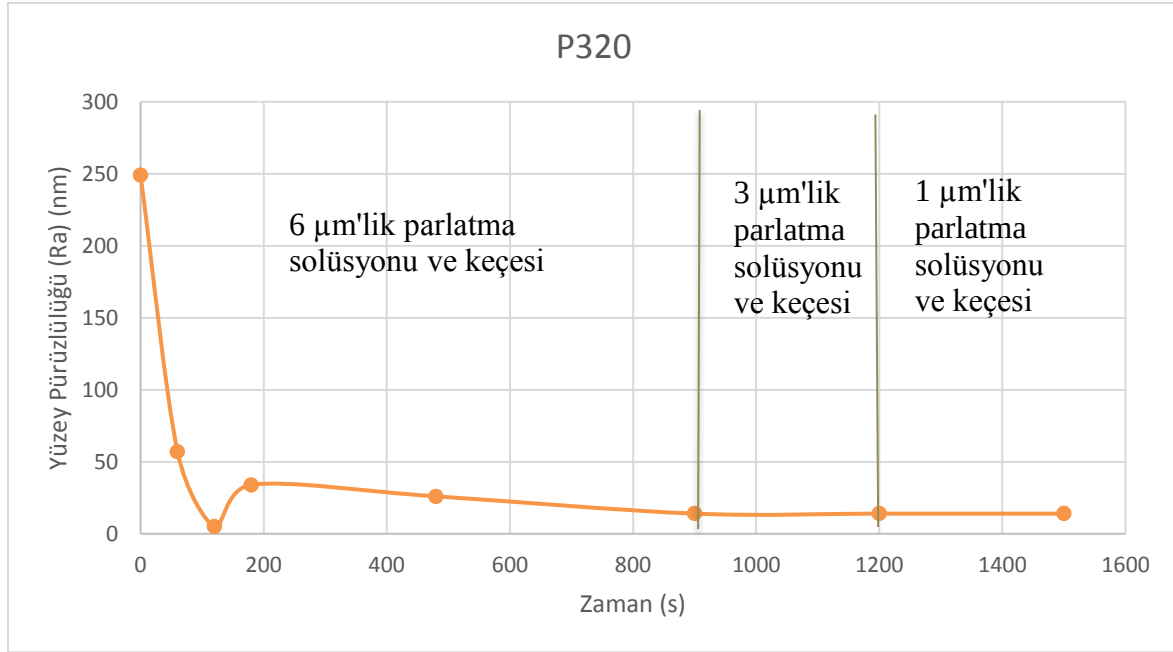
zımparalanan numunelerin zamana karşı yüzey pürüzlülüğünün değişimi sırasıyla Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.8. P120 zımpara diski ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi



Şekil 6.9. P220 zımpara diski ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi



Şekil 6.10. P320 zımpara diskli ile zımparalanan numune parlatılırken yüzey pürüzlülüğünün zamana göre değişimi

Çizelge 6.4 ve Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10’da görüldüğü gibi, başlangıç yüzey pürüzlülüğü çok farklı olan ve farklı koşullarda taşlanan numuneler aynı şartlar altında parlatılmaya başlandığında ilk 100 s içinde yüzey kalitelerinde önemli miktarda iyileşme elde edilmiştir.

Her bir numunede işlem sonunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri birbirine çok yakındır. Ancak bu yüzey pürüzlülüğü değerini elde etme süreleri ve kullanılan parlatma solüsyonu ve keçeleri farklıdır.

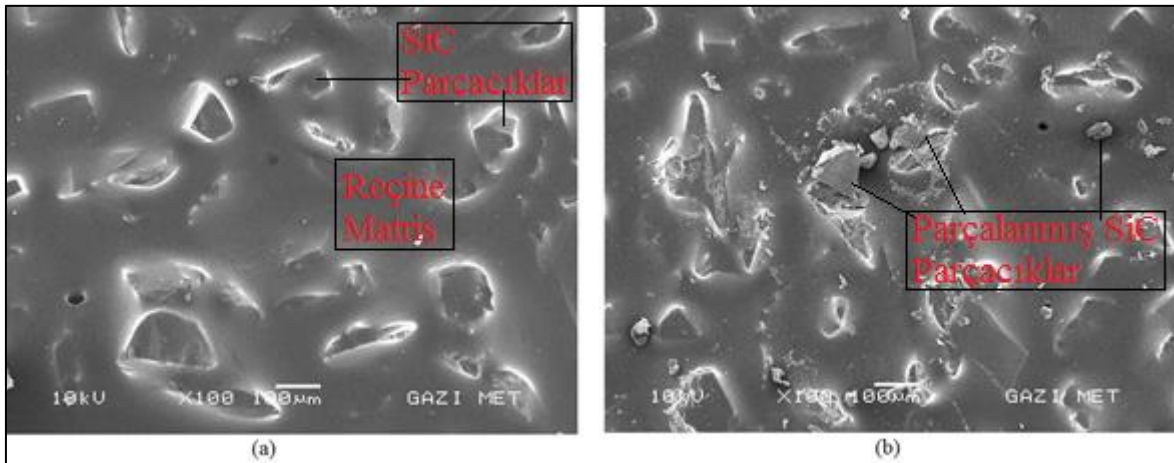
Şekil 6.10’da görüldüğü gibi, P320 disk ile zımparalanan numunede 14 nm’lik yüzey pürüzlülüğü değeri, 6 µm’lik parlatma solüsyonu ve keçesiyle 900 saniyede elde edilmiştir. Ancak Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da sırasıyla P120 ve P220 diskler ile zımparalanan numuneler için verilen grafiklerden görüldüğü gibi benzer yüzey pürüzlülüğü değerine 3 ve 1 µm’lik parlatma solüsyonu ve keçesi de kullanılarak 1500 s’de ulaşılır. P120, P220 ve P320 zımpara diskleri ile zımparalanan numunelerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri sırasıyla 12, 14 ve 14 nm’dir. Chen (2014), 400 mm kare formlu ULE® malzemede, seryum oksit içerikli parlatma sıvısı kullanarak, robotik kollu parlatma sistemi ile 20 saatlik bir işlem süreciyle 6 nm’den daha iyi yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri elde etmiştir. Elde ettiğimiz

yüzey pürüzlülüğü değeri iyi bir seviyedir ancak bu değeri elde etme süresi iş parçasının boyutu ile artar.

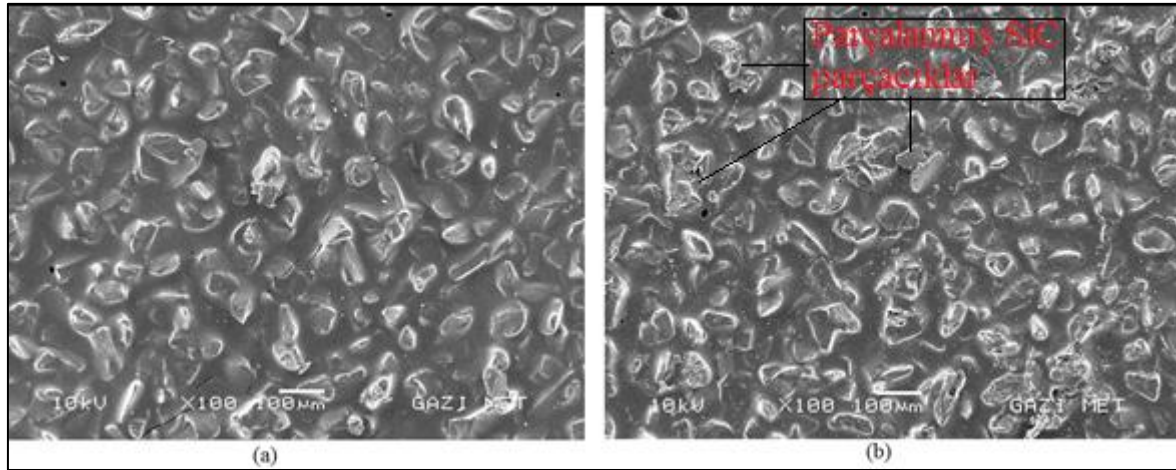
İşlem vaktini ve gideri en aza indirmek için, zımparalama işlemi kaba zımparalamadan başlayıp hassas zımparalama yapacak şekilde sıralı yapılmalıdır, bir takımın yarattığı yüzeyaltı hasarlarının derinliğinden daha büyük olacak şekilde, bir sonraki aşamada asgari malzeme kaldırma oranı belirlenir, en hassas zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi yapılmalıdır. Şekil 6.10'da da görüldüğü gibi, en düşük yüzey pürüzlülüğüne en hızlı şekilde, en hassas zımparalama işlemi yapılan örnekte ulaşılmıştır. Ancak, üç numunede de son durumda elde edilen yüzey pürüzlülük değeri Şekil 6.8'de, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da görüldüğü gibi aynıdır.

### 6.2.2. Yüzey görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu ile hem zımparalama diski olarak kullanılan P120 ve P320'lik diskler hem de P120 ve P220 diskleri ile zımparalanan serbest numunelerin yüzeyleri görüntülenmiştir. Resim 6.6'da P120 ve Resim 6.7'de P320 disklerine ait zımparalama işleminden önceki ve sonraki SEM görüntüsü verilmiştir.



Resim 6.6. P120 zımparalama diskine ait (a) zımparalama işleminden önce (b) zımparalama işleminden sonra alınan yüzey görüntüsü

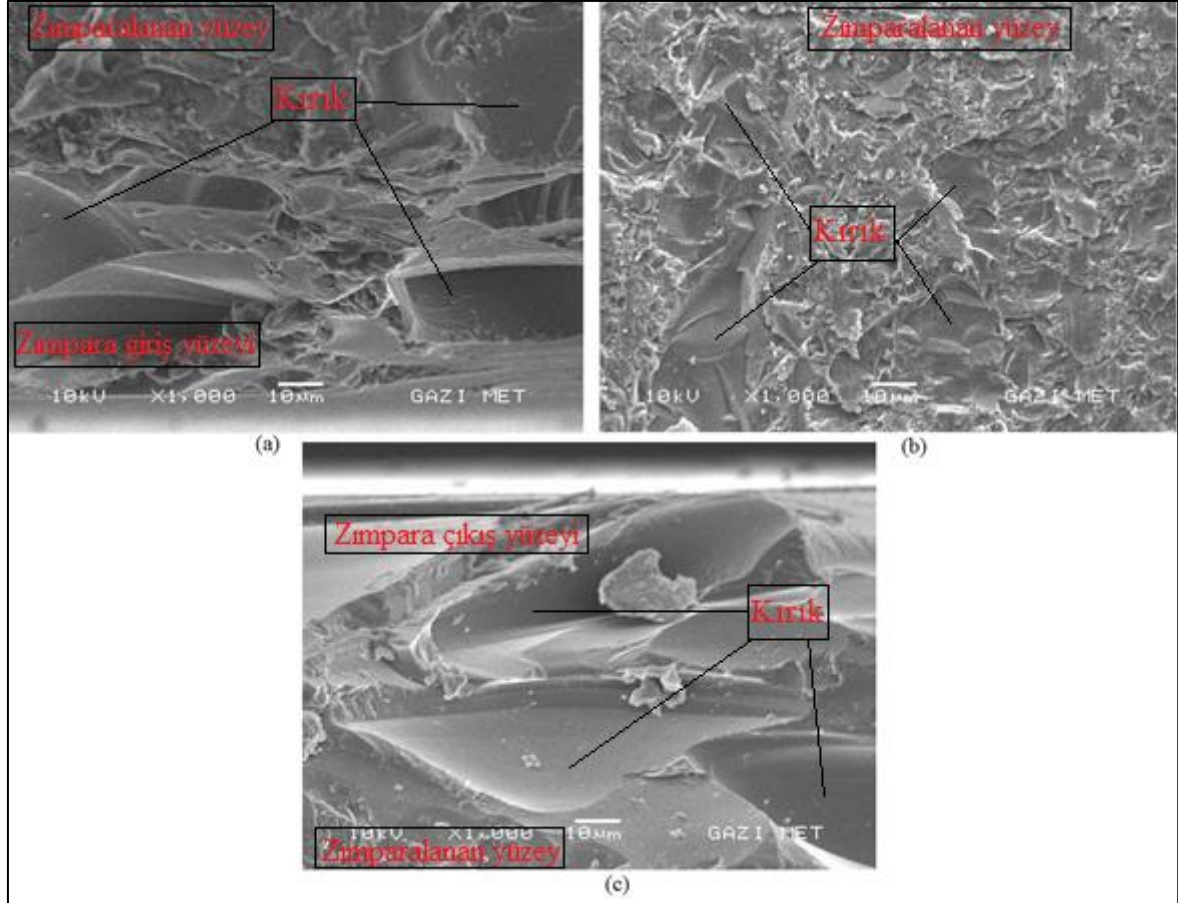


Resim 6.7. P320 zımparalama diskine ait (a) zımparalama işleminden önce (b) zımparalama işleminden sonra alınan yüzey görüntüsü

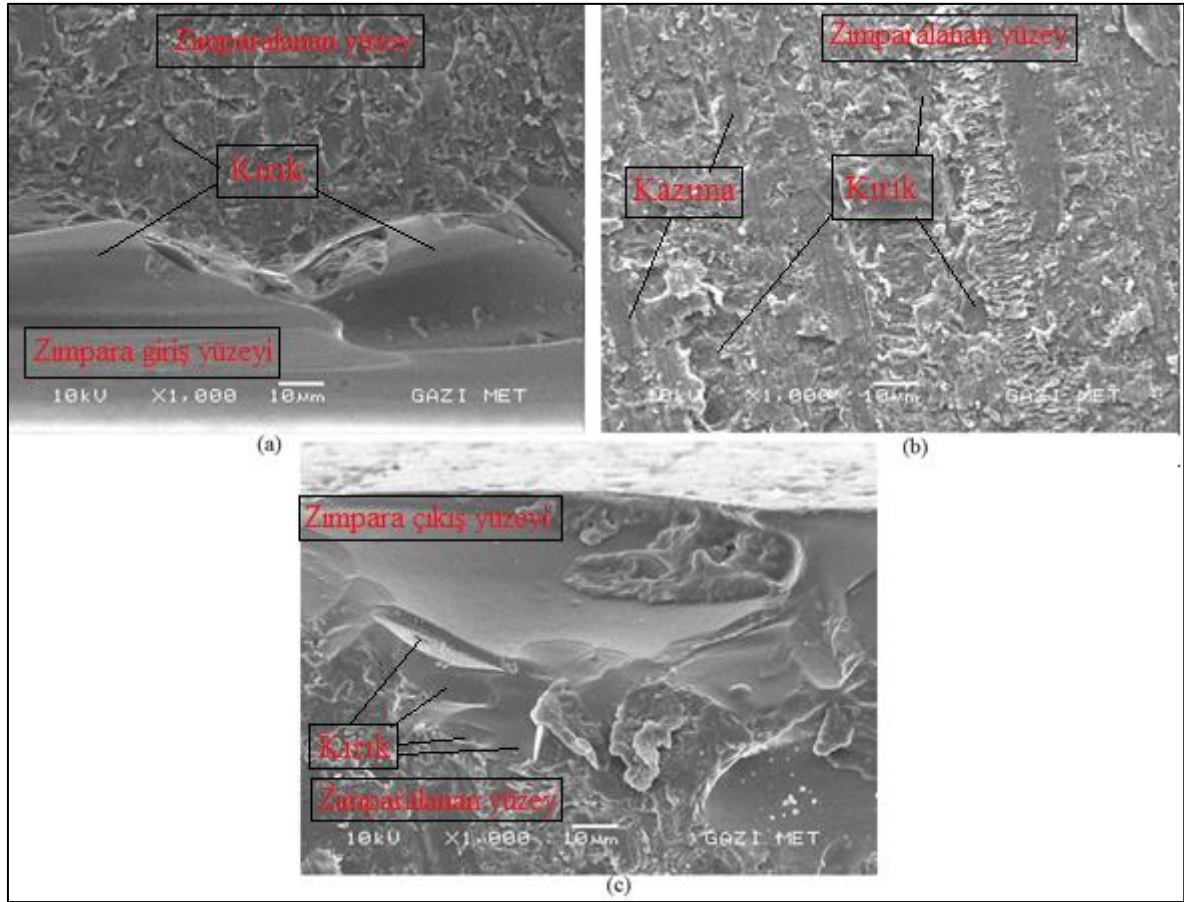
Resim 6.6 ve Resim 6.7 incelendiğinde, zımparalama işlemi boyunca aşındırıcı SiC parçacıkların parçalanarak aşındığı ve matristen koptuğu gözükmemektedir. Bu yüzden taşlama takımını / zımparalama diskini seçerken aşındırıcı parçacıkların işlenecek malzemeden daha sert olmasına dikkat edilmelidir. İşleme işlemi boyunca aşındırıcı parçacıklarda bağ yapısından ayrılma, kopma ya da aşındırıcı parçacıklarda kırılma meydana gelmektedir. Bu durumda işlenen malzemenin yüzeyinde daha fazla hasar yaratmakta ve istenilen oranda malzeme kaldırılamamaktadır. Benzer durumlar elmas taşlama disklerinde de oluşur. Bu yüzden de ya aşındırıcı parçacıkları gömülü olduğu bağ yapısından ortaya çıkarmak için açma işlemleri yapılır ya da yeni taşlama / zımparalama takımına / diskine geçilir.

ULE® malzemenin sertlik değeri  $460 \text{ kg/mm}^2$  [14] iken, aşındırıcı SiC parçacığının sertlik değeri  $2500 \text{ kg/mm}^2$ , elmas aşındırıcı parçacıkların sertlik değeri  $7000 \text{ kg/mm}^2$  dir [151]. Sert bir malzemeyi yine sert aşındırıcı parçacıklar kullanarak işlediğimiz için kırılmalar meydana gelmiştir. Reçine matrise sahip, aşındırıcı SiC aşındırıcı parçacıklardan oluşan zımparalama disklerinde metal bağlı elmas aşındırıcı parçacıklara sahip taşlama takımlarına göre çok çabuk bağdan ayrılma ve kırılma gerçekleşmiş bu yüzden zımparalama işlemi boyunca çok kısa periyotlarda bu diskler değiştirilmiştir. Bu bakımdan, SiC zımparalama diskleri cam seramik malzemelerin zımparalama / taşlama işlemleri için uygun olmadığı söylenebilir. Metal bağlı elmas aşındırıcı parçacıklara sahip takımlar cam seramik malzemelerin işlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır [25].

P120 ve P220 zımpara diskleri ile zımparalanan numunelerin yüzeyi ve zımpara giriş ve çıkış yönü SEM ile görüntülenmiştir. Resim 6.8’de P120 disk ile zımparalanan ULE® malzemenin yüzeyi ve zımpara giriş ve çıkış görüntüsü, Resim 6.9’da P220 disk ile zımparalanan ULE® malzemenin yüzeyi ve zımpara giriş ve çıkış görüntüsü verilmiştir.



Resim 6.8. P120 ile zımparalanan numunede (a) zımpara giriş (b) yüzey (c) zımpara çıkış görüntüsü



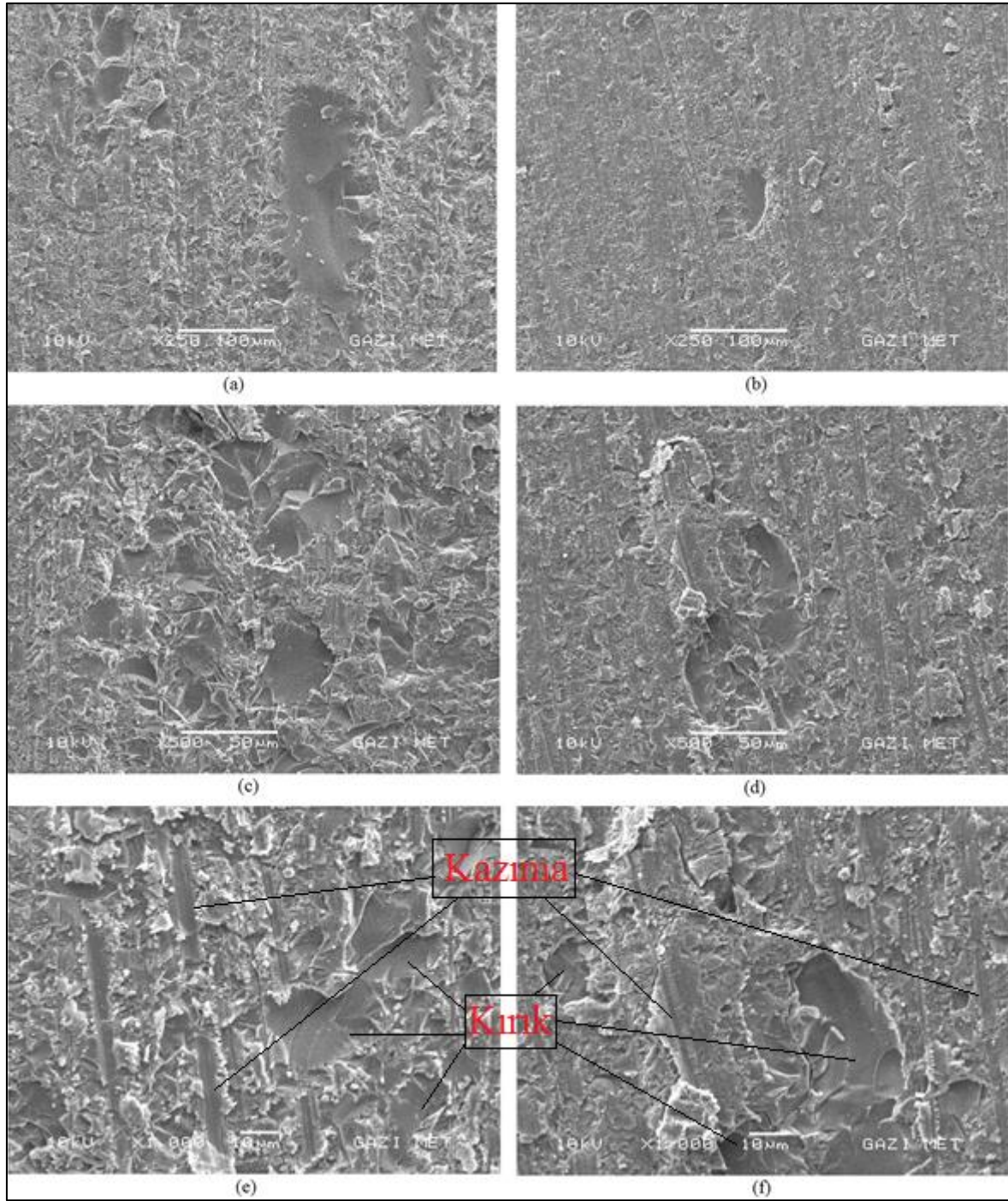
Resim 6.9. P220 ile zımparalanan numune (a) zımpara giriş (b) yüzey (c) zımpara çıkış görüntüsü

Resim 6.8’de ve Resim 6.9’da görüldüğü gibi, zımparalamadan kaynaklı yüzeyde tepe ve çukur noktaları oluşur. Kullanılan diske göre oluşan yüzeyler birbirinden, tepe çukur derinliği açısından farklıdır.

Kırılgan malzeme için iki çeşit malzeme kaldırma mekanizması vardır: sünek malzeme kaldırma modu ve kırılgan malzeme kaldırma modudur [25]. Zımpara giriş ve çıkış bölgelerinde plastik deformasyon gerçekleşmeden, sünek modda olduğu gibi gevrek ve klivaj kırılmalar vardır. Girişte de olmakla birlikte özellikle çıkışta gevrek kırılmalar, klivaj etki daha fazladır. Yüzey oluşumu için gerekli taşlama kuvveti, sünek modda plastik deformasyon ile başlayabileceği gibi plastik deformasyon ve gevrek kırılma karışımı ile de başlayabilir [26]. Özellikle P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntülerine bakıldığında hem klivaj kırılmalar hem de deformasyon etkisi ile oluşan kazıma izleri vardır. Sünek moddan kırılgan moda geçişi kritik ve kesilmemiş talaş kalınlığı belirler. Kritik kesilmemiş talaş kalınlığı malzeme özellikleri ile belirlenir. Kritik, kesilmemiş talaşın

zımpara çıkış yüzeyine doğru artması beklenir. Resim 6.8 ve Resim 6.9 incelendiğinde, zımpara çıkış yönünde atık talaşlar görülmektedir. P120 ile zımparalanan numunede göreceli olarak daha büyük artık talaş oluşmuştur. Çıkışta gevrek kırılma ve klivaj etkisinin daha fazla olmasının sebebi budur. Ancak kritik talaş kalınlığından sonra oluşan, yüzeyin altında hasar oluşmasına sebep olan kesilmemiş talaş kalınlığı işleme parametreleri ile belirlenen, değişken bir değerdir. Kırılgan mod, uygun işleme parametrelerinin tasarlanmasıyla kontrol edilerek yerini sünek moda bırakabilir [26].

Resim 6.10'da P120 ve P220 diskler ile zımparalanan numunelerin farklı büyütmelerdeki farklı noktalardan alınan yüzey görüntüleri verilmiştir.



Resim 6.10. 250X büyütmede alınan (a) P120 ile zımparalanan numunenin (b) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri, 500X büyütmede alınan (c) P120 ile zımparalanan (d) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri, 1000X büyütmede alınan (e) P120 ile zımparalanan (f) P220 ile zımparalanan numunenin yüzey görüntüleri

Resim 6.10'da verilen farklı zımpara diskleri ile zımparalanan yüzeylerin farklı büyütmelerdeki görüntülerine bakıldığında, P120 ile zımparalanan yüzeyde pürüzlülüğü artıracak tepe ve çukur profili daha fazladır. P120 ile zımparalanan numune de P220 ile

zımparalanan numuneye kıyasla kırıklar daha fazla ve daha büyüktür. Sünek modda oluşan kazıma izlerinin genişlikleri P120 daha fazladır ve daha belirgin kazıma izlerine sahiptir. Bunun sebebi kesici parçacıkların P120’de daha büyük olmasıdır. Bunların parlatma operasyonu ile giderilmesi daha zordur. Sünek mod daha az hasar yaratırken, kırılğan modda daha fazla kırıklar oluşur [28, 29]. Resim 6.10’da görüldüğü gibi, yüzeyde oluşan kırık izlerinin kazıma izlerinden baskın olmasından kaynaklı, ağırlıklı malzeme kaldırma mekanizması kırılğan moddur. Ancak sünek mod malzeme kaldırma mekanizması da görülmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Genleşme katsayısı düşük cam ULE® malzemenin ve cam seramik Zerodur® malzemenin işleme parametreleri ve yüzeyaltı hasarları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır;

1. Yüzey pürüzlülüğü taşlama işlemi parametrelerine doğrudan bağlıdır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü, en büyük elmas kesici parçacıklara sahip taşlama takımında elde edilmiştir. Takım ilerleme hızı arttıkça elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri artar.
2. İdeal kesme derinliği her bir takım için ayrı ayrı tanımlanır. Kesici elmas parçacıkların büyüklüğü arttıkça kesme derinliği elmas parçacıkların boyutuyla orantılı olarak artırılmalıdır.
3. Farklı malzemelerin işlenebilirlikleri farklı olmasından dolayı, iki malzeme aynı parametrelerle işlense bile farklı yüzey pürüzlülüğü elde edilir.
4. Yüzeyaltı hasarlarının morfolojisi ve derinliği elmas parçacık büyüklüğü ile değişir. Çatlak uzunluğu taşlama takımının kesici parçacık büyüklüğü ile artar. Takım kesici parçacık büyüklüğü küçüldükçe yüksek konsantrasyonlu küçük çatlaklar meydana gelir.
5. Küçük kesici parçacıklara sahip zımpara diskinin ömrü daha kısadır.
6. Manuel zımparalama yönteminin ULE® malzeme yüzeyinde oluşturduğu hasar ve oluşan yüzey pürüzlülüğü değeri otomatik zımpara cihazı ile yapılan zımparalama yöntemine göre daha büyüktür.
7. Başlangıç yüzey pürüzlülüğü çok farklı olan ve farklı koşullarda taşlanan numuneler aynı şartlar altında parlatılmaya elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri birbirine çok yakındır. Ancak bu yüzey pürüzlülüğü değerini elde etme süreleri ve kullanılan parlatma solüsyonu ve keçeleri farklıdır.
8. İşleme işlemi boyunca aşındırıcı parçacıklarda bağ yapısından ayrılma, kopma ya da aşındırıcı parçacıklarda kırılma meydana gelmektedir. Bu durum işlenen malzemenin

yüzeyinde daha fazla hasar yaratmakta ve istenilen oranda malzeme kaldırılamamaktadır.

9. SiC kesici parçacıklara sahip zımpara diskleri ile zımparalanan numunelerde hem sünek mod hem kırılğan mod malzeme kaldırma mekanizması gözlenmiştir. Yüzey oluşumu için gerekli taşlama kuvveti, yalnız sünek modda plastik deformasyon ile başlayabileceği gibi plastik deformasyon ve gevrek kırılma karışımı ile de başlayabilir.

Genleşme katsayısı düşük cam ULE® malzemenin ve cam seramik Zerodur® malzemenin işleme parametreleri ve yüzeyaltı hasarları incelenmiş ve elde edilen öneriler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır;

1. Optik üretim sürecinde, mikro çatlakların derinliği ve yüzey yapısını belirleyen takım ve disklerdeki kesici parçacıkların büyüklüğü ve doğru miktarda malzemenin kimyasal aşındırma ve parlatma işlemleri ile yüzeyden ayrılması olmak üzere 2 faktöre dikkat edilmelidir.
2. İşlem sürecini ve gideri en aza indirmek için, taşlama / zımparalama işlemi büyük kesici parçacıklara sahip takım / disk ile başlayıp küçük kesici parçacıklara sahip takım / disk ile bitirilmelidir.
3. Bir takımın yarattığı yüzeyaltı hasarlarının derinliğinden daha büyük olacak şekilde, bir sonraki aşamada asgari malzeme kaldırma oranı belirlenmelidir. En hassas taşlama / zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Meiling, H., Banine, V., Kuerz, P. and Harned, N. (2004). Progress in the ASML EUV Program. *Proceedings of the SPIE*, 5374, 31–42.
2. Guoyan S., Lingling Z., Qingliang Z., Limin G. (2018). Improved Force Prediction Model for Grinding Zerodur based on the comprehensive material removal mechanism. *Applied Optics*, 57 (14).
3. Hill, J. M. and Salinari, P. (1998). The Large Binocular Telescope project. *Proceedings of the SPIE*, 3352, 23–33.
4. İnternet: History of Large Binocular Telescope Observatory. URL: <http://www.lbto.org/history.html>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
5. Löfken, J. O. (2008), Pushing the limits with Extreme Ultraviolet Light, *Innovation*, 20, 30–33.
6. Campbell, J. H., Hawley-Fedder, R. A., Stolz, C. J., Menapace, J. A., Borden, M. R., Whitman, P. K., Yu, J., Runkel, M. J., Riley, M. O., Feit, M. D. and Hackel, R. P. (2004). NIF Optical Materials and Fabrication Technologies: An Overview. *Proceedings of the SPIE*, 5341, 84–101.
7. İnternet: Ring Laser Gyroscope, URL: <http://www.ncsist.org.tw/eng/csisdup/products/product.aspx?productId=189&catalog=21>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
8. İnternet: How many Earth observation satellites are in space in 2018?, <https://www.pixalytics.com/eo-satellites-in-space-2018/>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
9. İnternet: KOMPSAT-3A (Korea Multi-Purpose Satellite-3A) / Arirang-3A, URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/k/kompsat-3a>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
10. İnternet: Cartosat-2B, URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellitemissions/c-missions/cartosat-2b>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
11. İnternet: ZERODUR® has been SCHOTT's material answer for demanding high-tech and astronomy applications for 50 years, URL: <https://www.us.schott.com/advancedoptics/english/news/press.html?NID=com5411>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
12. Hamilton, C. T., Hrdina, K. and Kenney, S. (2004). *CTE in ULE glass*. 2nd International Workshop on EUV Lithography, 1–14.
13. VanBrocklin, R. R., Hobbs, T. W. and Edwards, M. J. (2004). Corning's approach to segment blank manufacturing for an extremely large telescope, *Proceedings of the SPIE*, 5494, 1–8.

14. İnternet: ULE® Corning Code 7972 Ultra Low Expansion Glass. URL: <https://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/D20FD2EA-726443DD-B544-E1CA042B486A.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
15. Shaohui, Y., Hitoshi, O., Yutang, D., Yoshihiro, U., Fengjun, C., Hengning, T. (2009) ELID grinding characteristics of glass-ceramic materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 333-338.
16. İnternet: SCHOTT-ZERODUR-Low-Expansion-Glass. URL: <https://www.sydor.com/wp/content/uploads/SCHOTTZERODURLowExpansionGlass.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
17. İnternet: Lightweight Zerodur Mirror Technology. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a123538.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
18. İnternet: Fracture toughness and crack growth of Zerodur. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900011871.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019
19. İnternet: Schott Zerodur Katalog (July 2011). URL: <https://www.schott.com/d/advancedoptics/f7ae3c110226480890c759d6c8816daf/1.3/schott/zerodur/katalog/july/2011/en.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
20. İnternet: Ultra Low Expansion Glass Ceramics (2013). URL: <https://www.oharacorp.com/pdf/ccz2013nav.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
21. İnternet: Sitall. URL: <https://wikivisually.com/wiki/Sitall>, Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
22. İnternet: URL: <http://www.lzos.ru/en/glass%sitall.htm>. Son Erişim Tarihi: 14.11.2018.
23. Corbett, J., McKeown, P. A., Peggs, G. N. and Whatmore, R. (2000). Nanotechnology: International developments and emerging products. *CIRP annals*, 49(2), 523–545.
24. Stowers, I. F., Komanduri, R. and Baird, E. D. (1998). Review of precision surface generating processes and their potential application to the fabrication of large optical components. *Proceedings of the SPIE*, 966, 62–73.
25. Tonnellier, X. (2009). *Precision grinding for rapid manufacturing of large optics*, PhD Thesis, Cranfield University School of Applied Sciences, 5-61.
26. Guoyan, S., Lingling, Z., Qingliang, Z., Limin, G., (2018). Improved force prediction model for grinding zerodur based on the comprehensive material removal mechanism. *Applied Optics*, 57(14).
27. Bifano, T. G., Dow, T. A. and Scattergood, R. O. (1991). Ductile-regime grinding : a new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for Industry*, 113(2), 184–189.

28. Shore, P., Mc Keown, P., Impey, S. and Stephenson, D. (1995). *Surface and near surface conditions of "ductile" mode ground zerodur*. Proceedings of 8th International Precision Engineering Seminar, 365–368.
29. Ball, M. J., Murphy, N. A. and Shore, P. (1991). Electrolytically assisted "ductile" mode diamond grinding of BK7 And SF10 optical glasses. *Proceedings of the SPIE*, 1573, 30–38.
30. Inasaki, I. (1987). Grinding of hard and brittle materials. *CIRP annals*, 36(2), 463–471.
31. Lawn, B. R. and Wilshaw, T. R. (1975). *Fracture of brittle solids*, UK: Cambridge University Press, 15-70.
32. Parks, R. E., Lam, P. and Kuhn, W. (1985). The large optical generator - a progress report, *Proceedings of the SPIE*, 542, 28.
33. Leadbeater, P. B., Clarke, M., Wills-Moren, W. J. and Wilson, T. J. (1989). A unique machine for grinding large off-axis optical components: The OAGM 2500. *Precision Engineering*, 11(4), 191–196.
34. Shore, P. and Walker, D. (2004). Manufacture of segments for extremely large telescopes: a new perspective. *Proceedings of SPIE*, 5382, 277-284.
35. Paul, S., Philip, P. B. (2004). Manufacture of large mirrors for ELTs: a fresh perspective. *Proceedings of SPIE*, 5252, 55-62.
36. Tonnellier, X., Shore, P., Morantz, P., and Orton, D. (2016). Surface quality of a 1 m Zerodur® part using an effective grinding mode. *Proceedings of SPIE*, 7102, 1-9.
37. Hocken, R., Simpson, J., Borchardt, B., Lazar, J. and Stein, P. (1977). Three dimensional metrology. *CIRP annals*, 26(1), 403–408.
38. Bryan, J. (1979). Design and construction of an 84 inches diamond turning machine, *Precision Engineering*, 1(1), 13–17.
39. Eman, K. F., Wu, B. T. and DeVries, M. F. (1987). A generalized geometric error model for multi-axis machines. *CIRP annals*, 36(1), 253–256.
40. Belforte, G., Bona, G., Canuto, E., Donati, F., Ferraris, F., Gorini, I., Morei, S., Peisino, M. and Sartori, S. (1987). Coordinate measuring machines and machine tools selfcalibration and error correction. *CIRP annals*, 36(1), 359–364.
41. Hale, L. C. (1999). *Principles and techniques for design of precision machines*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 3-80.
42. Thompson, D. C. and McKeown, P. A. (1989), The design of an ultra-precision CNC measuring machine, *CIRP annals*, 38(1), 501–504.

43. Ramesh, R., Mannan, M. A. and Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools - a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent error. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40(9), 1235–1256.
44. Bryan, J. B. (1984). *The power of deterministic thinking in machine tool accuracy*. First International Machine Tool Engineers Conference, Tokyo, Japan, 1–16.
45. Slocum, A. (1992). *Precision machine design*. New Jersey: Prentice Hall,, 15-100.
46. Ferreira, P., Liu, C. R. and Merchant, E. (1986), A contribution to the analysis and compensation of the geometric error of a machining center. *CIRP annals*, 35(1), 259–262.
47. Sartori, S. and Zhang, G. X. (1995). Geometric error measurement and compensation of machines. *CIRP annals*, 44(2), 599–610.
48. Franse, J., Roblee, W. and Modemann, K. (1991). Dynamic characteristics of the Lawrence Livermore National Laboratory Precision Engineering Research Lathe. *Precision Engineering*, 13(3), 196–202.
49. Schultschik, R. (1981). Possibilities and limits of error feedback in automatic machining. *CIRP annals*, 30(1), 467–471.
50. Bryan, J. (1990). International status of thermal error research. *CIRP annals*, 39(1), 645–656.
51. Weck, M., McKeown, P., Bonse, R. and Herbst, U. (1995). Reduction and compensation of thermal errors in machine tools. *CIRP annals*, 44(2), 589–598.
52. Saito, T. T., Wasley, R. J., Stowers, I. F., Donaldson, R. R. and Thompson, D. C. (1994). *Precision and manufacturing at the Lawrence Livermore National Laboratory*. NASA, Washington, Technology 2003: The Fourth National Technology Transfer Conference and Exposition, 1, 81–89.
53. Schellekens, P., Rosielle, N., Vermeulen, H., Vermeulen, M., Wetzels, S. and Pril, W. (1998). Design for precision: Current status and trends. *CIRP annals*, 47(2), 557–586.
54. Namba, Y., Wada, R., Unno, K., Tsuboi, A. and Okamura, K. (1989). Ultra-precision surface grinder having a glass-ceramic spindle of zero-thermal expansion. *CIRP annals*, 38(1), 331–334.
55. Wills Moren, W. J., Carlisle, K., McKeown, P. A. and Shore, P. (1990). Ductile regime grinding of glass and other brittle materials by the use of ultra-stiff machine tools. *Proceedings of the SPIE*, 1333, 126–135.
56. Wills-Moren, W. J., Modjarrad, H., Read, R. F. J. and McKeown, P. A. (1982). Some aspects of the design and development of a large high precision CNC diamond turning. *CIRP annals*, 31(1), 409–414.

57. Shore, P. (1995). *Machining of optical surfaces in brittle materials using an ultra-precision machine tool*, PhD thesis, Cranfield University, 15-55.
58. Nakao, M. and Hatamura, Y. (1996). Development of an intelligent face grinding machine to fabricate ultraflat surfaces on thin, brittle substrates. *CIRP annals*, 45(1), 397-400.
59. Corbett, J., Morantz, P., Stephenson, D. J. and Read, R. F. (2002). An advanced ultraprecision face grinding machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 639-648.
60. McKeown, P. A. and Morgan, G. H. (1979). Epoxy granite: a structural material for precision machines', *Precision Engineering*, 1(4), 227-229.
61. Yang, F., Zhang, B., Wang, J., Zhu, Z. and Monahan, R. (2001). The effect of grinding machine stiffness on surface integrity of silicon nitride. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123(4), 591-600.
62. Gopal, A. V. and Rao, P. V. (2004). A new chip-thickness model for performance assessment of silicon carbide grinding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(11-12), 816-820.
63. Saini, D. (1990). Wheel hardness and local elastic deflections in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30(4), 637-649.
64. Wager, J. and Saini, D. (1986). Local contact deflections in grinding - Groups of grains and single grains, *CIRP annals*, 35(1), 245-248.
65. Saini, D. and Wager, J. (1985). Local contact deflections and forces in grinding, *CIRP annals*, 34(1), 281-285.
66. Malkin, S. (1968). *The attritious and fracture wear of grinding wheels*, M.Sc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 18-30.
67. Lindsay, R. P. (1983). The effect of wheel wear rate on the grinding performance of three wheel grades, *CIRP annals*, 32(1), 247-249.
68. Malkin, S. (1989). *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. New York: Manufacturing Engineers Press, 45-68.
69. Jackson, M. J. (2004). Fracture dominated wear of sharp abrasive grains and grinding wheels, *Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology*, 218(3), 225-235.
70. Hassui, A., Diniz, A., Oliveira, J., Felipe, J. and Gomes, J. (1998). Experimental evaluation grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *Wear*, 217, 7-14.

71. Fan, K. C., Lee, M. Z. and Mou, J. I. (2002). On-line non-contact system for grinding wheel wear measurement. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 14–22.
72. Furutani, K., Nguyen, T. H., Ohguro, N. and Nakamura, T. (2003). Automatic compensation for grinding wheel wear by pressure based in-process measurement in wet grinding. *Precision Engineering*, 27(1), 9–13.
73. Li, Y., Funkenbusch, P. D., Gracewski, S. M. and Ruckman, J. (2004). Tool wear and profile development in contour grinding of optical components. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(4), 427–438.
74. Wu, S. M. and Ni, J. (1989). Precision machining without precise machinery, *CIRP annals*, 38(1), 533–536.
75. Ramesh, R., Mannan, M. A. and Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools - a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40(9), 1235–1256.
76. Sun, X., Stephenson, D. J., Ohnishi, O. and Baldwin, A. (2006). An investigation into parallel and cross grinding of BK7 glass, *Precision Engineering*, 30(2), 145–153.
77. Yamamoto, Y., Suzuki, H., Moriwaki, T., Okino, T., Hijikata, Y., Roblee, J., and Miyashita, T. Development of cross and parallel mode grinding machine for high NA aspherical mold and die. *Proceedings of ASPE 21st Annual Meeting*, 39(4), 5-7.
78. Bryant, J. (1998). Which diamond grinding wheel?. *Manufacturing Engineering*, 120(3), 3.
79. Galen, E. (2001). Superabrasive grinding: why bond selection matters. *Manufacturing Engineering*, 126(2), 1–5.
80. Webster, J. and Tricard, M. (2004). Innovations in abrasive products for precision grinding. *CIRP annals*, 53(2), 597–617.
81. Zhang, B. and Howes, T. D. (1995). Subsurface evaluation of ground ceramics. *CIRP annals*, 44(1), 263–266.
82. Mayer Jr. J. E. and Fang, G. P. (1994). Effect of grit depth of cut on strength of ground ceramics. *CIRP annals*, 43(1), 309–312.
83. Chen, W. K., Huang, H. and Yin, L. (2005). Loose abrasive truing and dressing of resin bond diamond cup wheels for grinding fibre optic connectors. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(2), 229–239.
84. Derkx, J., Hoogstrate, A., Saurwalt, J. and Karpuschewski, B. (2008). Form crush dressing of diamond grinding wheels. *CIRP annals*, 57(1), 349–352.

85. Chen, X. and Rowe, W. B. (1996). Analysis and simulation of the grinding process. Part I : Generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(8), 871–882.
86. Inasaki, I. (1989). Dressing of resinoid bonded diamond grinding wheels. *CIRP annals*, 38(1), 315–318.
87. Hwang, T. W. and Malkin, S. (1999). Upper bound analysis for specific energy in grinding of ceramics. *Wear*, 231(2), 161–171.
88. Ohmori, H. and Nakagawa, T. (1995). Analysis of mirror surface generation of hard and brittle materials by ELID (electronic in-process dressing) grinding with superfine grain metallic bond wheels. *CIRP annals*, 44(1), 287–290.
89. Itoh, N., Katoh, T. and Ohmori, H. (2004). Eco-friendly ELID grinding using metal-free electro-conductive resinoid bonded wheel. *Jsm International Journal Series C*, 47(1), 72–78.
90. Sazedur Rahman, M., Saleh, T., Lim, H., Son, S. and Rahman, M. (2008). Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(7-8), 887–895.
91. Hosokawa, A., Ueda, T. and Yunoki, T. (2006). Laser dressing of metal bonded diamond wheel. *CIRP annals*, 55(1), 329–332.
92. Jackson, M. J. (2004). Fracture dominated wear of sharp abrasive grains and grinding wheels, *Proceedings of the IMECH E Part J Journal of Engineering Tribology*, 218(3), 225–235.
93. Xie, X. Z., Chen, G. Y. and Li, L. J. (2004). Dressing of resin-bonded superabrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 36, 409–419.
94. Brinksmeier, E., Heinzel, C. and Wittmann, M. (1999). Friction, cooling and lubrication in grinding. *CIRP annals*, 48(2), 581–598.
95. Webster, J. A., Cui, C. and Mindek Jr, R. B. (1995). Grinding fluid application system design. *CIRP annals*, 44(1), 333–338.
96. Marinescu, I. D., Rowe, B.W., Dimitrov, B. and Inasaki, I. (2004). *Tribology of abrasive machining processes*. US: William Andrew Inc, 265–296.
97. Irani, R., Bauer, R. and Warkentin, A. (2005). A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(15), 1696–1705.
98. Xu, H. H. K., Jahanmir, S. and Ives, L. K. (1997). Effect of grinding on strength of tetragonal zirconia and zirconia toughened alumina. *Machining Science and Technology*, 1(1), 49–66.

99. Li, K. and Liao, T.W. (1997). Modelling of ceramic grinding processes Part I. Number of cutting points and grinding forces per grit. *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1-3), 1–10.
100. Agarwal, S. and Venkateswara, R. P. (2008). Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(6), 698–710.
101. Hwang, T. W., Evans, C. J. and Malkin, S. (1999). Size effect for specific energy in grinding of silicon nitride. *Wear*, 225, 862–867.
102. Huang, H., Yin, L. and Zhou, L. (2003). High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(3), 329–336.
103. Mayer Jr., J. E. and Fang, G. P. (1994). Effect of grit depth of cut on strength of ground ceramics. *CIRP annals*, 43(1), 309–312.
104. Gopal, A. V. and Rao, P. V. (2004). A new chip-thickness model for performance assessment of silicon carbide grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(11-12), 816–820.
105. Klocke, F., Baus, A. and Beck, T. (2000). Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles. *CIRP annals*, 49(1), 241–244.
106. Matsuo, T., Toyoura, S., Oshima, E. and Ohbuchi, Y. (1989). Effect of grain shape on cutting force in superabrasive single-grit tests. *CIRP annals* 38(1), 323–326.
107. Meneghello, R., Concheri, G., Savio, G. and Comelli, D. (2006). Surface and geometry error modeling in brittle mode grinding of ophthalmic lenses moulds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(12-13), 1662–1670.
108. Hed, P. P., Edwards, D. F. and Davis, J. B. (1988). Subsurface damage in optical materials: origin, measurement and removal (summary). *Proceedings of the SPIE*, 50(2), 99 – 125.
109. Zhao, Q., Liang, Y., Stephenson, D. and Corbett, J. (2007). Surface and subsurface integrity in diamond grinding of optical glasses on Tetraform C. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(14), 2091–2097.
110. Mayer Jr., J. E. and Fang, G. P. (1995). Effect of grinding parameters on surface finish of ground ceramics. *CIRP annals*, 44(1), 279–282.
111. Ali, Y. M. and Zhang, L. C. (1999). Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 561 – 568.
112. Agarwal, S. and Venkateswara Rao, P. (2005). A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding. *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 45(6), 609–616.

113. Lodha, G. S., Yamashita, K., Kunieda, H., Tawara, Y., Jin, Y., Namba, Y. and Bennett, J. M. (1998). Effect of surface roughness and subsurface damage on grazing-incidence x-ray scattering and specular reflectance. *Applied Optics*, 37(22), 5239–5252.
114. Cheung, C. F. and Lee, W. B. (2000). Modelling and simulation of surface topography in ultra-Precision Diamond Turning. *Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture*, 214(6), 463–480.
115. Franse, J. (1990). Manufacturing techniques for complex shapes with submicron accuracy. *Reports on Progress in Physics*, 53(8), 1049–1094.
116. Takasu, S., Masuda, M. and Nishiguchi, T. (1985). Influence of study vibration with small amplitude upon surface roughness in diamond machining. *CIRP annals*, 34(1), 463–467.
117. Sata, T., Li, M., Takata, S., Hiraoka, H., Li, C. Q., Xing, X. Z. and Xiao, X. G. (1985). Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications. *CIRP annals*, 34(1), 473–476.
118. Franse, J. (1991). *Aspects of precision grinding*, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 25-80.
119. Heinzl, C., Grimme, D. and Moisan, A. (2006). Modeling of surface generation in contour grinding of optical molds. *CIRP annals*, 55(1), 581–584.
120. Cook, R. F. and Pharr, G. M. (1990). Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(4), 787–817.
121. Argon, A. S. (1959). Distribution of cracks on glass surfaces. *Royal Society of London Proceedings Series, A* 250, 482–492.
122. Li, K. and Liao, T. W. (1996). Surface/subsurface damage and the fracture strength of ground ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 57(3-4), 207–220.
123. Lawn, B. R., Evans, A. G. and Marshall, D. B. (1980). Elastic / plastic indentation damage in ceramics: the median / radial crack system. *Journal of the American Ceramic Society*, 63(9-10), 574–581.
124. Marshall, D. B., Lawn, B. R. and Evans, A. G. (1982). Elastic plastic indentation damage in ceramics the lateral crack system. *Journal of the American Ceramic Society*, 65(11), 561–566.
125. Lawn, B. R. and Evans, A. G. (1977). A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. *Journal of Materials Science*, 12, 2195–2199.
126. Sheng-yi, L., Zhuo, W., Yu-lie, W. (2007). Relationship between subsurface damage and surface roughness of ground optical materials, *Journal of Central South University of Technology*, 14(4), 546-551.

127. Tonnellier, X., Morantz, P., Shore, P., Baldwin, A., Evans, R. and Walker, D.D. (2007). Subsurface damage in precision ground ULE® and Zerodur® surfaces. *Optics Express*, 15(19), 12197-12205.
128. Brinksmeier, E. (1989). State-of-the-art of non-destructive measurement of sub-surface material properties and damages. *Precision Engineering*, 11(4), 211–224.
129. Puttick, K. E., Jeynes, C., Whitmore, L., Rudman, M. R., Yamasaka, M., Shore, P. and Gee, A. E. (1992). Surface damage in nanoground silicon. *Proceeding of IMECH - Tribology in metal cutting and grinding*, 49–51.
130. Pfeiffer, W. and Hollstein, T. (1997). Influence of grinding parameters on strength dominating near-surface characteristics of silicon nitride ceramics. *Journal of the European Society*, 17, 487–494.
131. Lucca, D. A., Brinksmeier, E. and Goch, G. (1998). Progress in assessing surface and subsurface integrity. *CIRP annals*, 47(2), 669–693.
132. Goch, G., Schmitz, B., Karpuschewski, B., Geerkens, J., Reigl, M., Sprongl, P. and Ritter, R. (1999). Review of non-destructive measuring methods for the assessment of surface integrity: a survey of new measuring methods for coatings, layered structures and processed surfaces. *Precision Engineering*, 23(1), 9–33.
133. Guss, G. M., Bass, I. L., Hackel, R. P., Mailhiot, C. and Demos, S. G. (2008). In situ monitoring of surface postprocessing in large aperture fused silica optics with optical coherence tomography. *Applied optics*, 47(25), 4569–4573.
134. Wuttig, A., Steinert, J., Duparre, A. and Truckenbrodt, H. (1999). Surface roughness and subsurface damage characterization of fused silica substrates. *Proceedings of the SPIE*, 3739, 369–376.
135. Menapace, J. A., Davis, P. J., Steele, W. A., Wong, L. L., Suratwala, T. I. and Miller, P. E. (2005a). Utilization of magnetorheological finishing as a diagnostic tool for investigating the three-dimensional structure of fractures in fused silica, *Proceedings of the SPIE*, 5991(02), 1–13.
136. Menapace, J. A., Davis, P. J., Steele, W. A., Wong, L. L., Suratwala, T. I. and Miller, P. E. (2005b). MRF applications : measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique. *Proceedings of the SPIE*, 5991, 5991(03), 1–11.
137. Suratwala, T., Wong, L., Miller, P., Feit, M. D., Menapace, J., Steele, R., Davis, P. and Walmer, D. (2006). Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 5601–5617.
138. Tonnellier, X., Morantz, P., Shore, P., Baldwin, A., Evans, R. and Walker, D. (2007). Subsurface damage in precision ground ULE and Zerodur surfaces. *Optics Express*, 15(19), 12197–12205.

139. Wong, L., Suratwala, T., Feit, M. D., Miller, P. E., Steele, R. (2009). The effect of HF/NH<sub>4</sub>F etching on the morphology of surface fractures on fused silica. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355, 797–810.
140. Zhao, Q., Wang, B., Dong, S., Stephenson, D. and Corbett, J. (2006). Subsurface damage mechanisms in diamond grinding of BK7 on Tetraform C, *Proceedings of the SPIE*, 6149, 61490L.
141. Zhao, Q., Guo, B., (2015). Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse grained diamond wheels, Part2: Investigation of profile and surface grinding. *Precision Engineering*, 39, 67–78.
142. Eric, P., James, G., Wyant, C. (2006). *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. USA: Spie Press, 7-98.
143. İnternet: White Light Interferometry. URL: <https://www.nanoscience.com/techniques/optical/profilometry/white/light/interferometry/> Son Erişim Tarihi: 25.06.2019.
144. Demircioğlu, P. (2011). Talaşlı imalat yöntemiyle imal edilen iş parçalarında yüzey pürüzlülüğünün yüksek hassasiyette iğne uçlu ve 3D optic ölçüm sistemleriyle değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 52, 613.
145. Bayazıt, G. (2016). *Bor Tabanlı Malzemelerin Sentezlenmesi ve Hidrojen Depolama Özelliklerinin İncelenmesi*, M.Sc. Thesis, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 51-52.
146. Döhring, T., Thomas, A., Jedamzik, R., Kohlmann, H., Hartmann, P. (2007). Manufacturing of lightweighted Zerodur® components at SCHOTT. *Proceedings of the SPIE*, 6666(02), 1-9.
147. Esmaeilzare, A., Rahimi, A., Rezaei, S.M. (2014). Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur® glass-ceramic. *Applied Surface Science*, 313, 67-75.
148. İnternet: Lecture 13: Glass Finishing (Grinding & Polishing). URL: <https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture13/Suratwala/GlassFinishing/Lecture/Lehigh.pdf>, Son Erişim Tarihi:12.06.2019.
149. Hartmann, P., Nattermann, K., Döhring, T., Kuhr, M., Thomas, P., Kling, G., Gath, P., Lucarelli, S. (2008). Zerodur® glass ceramics – strength data for the design of structures with high mechanical stresses. *Proceedings of the SPIE*, 7018, 1-3.
150. Chen, S. (2014). *Robotic polishing of large optical components*, MSc Thesis, Cranfield University, School of Applied Sciences.
151. İnternet: Properties of diamond. URL: <http://www.tomeidiamond.co.jp/en/tec/tec5.html>, Son Erişim Tarihi:16.07.2019.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZDEMİR, Ceyda  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1992, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (507) 570 15 21  
 e-mail : ceydaozdemir.y@gmail.com



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                                         | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|-------------------------------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Hacettepe Üniversitesi / Fizik Mühendisliği           | 2015             |
| Lise          | Aydınlıkevler Anadolu Lisesi                          | 2010             |

### İş Deneyimi

| Yıl        | Yer                           | Görev           |
|------------|-------------------------------|-----------------|
| 2017-Halen | Tübitak UZAY                  | Araştırmacı     |
| 2015-2017  | Tübitak UZAY                  | Bursiyer        |
| 2014-2015  | Hacettepe Üniversitesi – SNTG | Proje Öğrencisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Ozdemir, C., Ozcatalbas, Y., Bolat, Y., Kocaer, S., Aydemir, B., Selimoglu, O., Karci, O. (2007). *Grinding Process and Subsurface Damage Exploration of Low Expansion Glasses*. 2nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC'17), Nevsehir, Turkey, 203.

2. Alici, K.B., Karci, O., Yilmaz, A.S., Ozdemir, C., Oktem, F., Selimoglu, O. (2017). OTF *Analysis of a Spaceborne CMOS Imaging Sensor*. 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), İstanbul
3. Alici, K.B., Buyuk, H., Yilmaz, A.S., Ozdemir, C., Karci, O., Oktem, F., Selimoglu O. (2017). Periodic Aperture Imaging .*Optical Engineering*, 56(5)

## **Hobiler**

Dalış, Spor



*GAZİ GELECEKTİR..*