

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KESMEDE KOLEMANİT TOZUNUN  
AŞINDIRICI OLARAK KULLANILMASININ DENEYSEL  
İNCELENMESİ**

**Gülay COŞANSU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2010  
ANKARA**

Gülay COŞANSU tarafından hazırlanan “AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KESMEDE KOLEMANİT TOZUNUN AŞINDIRICI OLARAK KULLANILMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Can ÇOĞUN

Tez Danıőmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu  alıőma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa İ. GÖKLER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G. .

Doç Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G. .

Tarih: 06/07/2010

Bu tez ile G. . Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıőtır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gülay COŞANSU

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KESMEDE KOLEMANİT TOZUNUN  
AŞINDIRICI OLARAK KULLANILMASININ DENEYSEL İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Gülay COŞANSU**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Temmuz 2010**

**ÖZET**

Bu çalışmada, kolemanit ve zeolit tozlarının, aşındırıcılı su jeti (ASJ) ile kesmede aşındırıcı olarak performansları incelenmiştir.

ASJ ile kesmede en fazla tercih edilen aşındırıcı garnet olup  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  kimyasal formülüne sahiptir. Kolemanit, kimyasal formülü  $\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$  olan ham bor ürünüdür. Türkiye bor rezervinin %64,4'ünü oluşturur. Zeolit ise bor minerallerinin üst kısmını kaplayan, kristal yapıda hidrasyona uğramış alüminyum silikattır. Toplam dünya zeolit rezervinin %40'ı ülkemizde bulunmaktadır. Kolemanit ve zeolit mineralleri öğütülerek, ASJ ile kesmede aşındırıcı olarak denenmiş ve yurtdışından temin edilebilen garnet aşındırıcı performansı referans alınarak performansları değerlendirilmiştir. Al7075, mermer, cam, Ti6Al4V ve kompozit malzeme bahsedilen aşındırıcılarla kesilen malzemelerdir. Yapılan testlerde ilerleme hızı ve aşındırıcı debisinin yüzey özelliklerine etkisi de incelenmiştir. Çalışmada kolemanit belli oranlarda garnet ile karıştırılmış ve saf garnet ile yapılan testler tekrarlanarak yüzey özellikleri karşılaştırılmıştır.

**Bilim Kodu : 914.1.140**  
**Anahtar Kelimeler : Aşındırıcılı su jeti ile kesme, ASJ, kolemanit, zeolit, yüzey özellikleri**  
**Sayfa Adedi : 96**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN**

**AN INVESTIGATION ON THE USE OF COLEMANITE AS ABRASIVE IN  
ABRASIVE WATERJET CUTTING**

**(M.Sc. Thesis)**

**Gülay COŞANSU**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**July 2010**

**ABSTRACT**

**In this study, the performances of colemanite and zeolite as abrasive particles in abrasive waterjet (AWJ) cutting, were investigated experimentally.**

**Garnet ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) is the most popular abrasive used in AWJ cutting. Colemanite ( $\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$ ) is a raw boron containing mineral. Approximately 64.4% of Turkey boron reserve comprises colemanite. Zeolites are hydrated aluminosilicates found within the shielding layer of boron in nature. Turkey possesses a 40% share of the world zeolite reserves. In this study, colemanite and zeolite minerals were crushed and grinded to be used as abrasive powder in AWJ. Their performances were evaluated in comparison to that of garnet abrasives. Al7075, marble, glass, Ti6Al4V and composite material were among those which were cut by AWJ. The effects of traverse rate and abrasive flow rate on the surface roughness were also examined during the experiments. Furthermore, colemanite powder was mixed with garnet powder in certain proportions and the resulting surface characteristics were compared with those obtained in pure garnet powder tests.**

|                     |                                                                               |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Science Code</b> | <b>: 914.1.140</b>                                                            |
| <b>Key Words</b>    | <b>: Abrasive waterjet cutting, AWJ, colemanite, zeolite, surface texture</b> |
| <b>Page Number</b>  | <b>: 96</b>                                                                   |
| <b>Adviser</b>      | <b>: Prof. Dr. Can ÇOĞUN</b>                                                  |

## TEŞEKKÜR

Kıymetli bilgi ve deneyimlerinden faydalanma şansı verdiği için çok değerli Hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Kolemanit ve zeolit temini için yardımlarını esirgemeyen Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Teknoloji Geliştirme Dairesi Başkanı Sn. Fehmi ÜNLÜ'ye, öğütme işleminde yardımcı olan MTA Genel Müdürlüğü Cevher Zenginleştirme Birim Yöneticisi Sn. Oğuz ALTUN'a ve Hacettepe Üniversitesi Maden Müh. Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Hakan BENZER ve Araştırma Görevlisi Okay ALTUN'a, çalışmalarına destek veren TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. Yapısal Mühendislik Müdürü Sn. Gürsel ERARSLANOĞLU'na, manevi desteğini ve atölye imkanlarını hiç bir zaman esirgemeyen ve kendimi her zaman bir çalışanı olarak hissedeceğim ESKASAN'a, ölçme konusundaki yardımlarından ötürü TUSAŞ çalışanlarından Sn. Cahit TÖRE ve Sn. Serdar ÖZMEN'e, deneysel çalışmalarına katkılarından ötürü Zeki Yapı Sanayii'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen sevgili kardeşim Gökay COŞANSU ve arkadaşım Emre EKEN'e, manevi desteklerini her zaman hissettiren annem Ayhan COŞANSU, babam Ramazan COŞANSU ve değerli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                     | Sayfa       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                               | <b>vi</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR .....</b>                                                                                               | <b>viii</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                                                                             | <b>ix</b>   |
| <b>ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....</b>                                                                                   | <b>xii</b>  |
| <b>ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....</b>                                                                                     | <b>xiv</b>  |
| <b>RESİMLERİN LİSTESİ .....</b>                                                                                     | <b>xvii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>                                                                                 | <b>xix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                                               | <b>1</b>    |
| <b>2. SU JETİ İLE KESME .....</b>                                                                                   | <b>4</b>    |
| 2.1. Saf Su Jeti ile Kesme .....                                                                                    | 4           |
| 2.2. ASJ ile Kesme .....                                                                                            | 9           |
| 2.2.1. ASJ donanımı .....                                                                                           | 10          |
| <b>3. ASJ İLE KESMEDE YÜZEY KARAKTERİSTİĞİ VE KESME<br/>PARAMETRELERİNİN ASJ İLE KESME PERFORMANSINA ETKİSİ ...</b> | <b>20</b>   |
| 3.1. Hidrolik Parametrelerin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri.....                                              | 24          |
| 3.1.1. Basınç etkisi .....                                                                                          | 24          |
| 3.1.2. Orifis çapı etkisi .....                                                                                     | 26          |
| 3.2. Kesme Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri.....                                               | 26          |
| 3.2.1. İlerleme hızı etkisi.....                                                                                    | 26          |
| 3.2.2. Paso sayısı etkisi.....                                                                                      | 26          |
| 3.2.3. Nozul-iş parçası arası mesafe etkisi.....                                                                    | 28          |
| 3.2.4. Jet giriş açısı etkisi .....                                                                                 | 29          |

## Sayfa

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3. Karıştırma Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri ..  | 29        |
| 3.3.1. Odaklama çapı etkisi .....                                         | 29        |
| 3.3.2. Odaklama boyu etkisi .....                                         | 29        |
| 3.4. Aşındırıcı Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri.... | 30        |
| 3.4.1. Aşındırıcı debisi etkisi.....                                      | 30        |
| 3.4.2. Aşındırıcı tane büyüklüğü etkisi.....                              | 30        |
| 3.4.3. Aşındırıcı boyut dağılımı etkisi.....                              | 31        |
| 3.4.4. Aşındırıcı tane şekli etkisi .....                                 | 32        |
| 3.4.5. Aşındırıcı sertliği etkisi.....                                    | 32        |
| <b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>                                      | <b>33</b> |
| <b>5. MATERYAL VE METOT .....</b>                                         | <b>39</b> |
| 5.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Donanım.....                        | 39        |
| 5.1.1. Aşındırıcı tozlar .....                                            | 39        |
| 5.1.2 Kesilen malzemeler .....                                            | 43        |
| 5.1.3. Tezgah .....                                                       | 47        |
| 5.2. Tozların Öğütülmesi .....                                            | 48        |
| 5.3. Yöntem .....                                                         | 50        |
| 5.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ve Yüzey Dalgalılığı Ölçümleri ....  | 53        |
| 5.5 Koniklik Ölçümleri .....                                              | 53        |
| <b>6. DENEYSEL BULGULAR.....</b>                                          | <b>56</b> |
| 6.1. Zeolit Tozu ile Yapılan Kesme Deneyleri.....                         | 56        |
| 6.2. Kolemanit Tozu ile Yapılan Kesme Deneyleri.....                      | 56        |
| 6.2.1. Ön denemeler.....                                                  | 56        |

**Sayfa**

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2.2. Kolemanit tozu ile Al7075 kesme deneyleri .....                                                          | 56        |
| 6.2.3. Al7075 kesme deneylerinde kolemanit ve garnet tozu<br>performanslarının karşılaştırılması.....           | 63        |
| 6.2.4. Kolemanit tozu ile kompozit malzeme kesme deneyleri .....                                                | 65        |
| 6.2.5. Kompozit malzeme kesme deneylerinde kolemanit ve<br>garnet tozu performanslarının karşılaştırılması..... | 70        |
| 6.2.6. Kolemanit tozu ile mermer kesme deneyleri.....                                                           | 71        |
| 6.2.7. Mermer kesme deneylerinde kolemanit ve garnet tozu<br>performanslarının karşılaştırılması.....           | 75        |
| 6.3. Kolemanit ve Garnet Tozu Karışımları ile Yapılan Kesme Deneyleri.                                          | 76        |
| <b>7. DENEYSEL BULGULARIN TARTIŞILMASI .....</b>                                                                | <b>83</b> |
| <b>8. SONUÇ .....</b>                                                                                           | <b>86</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                          | <b>88</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                                                               | <b>93</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                            | <b>96</b> |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                        | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1 Basınca göre seçilecek nozul malzemeleri .....                     | 7     |
| Çizelge 2.2 Endüstriyel kullanım yüzdelerine göre aşındırıcılar .....          | 14    |
| Çizelge 2.3 Aşındırıcıların Sınıflandırılması .....                            | 14    |
| Çizelge 2.4 Aşındırıcı malzemelerin sertlikleri.....                           | 16    |
| Çizelge 2.5 Karıştırma tüpü malzemeleri .....                                  | 19    |
| Çizelge 4.1 Testlerde kullanılan aşındırıcı tipleri.....                       | 38    |
| Çizelge 5.1 Garnet aşındırıcının kimyasal bileşimi.....                        | 39    |
| Çizelge 5.2 Garnet aşındırıcının mineral bileşimi.....                         | 40    |
| Çizelge 5.3 Garnet aşındırıcının fiziksel özellikleri .....                    | 40    |
| Çizelge 5.4 Kolemanit kimyasal bileşimi .....                                  | 41    |
| Çizelge 5.5 Kolemanit fiziksel özellikleri.....                                | 41    |
| Çizelge 5.6 Zeolit kimyasal bileşimi .....                                     | 42    |
| Çizelge 5.7 Al 7075 mekanik özellikleri.....                                   | 43    |
| Çizelge 5.8 Al 7075 kimyasal bileşimi .....                                    | 44    |
| Çizelge 5.9 AS4 karbon elyaf malzeme özellikleri.....                          | 44    |
| Çizelge 5.10 Burdur beji kimyasal bileşimi.....                                | 45    |
| Çizelge 5.11 Burdur beji fiziksel ve mekanik özellikleri .....                 | 45    |
| Çizelge 5.12 Ti6Al4V Kimyasal bileşimi .....                                   | 46    |
| Çizelge 5.13 Ti6Al4V Mekanik özellikleri .....                                 | 46    |
| Çizelge 5.14 Soda kalsik camı kimyasal bileşimi .....                          | 46    |
| Çizelge 5.15 Testlerde kullanılan basınçlandırma ünitesi teknik özellikleri .. | 48    |
| Çizelge 5.16 Testlerde sabit tutulan parametreler.....                         | 52    |

**Sayfa**

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 5.17 Testlerde değişken olarak kullanılan parametreler.....                                                   | 55 |
| Çizelge 6.1 Cam kesiminde garnet ve kolemanit ile kullanılan kesme parametreleri.....                                 | 56 |
| Çizelge 6.3 Kolemanit ve garnet maliyetlerinin Al7075 kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması .....           | 65 |
| Çizelge 6.4 Kolemanit ve garnet maliyetlerinin kompozit malzeme kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması ..... | 71 |
| Çizelge 6.5 Kolemanit ve garnet maliyetlerinin mermer kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması .....           | 76 |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                     | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1 Su Jeti Kesme Sisteminin Şematik Görünümü.....                                  | 4     |
| Şekil 2.2 Su jeti ile kesme prensibi.....                                                 | 6     |
| Şekil 2.3 Etkin su jeti.....                                                              | 7     |
| Şekil 2.4 Çift etkili basınç yükseltme sistemi.....                                       | 13    |
| Şekil 2.5 Farklı aşındırıcı şekilleri.....                                                | 16    |
| Şekil 2.6 Aşındırıcılı su jeti nozulu .....                                               | 18    |
| Şekil 2.7 Karıştırma işleminin şematik gösterimi.....                                     | 18    |
| Şekil 3.1 ASJ ile kesmede gözlenen kesme aşınması ve deformasyon aşınması bölgeleri ..... | 20    |
| Şekil 3.2 (a) Jet sapması (b) Jet sapmasının neden olduğu kesme geometrisi.....           | 21    |
| Şekil 3.3 ASJ ile kesilen yüzeyde gözlenen mikroyapı.....                                 | 22    |
| Şekil 3.4 KG geometrisi .....                                                             | 22    |
| Şekil 3.5 KG geometrisinin oluşumunda etkili olan jet modeli .....                        | 23    |
| Şekil 4.1 Aşındırıcı tipinin koniklik oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....           | 34    |
| Şekil 4.2 Aşındırıcı tipinin nozul aşınma hızı ve talaş kaldırma hızına etkisi .....      | 34    |
| Şekil 4.3 Nozul-iş parçası arasındaki mesafenin kesme profili konikliğine etkisi .....    | 35    |
| Şekil 4.4 İlerleme hızının kesme profili konikliğine etkisi .....                         | 36    |
| Şekil 5.1 Kesme geometrisi teknik resmi .....                                             | 51    |
| Şekil 5.2 Nozul-iş parçası arası mesafe ve su jeti giriş açısı.....                       | 53    |

**Sayfa**

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.1 (a) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde aşındırıcı debisi değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde aşındırıcı debisi değişiminin yüzey dalgalılığına etkisi..... | 58 |
| Şekil 6.2 Kolemanit ile Al7075 kesiminde 80 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri (5 – 7,5 - 10 g/s) ile elde edilen kesme profili koniklik açıları.....                                                        | 59 |
| Şekil 6.3 Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde 7,5 g/s aşındırıcı debisi ve farklı ilerleme hızlarıyla elde edilen koniklik açıları.....                                                                             | 61 |
| Şekil 6.4 (a) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgalılığına etkisi .....                          | 62 |
| Şekil 6.5 Garnet ve kolemanit ile yapılan kesimlerde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri .....                                                                                                            | 64 |
| Şekil 6.6 (a) Kolemanit ile kompozit malzeme kesiminde aşındırıcı debisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile kompozit malzeme kesiminde aşındırıcı debisinin yüzey dalgalılığına etkisi .....              | 67 |
| Şekil 6.7 Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde koniklik açısının aşındırıcı debisine göre değişimi .....                                                                                                   | 68 |
| Şekil 6.8 (a) Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgalılığına etkisi.....       | 69 |
| Şekil 6.9 İlerleme değişiminin koniklik açısına etkisi .....                                                                                                                                                           | 70 |
| Şekil 6.10 Garnet ve kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesimlerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ..                                                                                           | 71 |
| Şekil 6.11 Kesme profili koniklik açısının ilerleme hızıyla değişimi .....                                                                                                                                             | 73 |
| Şekil 6.12 (a) Kolemanit ile mermer kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile mermer kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgalılığına etkisi .....                                         | 74 |
| Şekil 6.13 Mermer kesiminde kolemanit performansının garnet performansı ile karşılaştırılması .....                                                                                                                    | 75 |

**Sayfa**

|                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.14 (a) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi .....                               | 77 |
| Şekil 6.15 (a) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi ..... | 79 |
| Şekil 6.16 (a) Mermer kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Mermer kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Mermer kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi .....                               | 80 |
| Şekil 6.17 (a) Cam kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Cam kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Cam kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi .....                                        | 81 |
| Şekil 6.18 (a) Ti6Al4V kesiminde kolemanit katkısıyla yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Ti6Al4V kesiminde kolemanit katkısıyla yüzey pürüzlülüğüne etkisi yüzey dalgalılığına etkisi ..                                                                       | 82 |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1 Saf su jeti nozulu .....                                                                                                                                            | 6     |
| Resim 2.2 Gıda sektöründe su jeti ile kesime örnekler .....                                                                                                                   | 8     |
| Resim 2.3 ASJ nozul kesiti .....                                                                                                                                              | 10    |
| Resim 2.4 ASJ tezgahı .....                                                                                                                                                   | 11    |
| Resim 2.5 Garnet.....                                                                                                                                                         | 14    |
| Resim 2.6 Nozul aşınmasına örnek .....                                                                                                                                        | 19    |
| Resim 5.1 Basınçlandırma ünitesi.....                                                                                                                                         | 47    |
| Resim 5.2 ASJ tezgahı .....                                                                                                                                                   | 47    |
| Resim 5.3 Merdaneli kırıcı .....                                                                                                                                              | 49    |
| Resim 5.4 150 µm – 300 µm tane boyutu aralığında kolemanit tozu .....                                                                                                         | 49    |
| Resim 5.5 Kesme geometrisi .....                                                                                                                                              | 52    |
| Resim 6.1 Kolemanit ile AL7075 kesiminde 80 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri (5 - 7,5 - 10 g/s) ile elde edilen yüzeyler .....                                    | 57    |
| Resim 6.2 Jet sapmasının 90o ve 30o'lik açılı bölgelerde oluşturduğu geometri ve jetin malzemeden çıktığı bölgede oluşan çapaklı bölgenin aşındırıcı debisi ile değişimi..... | 60    |
| Resim 6.3 Kolemanit ile Al7075 kesiminde 7,5 g/s aşındırıcı debisi ve farklı ilerleme hızlarıyla elde edilen yüzeyler .....                                                   | 61    |
| Resim 6.4 Jetin malzemeden çıktığı bölgede oluşturduğu çapaklı bölgenin ve 90° / 30° açılı bölgelerde jet sapmasının neden olduğu geometrinin ilerleme hızı ile değişimi..... | 63    |
| Resim 6.5 Kolemanit ile kompozit kesiminde 250 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri ile elde edilen yüzeyler.....                                                     | 66    |
| Resim 6.6 Kolemanit ile mermer kesiminde elde edilen yüzeyler .....                                                                                                           | 72    |
| Resim 6.7 Kolemanitle ile mermer kesiminde farklı ilerlemelerde jet çıkışında oluşan kesme geometrisi .....                                                                   | 73    |

**Sayfa**

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resim 6.8 % 50 kolemanit + % 50 garnet karışımı ile kesilen Ti6Al4V numunesinin jet çıkış tarafı ..... | 82 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Kısaltmalar | Açıklama           |
|-------------|--------------------|
| ASJ         | Aşındırıcı su jeti |
| KG          | Kesme genişliği    |

## 1. GİRİŞ

Tabiat, en sert malzemenin bile su ile şekil değiştirebileceğini milyonlarca yıl önce ispatlamıştır. Suyun gücü ile meydana gelen birçok yer şekli, yeryüzünü oluşturmaktadır. Bu etkiyi keşfeden insanoğlu, onu basınçlandırarak kullanmaya 19. yüzyılda başlamıştır. Su jeti ilk olarak Kaliforniyalı altın madencileri tarafından altını, kaya ve kum katmanlarından ayırmak için kullanılmıştır [1].

Aşındırıcılı su jeti ise 1982'den sonra metal kesme endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Isıl gerilmeler ve radyasyon oluşturmada parlak ve kompozit malzemeler dahil hemen her türlü malzemenin işlenmesinden kullanılabilen su jeti ile kesme sistemi, basıncı artırılan suyun bir nozuldan geçirilmesiyle elde edilen yüksek hızlardaki su jeti huzmesinin veya aşındırıcılı su jeti karışımının, çarpma etkisiyle malzemedan parçacıklar aşındırması ve bunun sonucu olarak parçanın kesilmesi esasına dayanır [2].

Su jeti ile kesme yöntemi aşağıdaki malzemelerin kesilmesinde kullanılır [3]:

- Dondurulmuş gıdalar
- Halı
- İnce levha
- İnce mum
- Kağıt
- Köpük
- Mantar
- Plastik film

- Sunta
- Yumuşak conta malzemesi
- Yumuşak kauçuk
- Yumuşak poliüretan
- Yumuşak veya ince ahşap

Aşındırıcılı su jeti ise aşağıdaki malzemelerin kesiminde kullanılır [3]:

- Alüminyum
- Bakır
- Cam
- Cam takviyeli poliüretan
- Granit
- Karbon elyafı
- Kompozitler
- Mermer
- Paslanmaz çelik (SAE 304-316)
- Pirinç
- Pleksiglas
- Polikarbonat
- Poliüretan
- Seramik
- Sert kauçuk

- Sert veya kalıp ahşap
- Takım çelikleri
- Taş
- Titanyum
- Düşük sertlikte çelik

Su jetinde kesme aracı olarak kullanılan sadece sudur. Aşındırıcılı su jeti (ASJ) ile kesmede ise su, taşınan parçacıkların hızını artıran güç aracı olarak kullanılmaktadır. ASJ üretmek için kullanılan donanım, saf su jeti için kullanılan donanımla hemen hemen aynıdır. İlave olarak orifisten hemen sonra bir aşındırıcı karıştırma odası mevcuttur. Burada aşındırıcı, suyla karıştırılarak yeniden odaklanır ve iş parçasına yönlendirilir [4].

ASJ ile kesmede olivin, silis kumu, alüminyum oksit, garnet, aşındırıcı olarak kullanılan malzemelerdir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan garnet Avustralya ve Hindistan'dan temin edilebilmektedir. Bu aşındırıcıların yurtdışından yüksek maliyete temin edilmesi ASJ ile kesme maliyetlerinin yükselmesine ve yurtdışına döviz çıkmasına sebep olmaktadır.

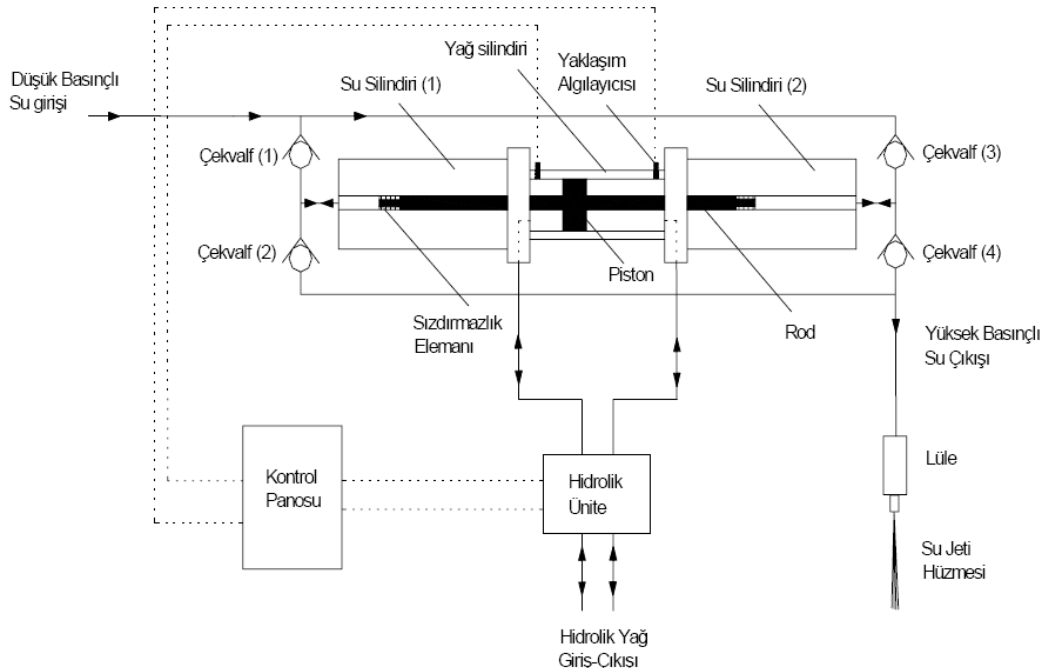
Bu çalışmada yeni bir aşındırıcı olarak denenen tozlardan kolemanit minerali, doğada yaklaşık 230 çeşit doğal bor mineralinden ticari değere sahip olanlarından biridir [5].  $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  kimyasal formülüne sahip kolemanit, Türkiye bor rezervinin yaklaşık %64'ünü oluşturmaktadır. Zeolit ise bor minerallerinin üst kısmını kaplayan, kristal yapıda hidrasyona uğramış alüminyum silikattır. Hem kolemanit hem zeolit, ülkemiz zenginliklerinden olup bu madenler için yeni kullanım alanları yaratabilmek ülke ekonomisine katkı açısından büyük önem taşımaktadır.

## 2. SU JETİ İLE kesme

Su jeti kesme sistemi, basıncı artırılan suyun bir nozuldan geçirilmesiyle elde edilen yüksek hızlardaki su jeti huzmesinin veya aşındırıcı-su jeti karışımının malzeme yüzeyinden erozyon yoluyla talaş kaldırarak parçayı kesmesi esasına dayanır [2,6]. Tanımdan anlaşılacağı üzere su jeti ve aşındırıcılı su jeti ile kesme olarak iki değişik yöntemle yapılmaktadır [2,4,7].

### 2.1. Saf Su Jeti ile Kesme

Su jeti ile kesme ticari anlamda ilk olarak 1970 ortalarında oluklu mukavva kesimi ile endüstriye girmiştir. Genellikle sabit basınç altında işlenebilen sertliği düşük malzemeler ile suyun ilettiği basıncın etkisiyle yapısında mikro düzeyde kırıklar meydana gelebilecek gevrek malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır [7,8]. Sistemin şematik görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir.

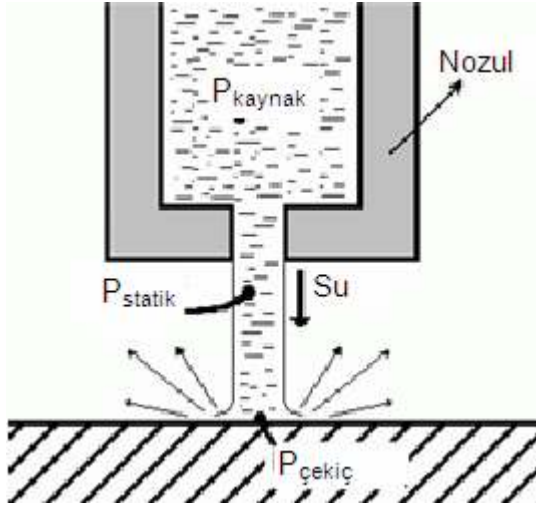


Şekil 2.1 Su Jeti Kesme Sisteminin Şematik Görünümü [6]

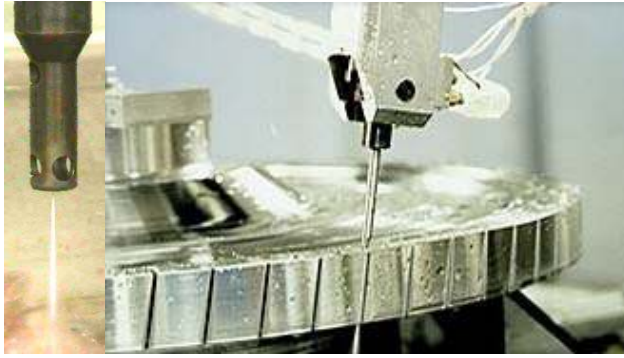
Sistemin çalışma prensibi şöyledir: Bir su pompası yardımıyla basınç artırıcıya gönderilen düşük basınçlı ( $0.4 - 0.5$  MPa) saf su, 1 ve 3 numaralı valflerin üzerinden su silindirlerine ulaşmaya çalışır. Pistonun sağa sola hareketi sırasında su basıncı, 2 numaralı su silindirinde artırılabacaktır. Bu durumda 2 ve 3 numaralı valfler yüksek basınçlı su tarafından kapatılacak, yüksek basınçlı su 4 numaralı valfin üzerinden nozula ulaşırken düşük basınçlı su 1 no'lu valfin üzerinden 1 numaralı su silindirine dolacaktır. Eğer su basıncı, 1 numaralı su silindirinde artırılıyor olsaydı, bu durumda 1 ve 4 numaralı valfler yüksek basınçlı su tarafından kapatılacak, yüksek basınçlı su 2 numaralı valfin üzerinden nozula ulaşırken düşük basınçlı su 3 numaralı valfin üzerinden 2 numaralı su silindirine dolacaktı. Sistemde basınç artırma işleminin sürekliliği, yaklaşım algılayıcıları (sensörler) ile son konumu algılanan yağ silindir pistonunun yönünün bir PLC (Programmable Logic Controller) tarafından kumanda edilen yön denetim valfi ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir [6].

Kesme işlemini gerçekleştiren jet,  $130-620$  MPa değerine kadar basınçlandırılan suyun  $0.18-0.4$  mm çapındaki orifisten geçirilmesiyle elde edilir. Suyu çok yüksek (ses hızının üzerinde) hız kazandıran bu işlem, elde edilen su huzmesinin çok çok ince yapıda olmasından dolayı su lazeri olarak da adlandırılmaktadır. Su jeti, iş parçası yüzeyine çarptığında ilk birkaç milisaniye içerisinde (suyun yanal akışı başlamadan önce) Şekil 2.2'de görüleceği üzere ani darbe etkisi yaratır. Bu durum uygulanan  $P_{kaynak}$  basıncının üç katının parça yüzeyinde elde edilmesini sağlar. Parçadan malzeme koparma işlemi, su jetinin parçaya vurduğu noktadaki basıncın ( $P_{çekici}$ ) malzemenin akma dayanımını geçtiği anda gerçekleşir [9].

Suyun jet haline getirilerek parça kesimine hazırlanmasında en önemli rolü üstlenen ekipman nozuldur. Resim 2.1'de saf su jetinde kullanılan nozullara örnekler görülmektedir.



Şekil 2.2 Su jeti ile kesme prensibi [9]



Resim 2.1 Saf su jeti nozulu [9]

Nozulun işleme esnasında, yüksek basınçlı suyun ihtiva ettiği partiküllerin çarpmasıyla oluşan kuvvetlere karşı dayanımının yüksek olması gerekir. Bunun için nozul malzemesi çok sert olmalıdır.

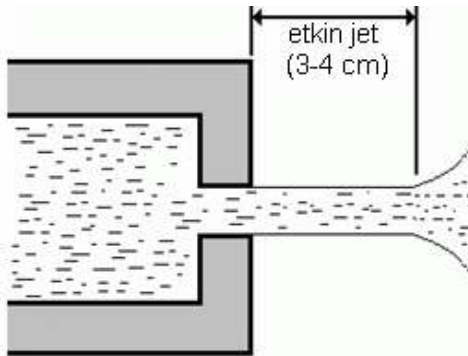
Çizelge 2.1'de uygulanan basınca göre seçilebilecek nozul malzemeleri verilmiştir [4,10].

Çizelge 2.1 Basınca göre seçilecek nozul malzemeleri [4,10]

| Nozul malzemeleri | Basınç     |
|-------------------|------------|
| Pirinç-çelik      | < 68 MPa   |
| Tungsten karbür   | 60-170 MPa |
| Safir-elmas       | >170 MPa   |

Saf su jetinde kullanılan nozulların uç ömrü 250 – 500 saat civarındadır [9].

Su jetinin etkili boyunu (Şekil 2.3) arttırmak için (suyun dağılmasını engellemek için) suyun içerisine % 1 miktarında uzun zincir yapılı polimer yağları karıştırılır. Bu ilave, suyun viskozitesini artırır ve jet boyunu  $L/D = 600$ 'e kadar çıkarır (L jet boyu, D jet çapı) [9]. Ayrıca polimer yağının yağlama etkisi nozul ömrünü uzatır [4,11].



Şekil 2.3 Etkin su jeti [9]

Saf su jeti birçok sektörde, sağladığı avantajlar sayesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Gıda sektöründe taze, kuru, paketlenmiş ya da dondurulmuş, hemen hemen tüm gıdalar su jeti ile kesilebilmektedir [2,12]. Kesim sırasında ürün kesici takımla temas olmadığından ürün üzerinde minimum basınç etkisi gözlenir. Böylece ürünün deforme olması önlenmiş olur. Bıçak temizleme, eğeleme ve değiştirme problemleri yoktur. Sıhhi olmasının yanında sistem esnek imalat ve otomasyon sistemlerine kolaylıkla adapte edilebildiği için ürüne bıçakla verilmesi mümkün olmayan şekiller kolaylıkla elde edilebilmektedir. Örneğin dondurulmuş balıkların paketlenmesi

için yapılan kesme işleminde su jeti kullanıldığında ürün kaybının normal yöntemlerle yapılan kesme işlemlerinde oluşan kayıplardan yaklaşık %20 daha az olduğu görülmüştür [2,13]. Resim 2.2'de saf su jetinin gıda sektöründeki uygulamalarına ilişkin örnekler verilmiştir.



Resim 2.2 Gıda sektöründe su jeti ile kesime örnekler [1]

Kağıt ve mukavva sektöründe de su jeti yaygın kullanılan bir yöntemdir. Mekanik sistemlerin kesim sırasında yarattığı tahribat su jeti ile kesimde yaşanmaz. Mekanik kesmeler sırasında kesilen bölgedeki malzeme kaybı yaklaşık 0,5 mm olurken su jeti ile bu ölçü 0,1 mm'ye indirilmiştir. Kesim esnasında gözlemlenebilir nem ve toz oluşturmaz, yüksek operasyon hızlarına ulaşılabilir. Tekstil ve giyim sektöründe, geleneksel yollarla kesimi oldukça zor olan kumaş su jetiyle kolaylıkla kesilebilmektedir. Ayrıca sistem daha karmaşık kesimlere de olanak vermektedir. Farklı modeller ve kalıplar arasındaki geçiş bilgisayar kontrollü sistemlerle daha kolay olmakta ve işlem hızı, kesici uç değiştirme gibi bir problem olmadığı için artmaktadır. Kauçuk ve plastik sanayisinde de tercih edilen saf su jeti ile kesme sistemleri, gözenekli, taneli ve düşük sertlikte malzemelerin kesilmesinde kullanılır. Özellikle kapı ve pencere imalatında kullanılan PVC türü malzemelerin kesilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca, cam takviyeli plastik, kauçuk, plexiglas, sünger ve makralon gibi plastik ve türevleri olan malzemeler de yüksek hızlarda kesilebilir. Polimer katkılı su jeti sistemleri ayakkabı ve dericilik sektöründe kullanıldığında, malzeme sarfiyatında %15'lik bir düşüş gözlenmektedir [2,13].

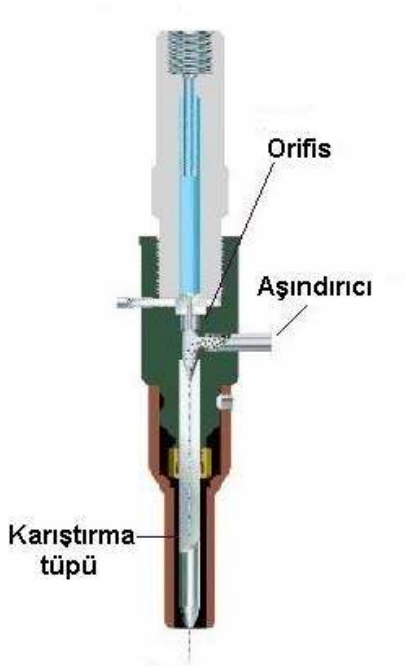
Saf su jeti ile kesmenin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [1,9]

- Kesme yüzeylerinde ısı etkilenme olmadığından malzemenin metalürjik özellikleri değişmemektedir.
- Kağıt, kumaş, mukavva, deri vb. malzemelerde kesme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar ısılanma görülür.
- Kesme herhangi bir noktadan başlayabilir. Karmaşık kesimler gerçekleştirilebilir.
- Kesme genişliği dar, su jeti ve malzeme arasındaki yanal açıklık minimum seviyededir.
- Kesme sırasında çapak oluşmaz. Tozsuz ve keskin kesme detayı verir. Dolayısıyla kesimden sonra herhangi bir son işleme gerek kalmaz.
- Standart CAD/CAM sistemleriyle programlanabilir.
- Basit fikstürlerle kesim yapılır. Tezgah ayar zamanı çok kısadır.
- Kesici değiştirme, bileme gibi işlemler gerektirmez.
- Malzeme kaybı minimumdur.
- Kesici olarak kullanılan su ucuz, bol ve zehirli olmayan yapıdadır.

## 2.2. ASJ ile Kesme

Saf su jeti, metal, seramik, kompozit vb. malzemeleri kesemez. Bu malzemelerin kesimi için ASJ sistemi devreye girer. Resim 2.3'de ASJ nozul kesiti verilmiştir.

Basınçlandırılmış su, orifisten geçtikten sonra karıştırma odasına gelir, burada yüksek basıncın sağladığı emiş kuvvetinin etkisiyle aşındırıcıyla karışır. Bu dar karıştırma odasında suyun momentumunun bir kısmının aşındırıcıya transferiyle aşındırıcı, yüksek hızlar kazanarak çok çeşitli malzemeyi kesebilecek kabiliyete erişir [14]. ASJ ile saf su jeti arasındaki temel farklılıklar, aşındırıcılı su jeti sisteminde fazladan bir karıştırma odasının ve aşındırıcı besleme mekanizmasının olmasıdır [4].



Resim 2.3 ASJ nozul kesiti [9]

### 2.2.1. ASJ donanımı

ASJ tezgahı Resim2.4’de verildiği gibidir.

#### Kontrol ünitesi

Yüksek basınç pompasını çalıştırır, eksen hareketlerini dolayısıyla nozul hareketini ve aşındırıcı belsme sistemini kontrol eder. Sisteme bağlı bilgisayarla kontrol edilir.

#### Pompa

Nozul sistemi ile jet karakteristiği kazandırılan su ilk olarak pompa tarafından basınçlandırılır ve sisteme devamlı akışı sağlanır. Su jeti ile kesme sistemlerinde kullanılan pompa tipleri, doğrudan tahrikli ve basınç yükselticili tiplerdir.



Resim 2.4 ASJ tezgahı [15]

#### *Doğrudan tahrikli pompa tipleri*

Küçük hacimli üç veya daha fazla sayıda silindirden oluşan bu pompalar aşınmayı en aza indirmek amacıyla yaklaşık 600 dev/dak hızda çalıştırılırlar. Silindirler içerisine düşük basınçlı su alınarak, suyun basıncı 300 MPa değerine kadar çıkartılır. Bu tip pompalarla belirtilen basınçtan daha yüksek basınçlara çıkmak mümkün değildir. Avantajları ise basınç dalgalanmalarının kesme işlemlerini etkilemeyecek kadar düşük olması ve düşük çalışma basınçları nedeniyle bakım gereksinimlerinin diğer tipe oranla daha az olmasıdır [2].

#### *Basınç yükselticiler*

Su jeti ile kesme 400 MPa civarında basınç gerektirir. Geleneksel pompaların 100 MPa'dan daha yüksek değerlere çıkamaması özel basınç yükseltme sistemleri ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Su jeti ile kesme sistemlerinde çift etkili ve kademeli olmak üzere iki farklı basınç yükseltme sistemi kullanılmaktadır [4].

Tipik bir basınç yükseltici sistem, hidrolik yağı ve su çevrimlerini içerir. Hidrolik yağı basıncıyla su basıncının yükseltilmesi sistemin ana felsefesidir [4,7]. Sistemde, Şekil 2.4’de görüldüğü üzere sağa-sola hareket eden hidrolik pistonlarına eşit alana sahip iki pompa pistonu sabitlenmiştir [4]. Elektrik motorunun (25 – 200 HP) hidrolik pompayı çalıştırmasıyla pompa, yağı depodan çekerek 20 MPa’a basınçlandırır. Basınç hidrolik pistonların hareketiyle pompa pistonlarına iletilir. Hidrolik piston yüzey alanı pompa pistonları yüzey alanlarından 20 kat daha büyüktür. Bu da 20 MPa değerindeki yağ basıncının 400 MPa değerine çıkarılması demektir. Yani;

$$\text{Basınç} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}}$$

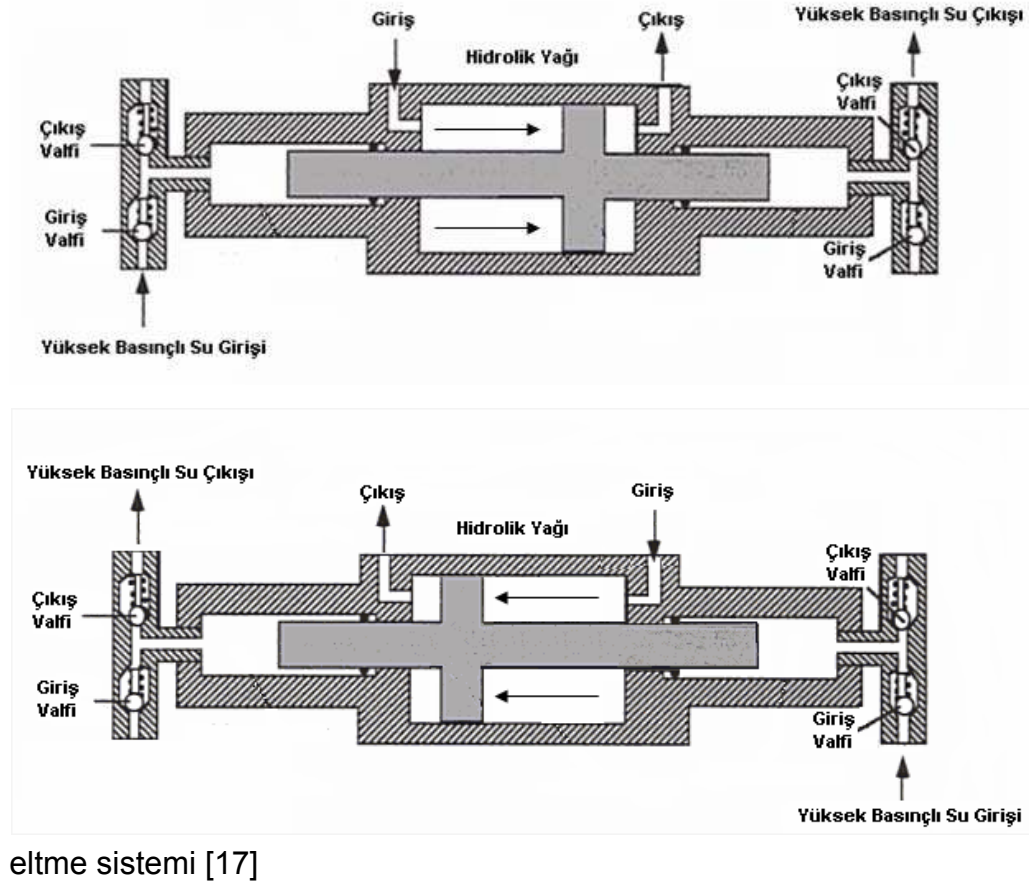
Pompadan çıktığı haliyle kesme başlığına yönlendirilmeden önce akümülatör yardımıyla yüksek basınçlı suyun basıncı düzenlenir. Kesme başlığına sabit basınçlı ve düzgün bir akış sağlanır. Akümülatör olmaması halinde basıncın düzensizliği kesme işlemine yansır ve kesilen yüzeyde istenmeyen izler oluşur.

100 MPa düzeyindeki basınçları sağlayabilmek için üç kademeli basınç yükselticiler kullanılmaktadır. Bu sistemde akış kontrolü doğrudan basınç emniyet valfi veya doğrudan motor hız kontrolü veya değişken hız transmisyonu gibi sistemlerle sağlanır [4,16].

#### Aşındırıcı besleme ünitesi ve aşındırıcılar

Su jeti ile işleme teknolojisini iki gruba ayıran aşındırıcı malzemelerin endüstride kullanımı, ASJ’nin endüstriye girmesinden daha eski tarihlere dayanmaktadır. Örneğin; kumlama tezgahlarında garnet, çelik bilya, cüruf gibi aşındırıcılar kullanılmaktadır. Ancak bu tip uygulamalarda aşındırıcı tane boyutu dağılımı ve saflığı su jeti uygulamalarında olduğu gibi önemli değildir. Zımpara ise en yaygın kullanılan ve en bilinen aşındırıcıdır. Silikon karbür, alüminyum oksit, garnet veya diğer seramik aşındırıcıların kağıt veya kumaşa

tutturulmasıyla elde edilen aşındırıcıda tane boyutu dağılımı daha önemlidir [18].



Şe  
kil  
2.4  
Çift  
etk  
ili  
ba  
sın  
ç  
yü  
ks

eltme sistemi [17]

#### *Aşındırıcı Malzemelerin Genel Sınıflandırılması*

ASJ ile kesmede kullanılan aşındırıcılar endüstriyel kullanım yüzdelere göre Çizelge 2.2'deki gibi sınıflandırılabilir.

Çizelge 2.3'de ise aşındırıcılar, oksit ve silikatlar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.2 Endüstriyel kullanım yüzdelere göre aşındırıcılar [19]

| Aşındırıcı      | Endüstriyel kullanım (%) |
|-----------------|--------------------------|
| Garnet          | 90                       |
| Olivin          | 15                       |
| Cüruf           | 15                       |
| Alüminyum oksit | 11                       |
| Silis Kumu      | 11                       |

Çizelge 2.3 Aşındırıcıların Sınıflandırılması [19]

| Oksit                             | Silikat                                                         |                                                                                                  |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | Garnet                                                          | Diğer Silikatlar                                                                                 |
| Magnetit_ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | Almandin_ $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ | Zirkon_ $\text{ZrSiO}_4$                                                                         |
| İlmenit_ $\text{FeTiO}_3$         | Spesartin_ $\text{Mn(II)}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$         | Topaz_ $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F,OH})_2$                                                  |
| Korundum_ $\text{Al}_2\text{O}_3$ | Pirop_ $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$                 | Olivin_ $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$                                                          |
| Rutil_ $\text{TiO}_2$             | Grosülarit_ $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$            | Storelit_ $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2\text{Al}_9(\text{Si,Al})_4\text{O}_{20}(\text{O,OH})_4$ |
| Kuvars_ $\text{SiO}_2$            | Andradit_ $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$      |                                                                                                  |

Çizelge 2.2' de görüldüğü üzere garnet, ASJ ile kesmede en çok tercih edilen aşındırıcıdır. Nehir yataklarından elde edilen garnet, sürekli akan suyun etkisiyle yuvarlatılmış kaya yapısındadır. Öğütme işlemiyle keskin köşeli, düzensiz şekilli tanecikler halini alır. Bu geometrideki aşındırıcı, kesmede daha iyi performans gösterir.



Resim 2.5 Garnet

Kesilen malzeme açısından garnet genel amaçlı bir aşındırıcıdır. Daha düşük sertlikteki malzemelerin kesimi için alternatifi olivindir. Olivin'in sertliği

garnet'a göre daha düşüktür ve garnet'tan daha ucuzdur. Avantajı, nozul ömrünü artırmasıdır.

Alüminyum oksit ve silisyum karbür, elektro-füzyon olarak metoduyla sentetik olarak üretilen aşındırıcılardır. Sert ve keskin yapılarına bağlı olarak aşındırma kabiliyetleri oldukça yüksektir. Nozul ömrünü kısaltmaları ve pahalı olmaları dezavantajlarıdır [4].

#### *Su jeti ile işleme performansına etki eden aşındırıcı parametreleri*

Aşındırıcı malzemenin karakteristiğini oluşturan ve ASJ performansını önemli ölçüde etkileyen aşındırıcı tane özellikleri şunlardır [19]:

- Tane yapısı (Kafes yapısı, kristalografik grup ve simetri, kimyasal içerik, kırılma özellikleri)
- Tane sertliği
- Tane mekanik özellikleri
- Tane şekli
- Tane boyut dağılımı
- Ortalama tane boyutu

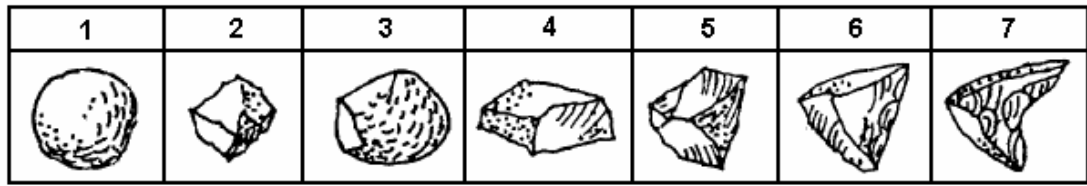
Çizelge 2.4'de ASJ ile kesmede sıklıkla kullanılan aşındırıcıların sertlikleri Mohs ve Knoop skalalarında verilmektedir.

Deneysel çalışmalar, kesme derinliğinin aşındırıcı sertliğiyle arttığını göstermektedir. Ayrıca daha sert aşındırıcı malzeme ile daha yüksek ilerleme hızları kullanılabilir. Sert aşındırıcılar için suyla karışma ve sonrasında ivmelenme esnasında kırılarak keskin köşeler oluşturma mekanizması, düşük sertlikteki aşındırıcılara oranla daha iyidir. Bu da sünek malzemelerin işlenmesinde kolaylık sağlar [19].

Çizelge 2.4 Aşındırıcı malzemelerin sertlikleri [19]

| Aşındırıcı       | Sertlik |           |
|------------------|---------|-----------|
|                  | Mohs    | Knoop     |
| Alüminyum oksit  | 8 - 9   | 2100      |
| Bakır cürufu     | -       | 1050      |
| Garnet           | 7,5     | 1350      |
| Cam kırığı       | 5,5     | 400 - 600 |
| Sert kaya garnet | 8+      | -         |
| Olivin           | 5,5     | 1100      |
| Silikon karbür   | 9,15    | 2500      |
| Silis kumu       | -       | 700       |
| Çelik bilya      | -       | 400 - 800 |
| Zirkonyum        | -       | 1300      |

Aşındırıcı şekli de kesme performansı açısından etkilidir. Daha önce de belirtildiği gibi keskin köşeler ve düzensiz tane yapısı, kesme işlemini kolaylaştırır. Kesme esnasında yuvarlak yapıya göre daha yüksek kesme kuvveti sağlar [18]. Şekil 2.5’de farklı aşındırıcı şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.5 Farklı aşındırıcı şekilleri [20]

Tane boyutu olarak aşındırıcılar değerlendirildiğinde, daha kaba tanelerin inceleme oranla daha yüksek hızlarda kesebildikleri görülmektedir. İnce taneler ise daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sağlar [18]. En çok tercih edilen aşındırıcı boyutu 80 meş’dir.

Tane boyutu dağılımı da kesme performansı açısından önemli bir parametredir. Kaba veya çok ince boyutta taneler nozulun tıkanmasına

sebepler olurlar. En kaba tane boyutu için genel kural, nozul çapının yarısından daha küçük olmasıdır. İstikrarlı bir kesim kalitesi için tane boyutu aralığının mümkün olduğunca dar olması gerekir [18].

### Nozul

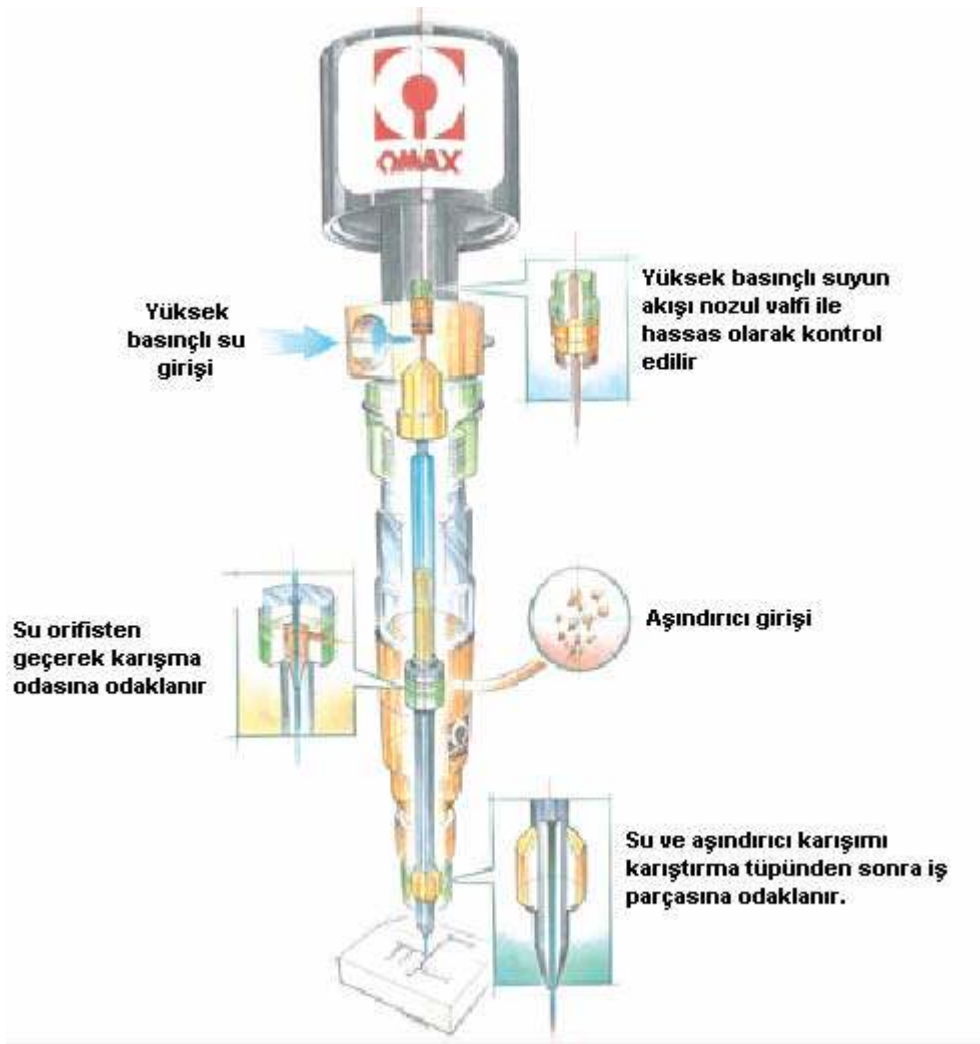
Aşındırıcılı su jeti sistemlerinde kullanılan nozul tipi Şekil 2.6'de görüldüğü gibi iki kademelidir. Su ilk olarak elmas orifisten geçerek jet formuna ulaşır. Orifisten geçen su vakum etkisi yaratarak besleme tüpü boyunca aşındırıcı malzemeyi çeker. Böylelikle ivmelenen aşındırıcı, su jetiyle birlikte silindirik seramik karıştırma tüpüne ulaşır. Burada aşındırıcılı su jeti formunu oluşturan karışım, malzemeyi kesmek üzere nozulu terk eder [21].

Su jetinin karıştırma tüpünün kanalından geçerken neden olduğu yüksek vakumla karıştırma odasına 0,3-3 m<sup>3</sup>/h hava girer. Hava, aşındırıcının sisteme dahil olmasını sağlar [4, 22].

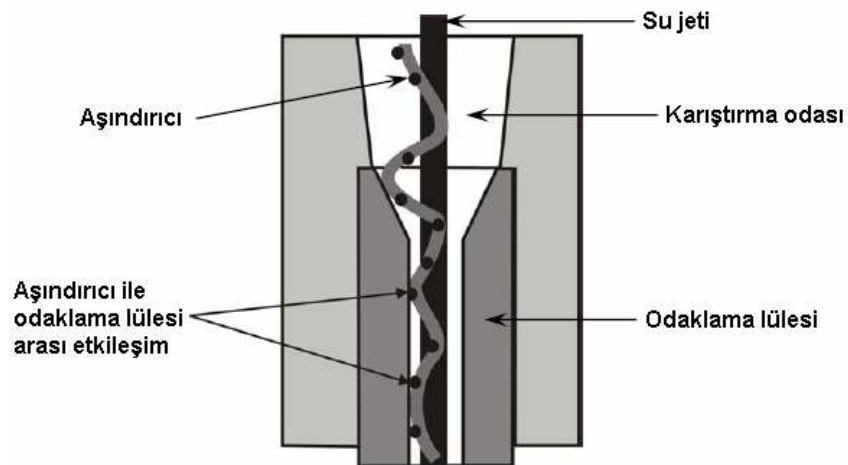
Aşındırıcı taneler, jete dahil olmaya çalışırken kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin etkisiyle jetten kurtularak karıştırma tüpü duvarlarına çarpar (Şekil 2.7). Karıştırma tüpü duvarıyla aşındırıcı tane arası bu etkileşim aşındırıcı tanenin suyun momentumuyla yeteri kadar ivme kazanarak su jetine dahil olmasına kadar sürer [23]. Bu nedenle, karıştırma tüpü malzemesinin seçiminde aşınma dayanımı yüksek malzemeler tercih edilir. Çizelge 2.5'de, endüstride kullanılan karıştırma tüpü malzemeleri verilmiştir.

Nozul aşınması, aşağıdaki değişimlerinin gözlenmesiyle tespit edilir [19]:

- Nozul çıkış çapının büyümesi
- Nozul ağırlığının düşmesi
- Karıştırma tüpü iç yüzeyindeki değişimler
- Nozul geometrisindeki değişim



Şekil 2.6 Aşındırıcılı su jeti nozulu [21]

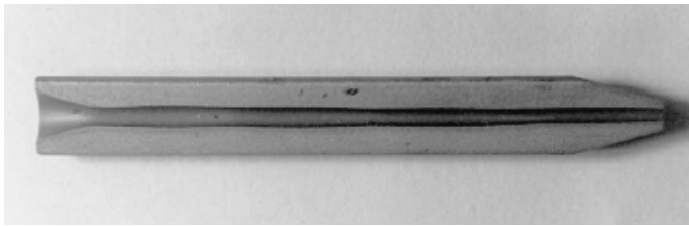


Şekil 2.7 Karıştırma işleminin şematik gösterimi [23]

Çizelge 2.5 Karıştırma tüpü malzemeleri [4]

| Karıştırma tüpü malzemeleri |               |
|-----------------------------|---------------|
| Malzeme                     | Kodu          |
| Bor karbür                  |               |
| $\alpha$ - Silikon karbür   |               |
| Tungsten karbür             | C2            |
| Tungsten karbür             | C4            |
| Tungsten karbür             | Kennametal 70 |
| Silisyum nitrit             | SNW 7000      |
| Zirkonyum                   | Z20           |
| Alüminyum oksit             | A47955        |
| Alüminyum oksit             | AD998         |

Nozul boyunun uzamasıyla nozul aşınma süresi de uzamaktadır. Orifis çapının nozul çıkış çapına oranı, nozul aşınmasına etki eden parametrelerden biridir. Optimum karıştırma ve kesme için bu oranın 0,3 – 0,4 civarında olması gerekir. Resim 2.6'de 310 MPa basınçla, 3,8 g/s aşındırıcı (garnet) debisi ile 3 saat boyunca çalıştırılmış, malzemesi WC-Co olan bir nozulun kesiti görülmektedir [24,25].

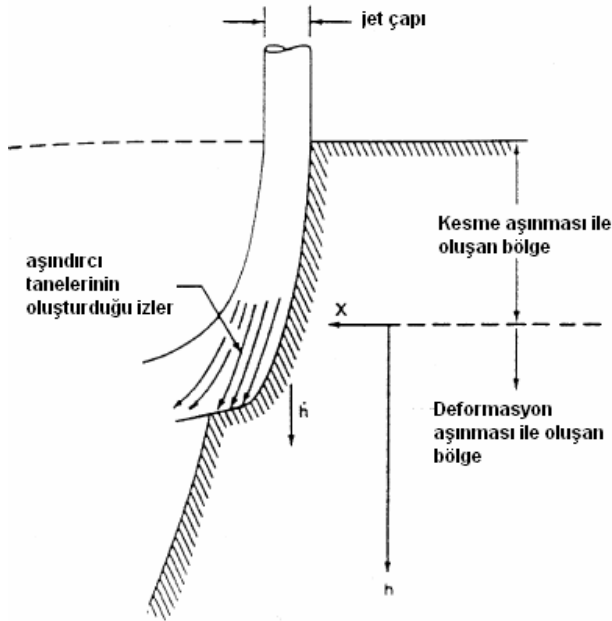


Resim 2.6 Nozul aşınmasına örnek [24]

### 3. ASJ İLE KESMEDE YÜZEY KARAKTERİSTİĞİ VE KESME PARAMETRELERİNİN ASJ İLE KESME PERFORMANSINA ETKİSİ

Aşındırıcı tanelerinin ivmelenmesini sağlayan ilk mekanizma, sürekli yapıdaki su jetinin damlacıklar halinde dağılmasıdır. ASJ'nin oluşumunu sağlayan ikinci mekanizma ise aşındırıcı tanelerine su tarafından uygulanan hidrodinamik sürüklenme kuvvetidir. Su jeti ve aşındırıcı arasındaki momentum transferinin sonucu elde edilen yüksek hızdaki ASJ hedef malzemeyi kesmek üzere nozulu terk eder. Kesme işlemi, hedef malzemenin karakteristiğiyle ilişkili mikro işleme etkilerine bağlı olarak oluşan erozyon, kayma, kırılma etkileri sonucu meydana gelmektedir [26] .

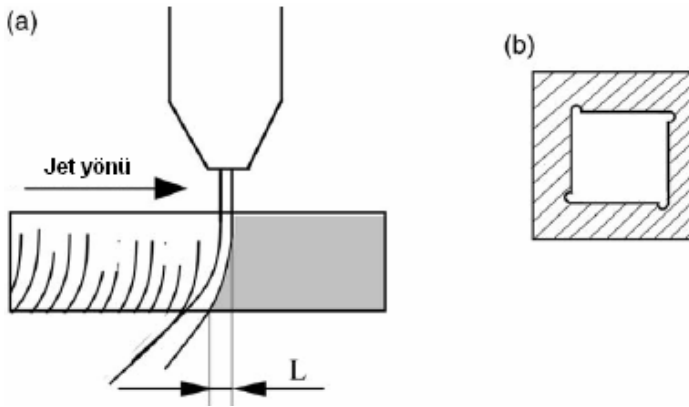
ASJ ile kesmede hedef malzeme üzerinde kesme aşınması ve deformasyon aşınması (Şekil 3.1) olmak üzere iki farklı talaş kaldırma mekanizması etken olmaktadır [27, 28, 29].



Şekil 3.1 ASJ ile kesmede gözlenen kesme aşınması ve deformasyon aşınması bölgeleri

Şekil 3.1’de jet sapması da görülebilmektedir. Jet sapması, jetin malzemedan çıktığı kısmının tabla veya nozul hareketi sebebiyle jet girişinin önüne

geçmesidir. Bu etki, malzeme yüzeyinde açılı izler bırakmakla birlikte köşelerde Şekil 3.2 (b)'de görüldüğü gibi istenmeyen geometriler yaratır. Bu tip keskin dönüşlerin olduğu kesimlerde ilerleme hızı başta olmak üzere kesme parametreleri dikkatli ayarlanmalıdır.

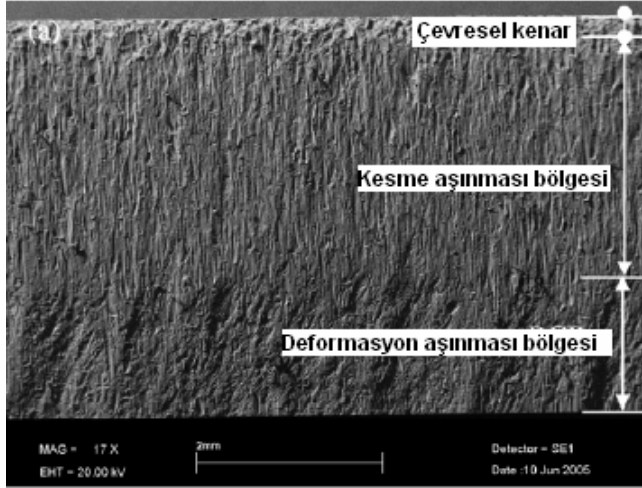


Şekil 3.2 (a) Jet sapması (b) Jet sapmasının neden olduğu kesme geometrisi [29]

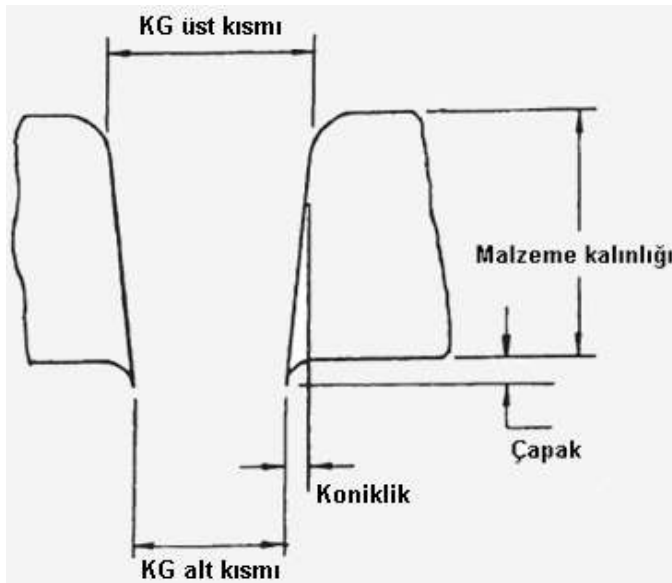
Şekil 3.3'de kesme mekanizmaları sonucu malzeme yüzeyinde oluşan mikro profile bir örnek verilmiştir. Çevresel kenar olarak adlandırılan ilk bölge (üst yüzey) jetten ayrılan parçacıkların çarpmasıyla oluşan küçük kavisli kısımdır [4]. Kesme aşınmasıyla oluşan bölge, düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edildiği bölgedir. Küçük açılarla yüzeye çarpan aşındırıcıların sağladığı erozyon mekanizmasının sonucudur [29]. Deformasyon aşınması bölgesi, kinetik enerjisi azalan jet huzmesinin oluşturduğu bölgedir. Yüzeye çarpan aşındırıcılar kesme aşınması bölgesindeki gibi küçük çarpma açlarına değil, büyük çarpma açlarına sahiptirler. Bu bölgede etkin olan jet sapmasıyla birlikte yüzeyde birbirine paralel izlerin oluştuğu gözlenir.

ASJ ile kesme işleminde yüzey topografyası gibi kesme kalitesini belirleyen bir diğer ölçüt de kesme genişliğidir (KG). Şekil 3.4'de şematik görünümü verilen KG, yüzeyin üst kısmında jetten ayrılan parçacıkların neden olduğu plastik deformasyonla oluşan kavisli kısımla başlar. KG üst kısmı, alt kısımdan daha fazladır. Bunun bir nedeni, kesme derinliği arttıkça su

basıncının azalmasıdır. Plastik deformasyon, KG'nce devam ederek sünek malzemelerde çapak oluşumuna neden olur [31].



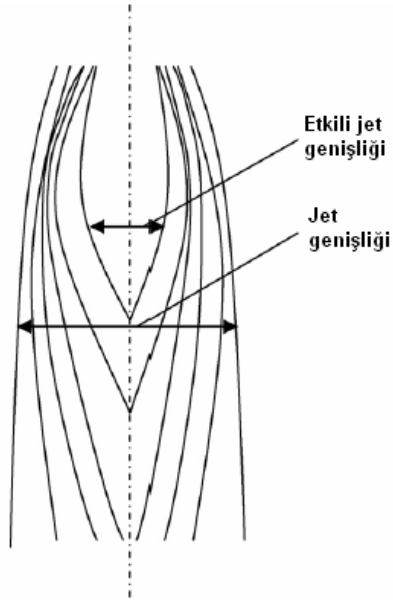
Şekil 3.3 ASJ ile kesilen yüzeyde gözlenen mikroyapı [30]



Şekil 3.4 KG geometrisi [31]

Hashish, ASJ'ni Şekil 3.5'deki gibi modelleyerek KG oluşumunu açıklamıştır. Buna göre jeti oluşturan partikül hızları, nozul duvarında sıfır, jet merkezinde ise maksimumdur. Bu hız dağılımı, jet içindeki enerji dağılımını gösterir. Şekil 3.5'de jetin iç kısmında görülen yüksek hızlı ve konverjan bölge KG

geometrisindeki konikliği yaratan bölgedir. KG, şekilde görülen etken jet genişliğine bağlıdır [3, 32].



Şekil 3.5 KG geometrisinin oluşumunda etkili olan jet modeli

ASJ ile elde edilen yüzey özelliklerini iyileştirmenin, kesme aşınması bölgesi derinliğini artırmanın, KG konikliğini azaltmanın yöntemi kesme parametrelerini optimize etmektir.

ASJ ile kesme performansını etkileyen parametreler aşağıda sıralandığı gibidir [19]:

#### Hidrolik Parametreler

- Pompa basıncı
- Orifis çapı

#### Kesme Parametreleri

- İlerleme

- Paso sayısı
- Nozul-iş parçası arası mesafe
- Jet giriş açısı

#### Karıştırma Parametreleri

- Odaklama çapı
- Odaklama uzunluğu

#### Aşındırıcı Parametreleri

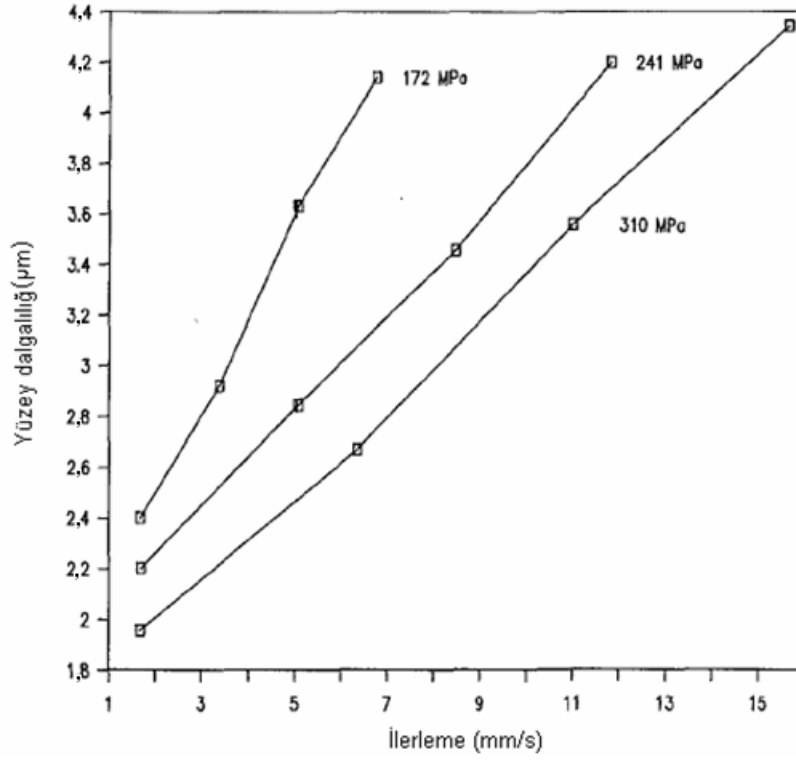
- Aşındırıcı debisi
- Aşındırıcı tane büyüklüğü
- Aşındırıcı tane boyutu dağılımı
- Aşındırıcı tane şekli
- Aşındırıcı sertliği

### 3.1. Hidrolik Parametrelerin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri

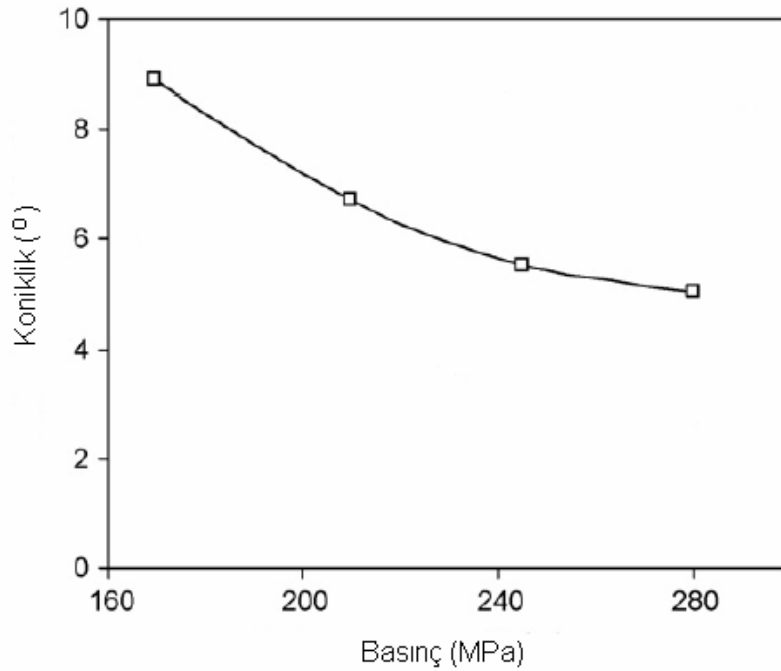
#### 3.1.1. Basınç etkisi

ASJ ile kesmede basınç artışı, aşındırıcı tanelerinin kinetik enerjisini artırmaktadır. Artan kinetik enerji ile kesme kabiliyeti artar ve düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerleri (Şekil 3.6) elde edilir [14,33]. Artan aşındırıcı kinetik enerjisi, kesme derinliğini ve talaş kaldırma hızını artırmaktadır [14]. Ayrıca, kesme profili konikliğinde de iyileşme sağlamaktadır (Şekil 3.7). Ancak, KG ve nozul aşınması açısından düşük

basınç değerleri gerekir [14]. Dolayısıyla ASJ ile kesmede, bu etkiler değerlendirilerek optimum basınç değeri seçilmelidir.



Şekil 3.6 Basıncın yüzey dalgalılığına etkisi [14]



Şekil 3.7 Basıncın kesme profili konikliğine etkisi [14]

### **3.1.2. Orifis çapı etkisi**

ASJ ile kesmede orifis çapı, su debisini etkileyen bir parametredir. Deneysel çalışmalar orifis çapının büyümesiyle aşındırıcı tane hızı ve su jetinin momentum kabiliyetinin arttığını göstermiştir. Bu da kesme derinliğini artırıcı bir etki yaratmaktadır [19]. Ancak, orifis çapının eşik değerini aşmasıyla bu etkinin tersi gözlenmektedir. Seramiklerin ASJ ile kesilmesini konu alan deneysel çalışmada kesme derinliğinin büyük orifis çaplarıyla azaldığı gösterilmiştir [19,34]. Maksimum kesme performansı için optimum orifis çapı seçilmelidir.

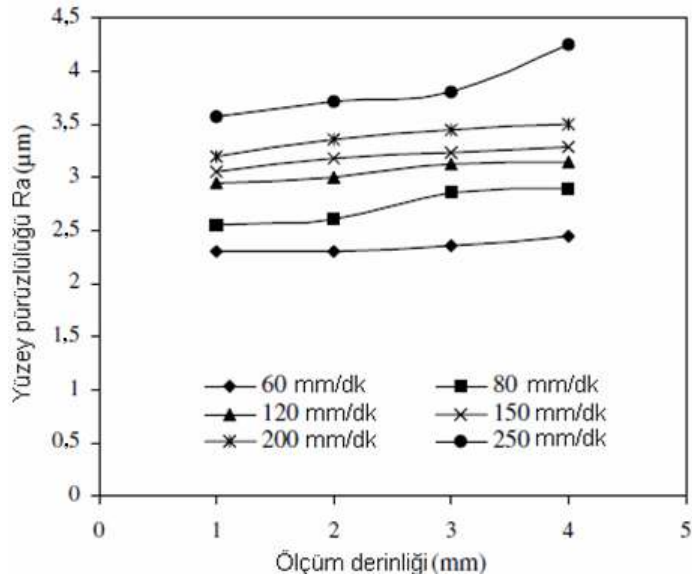
## **3.2. Kesme Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri**

### **3.2.1. İlerleme hızı etkisi**

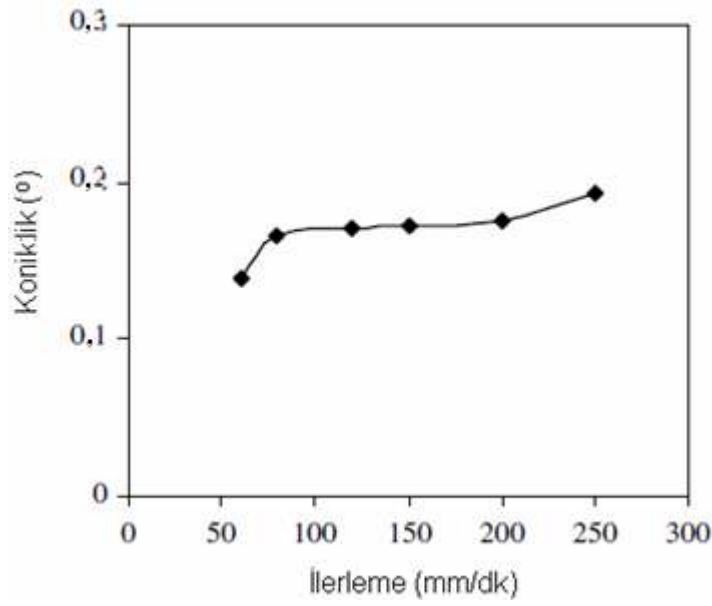
İlerleme hızındaki artış, birim zamanda yüzeye gelen aşındırıcı miktarının düşmesi anlamına gelmektedir. Kesme aşınma bölgesinde daralma, deformasyon aşınma bölgesinin artış sağlayan bu etki, yüzey pürüzlülüğü değerinde (Şekil 3.8) ve kesme profili konikliğinde de (Şekil 3.9) artışa sebep olmaktadır [30,31]. Ayrıca ilerlemenin artmasıyla, yüzeyin karakteristiğini belirleyen parametrelerden biri olan dalgalılık değerinde de artış gözlenmektedir.

### **3.2.2. Paso sayısı etkisi**

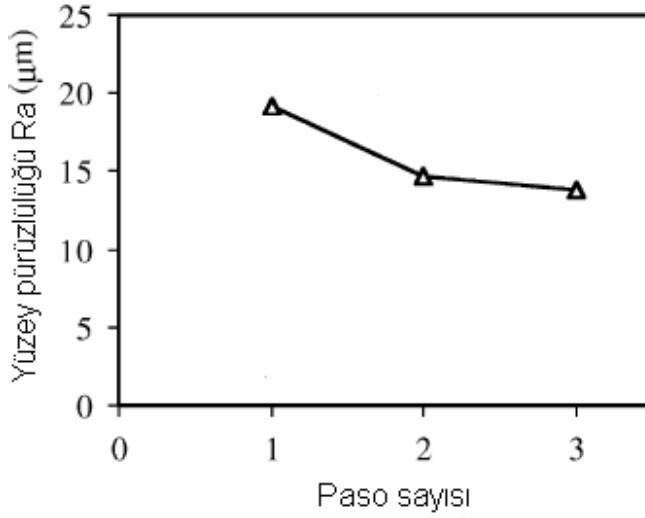
ASJ ile kesme işleminde paso sayısının artırılması, talaş kaldırma hızını ve kesme derinliğini artırmaktadır [19]. Ayrıca, düşük yüzey pürüzlülüğü (Şekil 3.10) ve koniklik açıları (Şekil 3.11) elde edilmesinde de etkili olmaktadır. Şekil 3.11 (b)'de çok pasolu kesimin, sabit ilerleme hızında kesme profili konikliğinde iyileşme sağladığı görülmektedir. Şekil 3.11 (a)'da ikinci ve üçüncü pasolarda ilerleme hızının artırılmasıyla daha küçük koniklik açılarının elde edildiği görülmektedir [35].



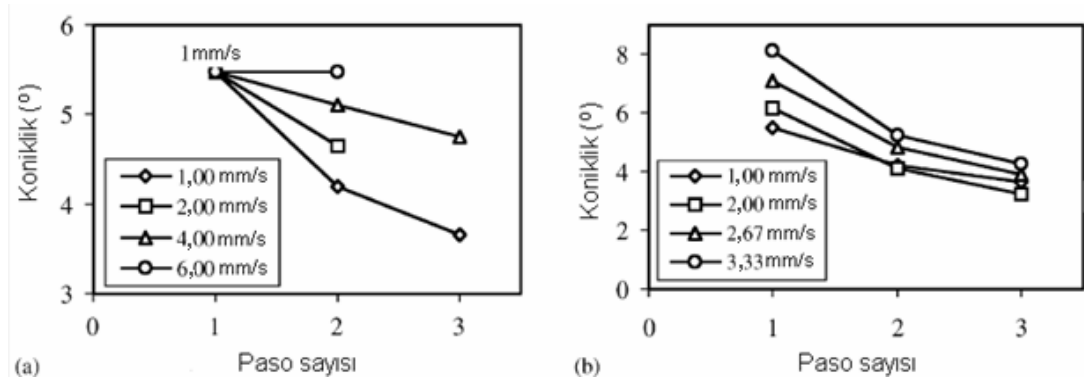
Şekil 3.8 İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [30]



Şekil 3.9 İlerleme hızının kesme profili konikliğine etkisi [30]



Şekil 3.10 Paso sayısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [35]



Şekil 3.11 (a) Çok pasolu kesimde farklı ilerleme hızlarının kullanılmasının konikliğe etkisi (b) Sabit ilerleme hızlarında paso sayısının artırılmasının konikliğe etkisi [35]

### 3.2.3. Nozul-iş parçası arası mesafe etkisi

Nozuldan çıktığı andan itibaren ASJ çapı, dolayısıyla etken su jeti çapı büyür. Nozul-iş parçası arası mesafesinin artmasıyla bu büyüme daha fazla olduğundan kesme genişliği ve kesme konikliği de artmaktadır. Ayrıca, nozul-iş parçası arası mesafenin artması ASJ kinetik enerjisinin düşmesine ve kesme aşınma bölgesinin daralmasına neden olmaktadır.

### **3.2.4. Jet giriş açısı etkisi**

Deneysel çalışmalar, ASJ ile kesmede sünek ve kırılğan malzemelerde farklı jet giriş açılarıyla maksimum kesme derinliğinin elde edildiğini ortaya koymuştur. Çalışmalarda paslanmaz çelik ve alüminyum kesimlerinde  $75^\circ$  ve  $80^\circ$  jet giriş açılarıyla maksimum kesme derinliği elde edilmiştir [19]. Kompozit malzeme gibi kırılğan davranış sergileyen malzemelerde ise bu açının  $90^\circ$  olduğu gözlenmiştir [19]. Ayrıca deneysel çalışmalarda, sertliği düşük aşındırıcı ile çalışıldığında talaş kaldırma performansının maksimum olduğu açı  $90^\circ$  olarak gözlenirken sert aşındırıcı ile bu değerin  $120^\circ$  olduğu görülmüştür [19].

## **3.3. Karıştırma Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri**

### **3.3.1. Odaklama çapı etkisi**

Deneysel çalışmalar, nihai aşındırıcı tane hızının aşındırıcı-su-hava yoğunluğuna bağlı olduğunu göstermiştir [19]. Geniş odaklama çapı, daha fazla havanın karışıma dahil olmasını sağlamaktadır. Bu da karışım yoğunluğunu ve aşındırıcı tane hızını düşüren bir etkidir. Dolayısıyla küçük odaklama çapı ile yüksek aşındırıcı tane hızı elde edilmektedir. Ancak, çok küçük odaklama çapı, anormal sürtünmelere, aşındırıcı tane çarpışmalarına ve kırılmalarına neden olur. Bu etkiler değerlendirildiğinde odaklama çapının optimize edilerek uygun değerin seçilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır [19].

### **3.3.2. Odaklama boyu etkisi**

Odaklama boyu belli bir değere kadar arttıkça kesme derinliğinde de artma gözlenmektedir. Bu değer aşındırıcı tanelerinin yeterli ivmeyi kazanabilmesine olanak sağlayan uzunluktur. Bu kritik değer aşıldığında aşındırıcı tanelerinin hızını azaltan sürtünme kuvveti etkili olmaya

başlamaktadır. Optimum odaklama boyunu belirleyen parametreler basınç, nozul-iş parçası arası mesafe ve aşındırıcı debisidir. Basıncın artması ile hızı artan su jetinin, aşındırıcı tanelerini ivmelendirme kapasitesi de artmaktadır. Bu işlem, daha uzun odaklama boyu gerektirir. Nozul-iş parçası arası mesafenin artması da uzun odaklama boyu gerektirirken, artan aşındırıcı debisi ile kısa odaklanma boyu tercih edilmelidir [19].

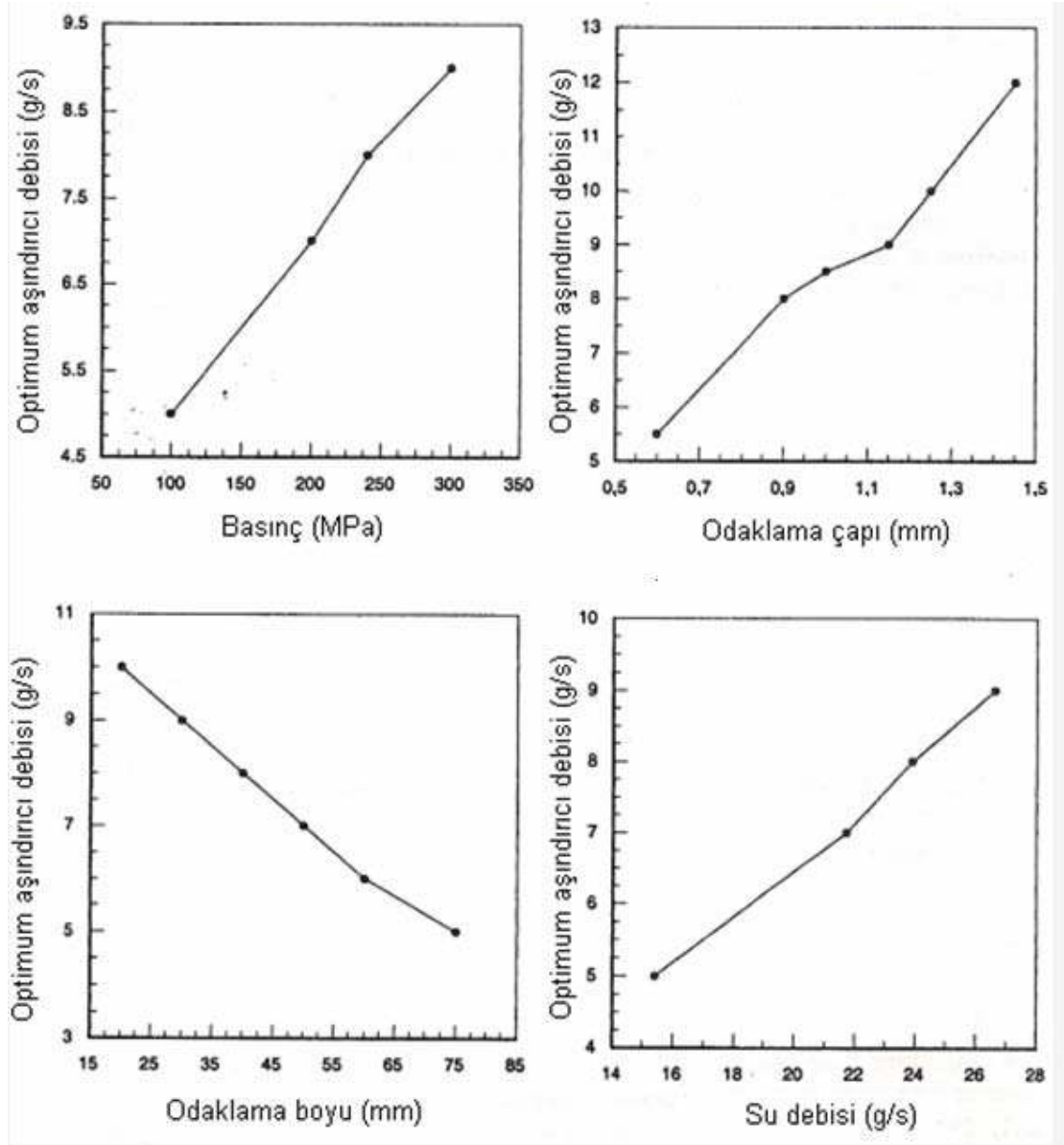
### **3.4. Aşındırıcı Parametrelerinin ASJ ile Kesme Performansına Etkileri**

#### **3.4.1. Aşındırıcı debisi etkisi**

Yüksek aşındırıcı debisi, kesme esnasında yüzeye çarpan aşındırıcı tane sayısının artması anlamına gelmektedir. Bu etki kesme performansını artırarak düşük yüzey pürüzlülüğü ve koniklik açıları elde edilmesi sağlamaktadır. Ancak aşındırıcı debisi de diğer parametreler gibi optimum değerini aştığında farklı mekanizmaların devreye girmesiyle kesme performansını olumsuz yönde etkilemeye başlamaktadır. Su jetinin sınırlı kinetik enerjisinin çok fazla aşındırıcı tarafından paylaşılmasıyla birim aşındırıcı tanesine düşen kinetik enerji, iş parçasını kesebilmesi için gerekli olan eşik değer altına düşebilmektedir. Ayrıca yüksek aşındırıcı debisi anormal tane çarpışmalarına sebep olarak kesme performansı düşürmektedir. Optimum aşındırıcı debisi diğer kesme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 3.12) [19].

#### **3.4.2. Aşındırıcı tane büyüklüğü etkisi**

Tane boyutu olarak aşındırıcılar değerlendirildiğinde daha kaba tanelerin incelere oranla daha yüksek hızlarla kullanılabildiği görülür. İnce tanecikler ise daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sağlar [18]. En çok tercih edilen aşındırıcı boyutu 80 meş'dir.



Şekil 3.12 Optimum aşındırıcı debisinin diğer kesme parametreleriyle ilişkisi [19]

### 3.4.3. Aşındırıcı boyut dağılımı etkisi

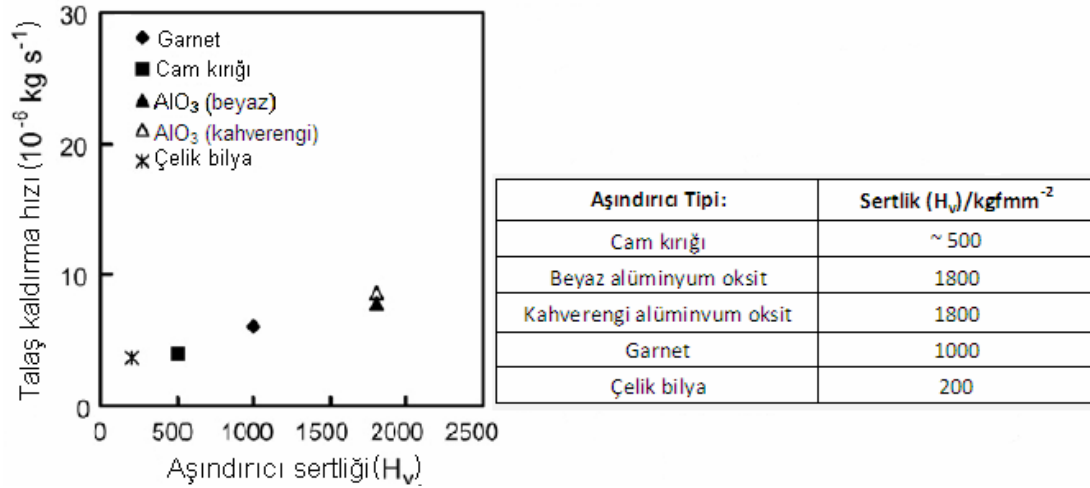
Tane boyutu dağılımı aşındırıcı kalitesi açısından önemli bir parametredir. Kaba veya çok ince boyutta tanecikler nozulun tıkanmasına sebep olurlar. En kaba tane boyutu için genel kural, nozul çapının yarısından daha küçük olmasıdır. İstikrarlı bir kesim kalitesi için tane boyutu aralığının mümkün olduğunca dar olması gerekir [18].

### 3.4.4. Aşındırıcı tane şekli etkisi

Keskin köşeler ve düzensiz tane yapısı, kesme işlemini kolaylaştırır. Kesme esnasında yuvarlak yapının aksine daha büyük kesme kuvveti sağlar [18].

### 3.4.5. Aşındırıcı sertliği etkisi

Deneyisel çalışmalar, kesme derinliğinin aşındırıcı sertliğiyle arttığını göstermektedir. Ayrıca daha sert aşındırıcı malzeme ile daha yüksek ilerleme hızları kullanılabilmektedir. Sert aşındırıcılar için suyla karışma ve sonrasında ivmelenme esnasında kırılarak keskin köşeler oluşturma mekanizması, düşük sertlikteki aşındırıcılara oranla daha iyidir. Bu da sünek malzemelerin işlenmesinde kolaylık sağlar [19]. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerlerinin de artan aşındırıcı sertliğiyle düştüğü gözlenmektedir. Şekil 3.13’de, Ti6Al4V alaşımının ASJ ile kesiminde aşındırıcı sertliğinin talaş kaldırma hızına etkisi görülmektedir. [36].



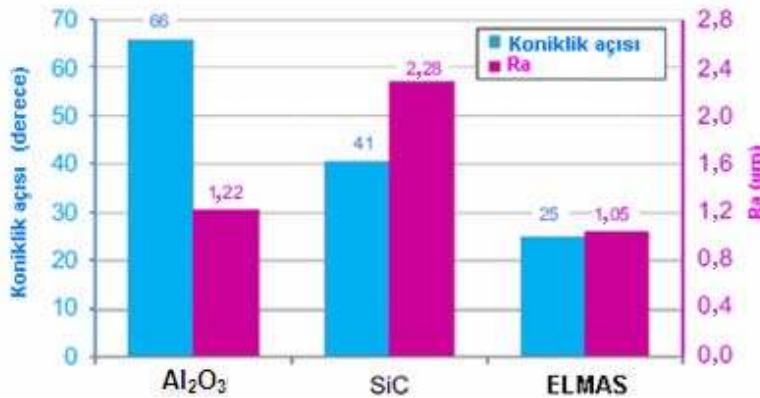
Şekil 3.13 Aşındırıcı sertliğinin talaş kaldırma hızına etkisi [36]

#### 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

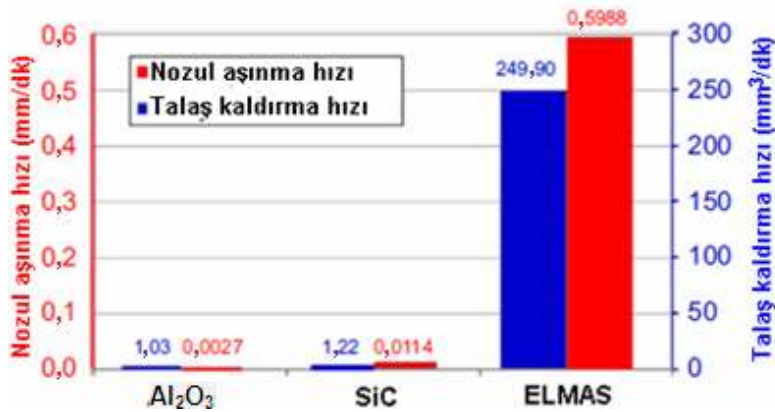
John L. Ohman [18], çalışmasında aşındırıcıların karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin ASJ ile kesme performansına ve maliyetine olan etkilerinden bahsetmiştir. Aşındırıcı sertliğinin ASJ ile kesme hızını ve kesme derinliğini artırdığını tespit etmiştir. Keskin köşeli aşındırıcıların, yuvarlak yapılı aşındırıcılara göre daha yüksek kesme kuvvetleri oluşturarak erozyon işlemini daha etkili gerçekleştirdiklerine dikkat çekmiştir. Tane büyüklüğü açısından daha kaba olan aşındırıcıların, örneğin 50 meş, daha yüksek kesme hızlarında kullanılabildiğini, daha ince yapılı aşındırıcılarla, örneğin 120 meş, yüzey kalitesi bakımından daha iyi kesimler elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca dar tane boyut aralığının kesme kalitesini artırdığını vurgulamıştır.

D.A. Axinte ve arkadaşları [37], PCD (polycrystalline diamond) plakaların ASJ ile kesilebilirliğini gözlemlemek üzere yaptıkları deneysel çalışmalarında farklı aşındırıcılar kullanmışlardır. Testlerde aşındırıcı tipi, ilerleme hızı ve aşındırıcı debisi değişken olarak belirlenirken, basınç, nozul-iş parçası arası mesafe, aşındırıcı boyutu sabit tutulmuştur. Test malzemesi olarak CTH025 (HK = 52 GPa), CTC002 (HK = 48 GPa), CTB002 (HK = 50 GPa) kalitelerinde PCD malzemeler kullanılmıştır. İlk olarak garnet tozunun kullanıldığı kesimlerde garnet'in PCD kesmek için uygun bir aşındırıcı olmadığı görülmüştür. Garnet, 0.1 mm/dk gibi çok küçük ilerleme hızlarında PCD kesebilmiştir. Daha sonraki denemeler  $Al_2O_3$  (9 Mohs), SiC (9.5 Mohs), elmas (10 Mohs) aşındırıcılarla yapılmıştır. Üç tip aşındırıcıyla yapılan kesimlerde, birbirine yakın kesme parametreleri kullanıldığında aşındırıcı kristal yapısı ve sertliğinin kesme performansına etkisi açıkça görülmektedir. Kristal yapısı keskin köşelere sahip ve sertliği yüksek aşındırıcı ile çalışmak, kesme performansını artırmaktadır. 7,5-8 Mohs sertliğindeki garnet, PCD kesiminde etkili olamamıştır;  $Al_2O_3$  (9 Mohs) ve SiC (9,5 Mohs) beklendiği şekilde çok yaklaşık sonuçlar vermiştir. Oldukça sert yapısıyla elmas, PCD kesiminde iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 4.1'de aşındırıcı tipinin KG koniklik

açısı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi görülmektedir. Elmas, hem düşük KG koniklik açısı vermekte hem de yüzey kalitesi açısından tatmin edici değerler sunmaktadır. Şekil 4.2’de testlerde elde edilen nozul aşınma hızları ve talaş kaldırma hızları verilmiştir. Tungsten karbür (9 Mohs) nozul ile yapılan testlerde elmas aşındırıcının talaş kaldırma hızı diğer aşındırıcılara göre 200 kat fazla iken beklendiği üzere sertliği kendinden daha düşük nozul için aşınma hızı diğer aşındırıcılara oranla 52 kat daha fazladır. Endüstride yaygın kullanılan aşındırıcı tipi garnet olduğundan nozul malzemesi olarak tungsten karbür kullanımı yaygındır.  $Al_2O_3$ , SiC, elmas aşındırıcılara ASJ endüstrisinde daha fazla ihtiyaç duyulursa, imalat teknolojisi daha sert ve aşınma dayanımı yüksek nozullar geliştirmek durumunda kalacaktır [37].

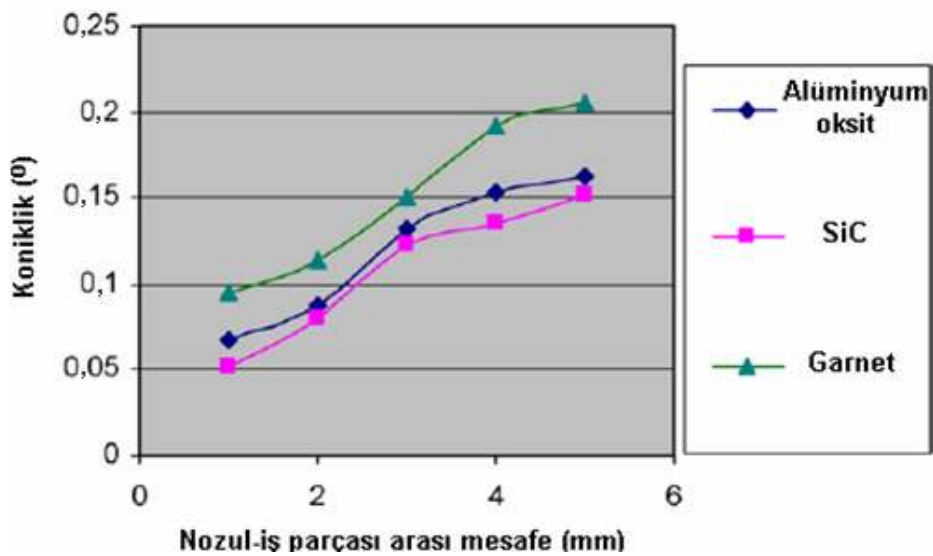


Şekil 4.1 Aşındırıcı tipinin koniklik oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi [37]

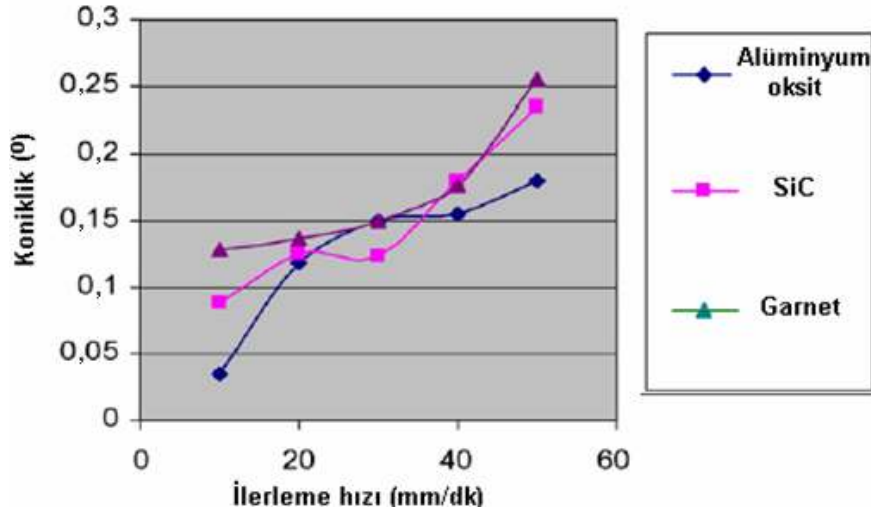


Şekil 4.2 Aşındırıcı tipinin nozul aşınma hızı ve talaş kaldırma hızına etkisi [37]

A. A. Khan ve M.M. Haque [38], makalelerinde aşındırıcı olarak garnet, alüminyum oksit ve silikon oksit kullanarak yapılan deneysel çalışmaların çıktısını sunmuşlardır. Çalışmada kullanılan hedef malzeme, sertliği 600 HK, özağırlığı  $2200 \text{ kg/m}^3$ , çekme dayanımı  $70 \text{ MN/m}^2$  olan camdır. Kullanılan aşındırıcıların sertlikleri ise, garnet, 1350 HK;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2100 HK; SiC, 2500 HK'dır. Tüm kesimlerde profilin üst kısmındaki KG'nin, alt taraftakinden fazla olduğu görüşmüştür. Çünkü jet, parçanın alt taraflarına doğru kinetik enerjisini kaybetmeye başlamakta ve jetin etkili bölgesinde daralma gözlenmektedir. Tüm aşındırıcılar için nozul-iş parçası arası mesafenin artmasıyla KG konikliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Koniklik, garnet ile yapılan kesimde en fazla olmakla birlikte garnet aşındırıcıyı sırasıyla  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve SiC izlemektedir. SiC, deneysel çalışmada kullanılan en sert aşındırıcı olması dolayısıyla kesimin sonuna dek kesme özelliğini en çok koruyan aşındırıcıdır. Bu özelliği, kesme profilinde yarattığı konikliğin de daha küçük olmasını sağlamaktadır. Tüm aşındırıcı tipleri için ilerleme hızındaki artış, kesme profili konikliğinin de artmasına neden olmaktadır (Şekil 4.3). Tüm aşındırıcı tipleri için basınç artışı, kesme profili konikliğinde iyileşme sağlamaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.3 Nozul-iş parçası arasındaki mesafenin kesme profili konikliğine etkisi [38]



Şekil 4.4 İlerleme hızının kesme profili konikliğine etkisi [38]

M.A. Azmir ve A.K. Ahsan [39], cam/epoksi katmanlı kompozit malzemenin ASJ ile kesilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, aşındırıcı olarak alüminyum oksit ve garnet kullanılarak kesme parametrelerinin yüzey özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada değişken olarak, aşındırıcı tipi ( $Al_2O_3$ , garnet), basınç, nozul-iş parçası arası mesafe, aşındırıcı debisi, ilerleme hızı, serim açısı seçilmiştir. Orifis çapı, nozul çapı, nozul boyu sabit tutulan parametrelerdir.

Parametrelerin eşleştirilmesi ve kesim konfigürasyonları seçimi, Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 20 mm x 20 mm x 5,4 mm boyutlarında hazırlanmış ve testlerde numunelere 10 mm boyunda kanallar açılmıştır. Testler sonrasında yüzey kalitesi, kesme profili üst ve alt yüzeyinden 0,5 mm bırakılarak ölçülmüştür. Üç ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Üst ve alt KG ölçülerek kesme konikliği hesaplanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Daha sert bir aşındırıcı olan alüminyum oksit yüzey kalitesi açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Basınç artışı ile aşındırıcı kinetik enerjisi ve talaş kaldırma kapasitesi artar. Dolayısıyla basınç artışı, daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Kesme profili konikliği de basınç artışı ile

azalmaktadır. Nozul-iş parçası arası mesafenin artışı, su jetinin iş parçasına çarpmadan genişlemesine, dolayısıyla jet çapının büyümesine neden olmaktadır. Düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme konikliği değerleri için daha düşük nozul-iş parçası arası mesafesi tercih edilmelidir. Yüksek aşındırıcı debisi, kesme anında yüzeye daha fazla aşındırıcının çarpması demektir. Bu hem kesme derinliğini hem de yüzey kalitesini artırmaktadır. Kesme profili konikliğinin azalmasını sağlamaktadır. Yüksek ilerleme hızı kesme yüzeyine daha az aşındırıcının çarpması demektir. Dolayısıyla ilerleme hızındaki artış, yüzey pürüzlülüğü değerinin ve kesme profili konikliğinin artmasına neden olmaktadır. Kompozit malzemenin serim açısı, kesme kalitesini etkilememektedir. Testlerde değişken olarak kullanılan parametrelerden yüzey kalitesini en çok etkileyen parametreler basınç ve aşındırıcı tipidir.

G. Fowler ve arkadaşları [36], Ti6Al4V, titanyum alaşımının su jeti ile frezelenmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında basınç, aşındırıcı debisi, boyutu ve nozul-iş parçası arası mesafesini sabit tutarak nozul ilerleme hızının ve aşındırıcı tipinin yüzey özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Testlerde kullanılan aşındırıcılar, serlikleri ve şekil etkenleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ti6Al4V numuneler 50mm x 230 mm boyutlarında olup kalınlık 17 mm'dir. Bütün aşındırıcılar için talaş kaldırma hızının, en düşük ilerleme hızında en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde, yüksek ilerleme hızlarında yüksek değerler elde edilmiştir. Ancak yüzey dalgalılığında artan ilerleme hızıyla birlikte önemli bir azalma gözlenmiştir. Talaş kaldırma hızı ve yüzey dalgalılığı, aşındırıcı sertliğiyle birlikte artmıştır. Şekil etkeni, aşındırıcı tane yapısının ifadesidir. Aşındırıcı tanenin mikroskop yardımıyla belirlenen en küçük çapının en büyük çapına oranıdır. Büyük şekil etkenine sahip aşındırıcı tane yuvarlak yapıda olup küçük şekil etkenine sahip tane daha düzensiz yapıdadır. Çalışmada, şekil etkeninin yüzey dalgalılığı üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 Testlerde kullanılan aşındırıcı tipleri [36]

| Aşındırıcı tipi            | Sertlik ( $H_v$ )/kgfmm <sup>-2</sup> | Şekil etkeni |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Cam kırığı                 | ~ 500                                 | 1,0          |
| Beyaz alüminyum oksit      | 1800                                  | 0,4          |
| Kahverengi alüminyum oksit | 1800                                  | 0,7          |
| Garnet                     | 1000                                  | 0,7          |
| Çelik bilya                | 200                                   | 1,0          |

## 5. MATERYAL VE METOT

### 5.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Donanım

#### 5.1.1. Aşındırıcı tozlar

##### Garnet

Garnet ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ), ASJ ile kesme işleminde en yaygın kullanılan aşındırıcıdır. Fiyatı, 700 \$/ton olan garnet Avustralya ve Hindistan'dan temin edilebilmektedir. Deneylerde kullanılan garnet toz boyutu, 80 meş'dir. Aşağıda garnet tozuna ait özellikler verilmiştir [40].

Çizelge 5.1 Garnet aşındırıcının kimyasal bileşimi [40]

| GARNET KİMYASAL BİLEŞİMİ |           |
|--------------------------|-----------|
| $\text{SiO}_2$           | 36%       |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$  | 20%       |
| $\text{FeO}$             | 30%       |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$  | 2%        |
| $\text{TiO}_2$           | 1%        |
| $\text{MnO}$             | 1%        |
| $\text{CaO}$             | 2%        |
| $\text{MgO}$             | 6%        |
| Toplam klorür            | < 0,0025% |
| Serbest demir            | < 0,01%   |
| Bakır                    | < 0,01%   |
| Diğer ağır metaller      | < 0,01%   |
| Sülfür                   | < 0,01%   |

Çizelge 5.2 Garnet aşındırıcının mineral bileşimi [40]

| GARNET MİNERAL BİLEŞİMİ |        |
|-------------------------|--------|
| Garnet (almandit)       | 97-98% |
| Ilmenit                 | 1-2%   |
| Zirkon                  | < 0,2% |
| Kuvars (serbest silica) | < 0,5% |
| Diğer mineraller        | <0,25% |

Çizelge 5.3 Garnet aşındırıcının fiziksel özellikleri [40]

| FİZİKSEL ÖZELLİKLER |                                       |
|---------------------|---------------------------------------|
| Kütle yoğunluğu     | 2,38 T/m <sup>3</sup>                 |
| Özgül ağırlık       | 4,10 g/cm <sup>3</sup>                |
| Sertlik             | 7,5-8 mohs                            |
| Ergime noktası      | 1250 °C                               |
| Şekil               | Düzensiz, keskin köşeli, kübik yapılı |
| Renk                | Kırmızı-pembe                         |

### Kolemanit

Deneylerde kullanılan kolemanit ( $\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3\text{H}_2\text{O}$ ), ETİ MADEN İŞLETMELERİ Teknoloji Geliştirme Dairesi Başkanlığı aracılığıyla sağlanmış olup kimyasal bileşimi Çizelge 5.4'de, fiziksel özellikleri Çizelge 5.5'de verilmiştir [41].

Kolemanit, ticari öneme sahip bor mineralleri içinde en yaygın olanıdır. Suda yavaş, asitte (HCl) hızla çözünür. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek'de, dünyada ise ABD'de bilinen birçok yatak vardır [42]. Türkiye'de kolemanit cevherleri, ocaklardan alındıktan sonra kırılmakta, yıkanmakta ve sınıflandırılarak konsantre olarak yurtiçi veya yurt dışı pazarda hammadde veya direkt ürün olarak kullanılmaktadır. Hammadde olarak borik asit, boraks, sodyum perborat üretiminde kullanılırken, sodyumun tercih edilmediği tekstil kalite cam elyafı gibi cam sanayisinde kolemanit direkt kullanılabilir.

Türkiye bor rezervinin %64.4'ünü oluşturan kolemanit, tek ham ve rafine bor üreticimiz ve ihracatçımız durumundaki Eti Maden İşletmeleri'nin bor mineralleri arasında en yüksek satış miktarına sahip mineraldir. Yurtiçi satış fiyatı 210 \$/ton'dur.

Çizelge 5.4 Kolemanit kimyasal bileşimi [41]

| BİGADIÇ KOLEMANİTİ KİMYASAL ÖZELLİKLERİ |                  |
|-----------------------------------------|------------------|
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | % 35,0 (+/- 1,0) |
| CaO                                     | % 27,0 (+/- 2,0) |
| SiO <sub>2</sub>                        | % 8,0 maks.      |
| SO <sub>4</sub>                         | %0,7 maks.       |
| As                                      | 50 ppm maks      |

Çizelge 5.5 Kolemanit fiziksel özellikleri [41]

| BİGADIÇ KOLEMANİTİ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ |                        |
|-----------------------------------------|------------------------|
| Kristal sistemi                         | Monoklinik             |
| Sertlik                                 | 4,5 Mohs               |
| Özgül ağırlık                           | 2,42 g/cm <sup>3</sup> |
| Dilinin                                 | {010}                  |
| Renk ve şeffaflık                       | Renksiz, yarı şeffaf   |
| Parlaklık                               | Camsı                  |

### Zeolit

Deneylerde kullanılan zeolit, ETİ MADEN İŞLETMELERİ Teknoloji Geliştirme Dairesi Başkanlığı aracılığıyla sağlanmış olup kimyasal bileşimi Çizelge 5.6'da verilmiştir [41].

Çizelge 5.6 Zeolit kimyasal bileşimi [43]

| ZEOLİT KİMYASAL BİLEŞİMİ |                  |                                |      |                  |      |                                |                   |                  |                               |      |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| Bileşen                  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | K <sub>2</sub> O | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  |
| %                        | 77,97            | 13,17                          | 3,80 | 2,20             | 1,53 | 1,06                           | 0,16              | 0,08             | 0,03                          | 0,01 |

Ülkemizin, bor madeninden daha kıymetli ve gelecek vadede zenginliği olarak nitelendirilen zeolit, bor minerallerinin üst kısmını kaplayan, kristal yapıda hidrasyona uğramış alüminyum silikattır. Toplam dünya rezervinin %40'ının Türkiye'de olduğu tahmin edilen madene geleceğin hammaddesi gözüyle bakılmaktadır.

Doğal zeolitler, 40'ı aşkın mineralden oluşmuş bir grubun ismidir [44]. Ülkemizde Balıkesir-Bigadiç bölgesindeki yataklardan elde edilen doğal zeolit ve klinoptilolit, zeolitin en bilinen türüdür. Sertliği 3 Mohs'dur. Herhangi bir Zeolit kristalinin en küçük yapı birimi SiO<sub>4</sub> veya AlO<sub>4</sub>'dür. Boşluk miktarı toplam hacmin %20'si ile %50'si arasındadır. Zeolit minerallerinin en önemli özelliği bu boşluklar ve bu boşluklara kolayca girebilen ve yer değiştirebilen sıvı ve gaz molekülleri nedeni ile toprak alkali iyonlardan ileri gelen "moleküler elek" olmasıdır.

Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan iyon değişikliği yapabilme, absorpsiyon ve moleküler elek yapısı, silis içeriği, tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenekli yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarını sağlamıştır [44].

Zeolitin kullanım alanları şöyledir:

- Kirlilik kontrolü, enerji, tarım-hayvancılık, maden-metalurji, uzay araştırmaları, peyzaj mimarisi, kağıt, inşaat, sağlık sektörü ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır.

- Nükleer santral atıklarında bulunan ve çevre sağlığı açısından tehlikeli olan maddeler zeolitlerle tutulmaktadır.
- Baca gazlarının, petrol sızıntılarının, çöp depolama alanlarının temizlenmesi, oksijen üretimi, nem ve haşere kontrolünde de zeolit kullanılmaktadır.
- Elektronik devrelerde mikroçiplerin hızını artırmakta kullanılmaktadır.
- NASA, topraksız bitki yetiştirmede en önemli malzeme olarak kullanmaktadır.
- Arsenik, bakır ve kurşun alaşımlarının sertleştirilmesi, boya pigment uygulamaları, cam, tekstil ve çeşitli sanayi dallarında kullanılmaktadır. ABD'nin Çevre Koruma Organizasyonu EPA, arseniği birinci derecede kanserojen maddeler grubuna sokmuş ve sularda müsaade edilen miktarı 5ppm'den daha az'a indirmiştir. Zeolit arsenik iyonları içeren suyla temas ettirildiğinde, sudaki arsenik zeolit tarafından tutulmaktadır.

### 5.1.2 Kesilen malzemeler

#### Al7075

Al7075 numune kalınlığı 10 mm'dir. Mekanik özellikleri ve Kimyasal bileşimi sırasıyla Çizelge 5.7 ve 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Al 7075 mekanik özellikleri [45]

| Al7075 MEKANİK ÖZELLİKLER |     |
|---------------------------|-----|
| Çekme dayanımı (MPa)      | 476 |
| Akma dayanımı (MPa)       | 393 |
| % Uzama                   | 7   |

Çizelge 5.8 Al 7075 kimyasal bileşimi [45]

| Al7075 KİMYASAL BİLEŞİMİ |                  |          |
|--------------------------|------------------|----------|
| Element                  | %                |          |
|                          | Minimum          | Maksimum |
| Zn                       | 5,10             | 6,10     |
| Mg                       | 2,10             | 2,90     |
| Cu                       | 1,20             | 2,00     |
| Cr                       | 0,18             | 0,28     |
| Mn                       | -                | 0,30     |
| Fe                       | -                | 0,50     |
| Si                       | -                | 0,40     |
| Ti                       | -                | 0,20     |
| Diğer elementler         | -                | 0,15     |
| Al                       | Arta kalan kısım |          |

### Kompozit malzeme

Testlerde, Hexcel firmasına ait tek yönlü AS4 karbon elyaf ve 8552 epoksi reçine kullanılarak hazırlanmış kompozit levhalar kesilmiştir. Karbon prepreg tabakalı kompozit levhalar, %60 oranında elyaf içermektedir. Kompozit levhalar, 40 tabakadan oluşmaktadır. Dizilim sırası şöyledir:

+45/0/-45/0/-45/90/+45/0/+45/90/+45/90/+45/0/-45/90/90/-45/0/-45/-45/0/-45/90/90/-45/0/+45/90/+45/90/+45/0/+45/90/-45/0/-45/0/+45. AS4 karbon elyafın mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir [46].

Çizelge 5.9 AS4 karbon elyaf malzeme özellikleri [47]

| AS4 KARBON ELYAF MALZEME ÖZELLİKLERİ |      |
|--------------------------------------|------|
| Çekme dayanımı (MPa)                 | 4,43 |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )        | 1,79 |
| Lif çapı (µm)                        | 7,10 |
| Karbon içeriği (%)                   | 94,0 |

### Mermer

Testlerde kullanılan mermer türü burdur bejidir. Numune kalınlığı 25 mm olup kimyasal bileşimi Çizelge 5.10'da fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.10 Burdur beji kimyasal bileşimi [48]

| BURDUR BEJİ KİMYASAL BİLEŞİMİ  |         |
|--------------------------------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | % 0,15  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % 0,15  |
| CaO                            | % 55,60 |
| MgO                            | % 0,25  |

Çizelge 5.11 Burdur beji fiziksel ve mekanik özellikleri [48]

| BURDUR BEJİ FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ |         |
|---------------------------------------------|---------|
| Sertlik (Mohs)                              | 3,5 - 4 |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )          | 2,72    |
| Çekme dayanımı (MPa)                        | 64      |

### Ti6Al4V

Ti6Al4V numune kalınlığı 10 mm'dir. Kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 5.12 ve 5.13'de verilmiştir.

### Cam

Testlerde kullanılan cam numunelerinin kalınlığı 10 mm'dir. Kimyasal bileşimi Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 Ti6Al4V Kimyasal bileşimi [49]

| Ti6Al4V KİMYASAL BİLEŞİMİ |                  |          |
|---------------------------|------------------|----------|
| Element                   | %                |          |
|                           | Minimum          | Maksimum |
| Al                        | 5,50             | 6,75     |
| V                         | 3,50             | 4,50     |
| Fe                        | -                | 0,30     |
| O                         | -                | 0,20     |
| C                         | -                | 0,08     |
| N                         | -                | 0,05     |
| H                         | -                | 0,015    |
| Y                         | -                | 0,005    |
| Diğer elementler          | -                | 0,40     |
| Ti                        | Arta kalan kısım |          |

Çizelge 5.13 Ti6Al4V Mekanik özellikleri [49]

| MEKANİK ÖZELLİKLERİ  |     |
|----------------------|-----|
| Çekme dayanımı (MPa) | 893 |
| Akma dayanımı (MPa)  | 823 |
| % Uzama              | 10  |

Çizelge 5.14 Soda kalsik camı kimyasal bileşimi [50]

| SODA KALSİK CAMI KİMYASAL BİLEŞİMİ |      |
|------------------------------------|------|
| Element                            | %    |
| SiO <sub>2</sub>                   | 73,3 |
| CaO                                | 5,2  |
| MgO                                | 3,6  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 16   |
| K <sub>2</sub> O                   | 0,6  |

### 5.1.3. Tezgah

Deneyler, Zeki Yapı Sanayi'ne ASJ ile kesme tezgahında yapılmıştır. Resim 5.1'de basınçlandırma ünitesi, Resim 5.2'de ise tezgah gövdesi görülmektedir.



Resim 5.1 Basınçlandırma ünitesi



Resim 5.2 ASJ tezgahı

Çizelge 5.15 Testlerde kullanılan basınçlandırma ünitesi teknik özellikleri [51]

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| Pompa tipi             | HP 19/45-S       |
| Maksimum debi (l/dk)   | 4,2              |
| Basınç (MPa)           | 4500             |
| Ana motor (kW)         | 45               |
| Kontrol voltajı (V DC) | 24               |
| Tank hacmi (l)         | 200              |
| Gürültü seviyesi (dB)  | 75               |
| Boyutlar (cm)          | 244 x 99 x 139,5 |
| Ağırlık (kg)           | 1450             |

## 5.2. Tozların Öğütülmesi

Çalışma kapsamında kullanılacak zeolit ve kolemanit minerallerinin ASJ ile kesme işleminde aşındırıcı olarak kullanılabilmesi için uygun tane boyutuna getirilmesi gereklidir. Endüstride en yaygın kullanılan aşındırıcı boyutu 80 meş'dir. 80 meş olarak nitelendirilen aşındırıcı, içinde  $+150\ \mu\text{m}$  /  $-300\ \mu\text{m}$  boyut aralığında taneler barındırır [40]. Bu amaçla, kolemanit ve zeolit mineralleri,  $+150\ \mu\text{m}$  /  $-300\ \mu\text{m}$  boyut aralığında öğütülmüştür. Öğütme işlemi MTA ve Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü imkanları kullanılarak yapılmıştır. Kırma işlemi için merdaneli kırıcı kullanılmıştır. Merdaneli kırıcılar, kırma işleminin iki döner silindir arasında yapıldığı kırıcılardır. Merdaneler arası açıklık değiştirilerek elde edilen tanecik boyutu ayarlanabilmektedir (Resim 5.3). Merdaneli kırıcılarda kırılan kolemanit mineralleri, titreşimli elek yardımıyla istenilen boyutlarda sınıflandırılmıştır. Eleme işleminden sonra elde edilen kolemanit tozları Resim 5.4'de görülmektedir.



Resim 5.3 Merdaneli kırıcı

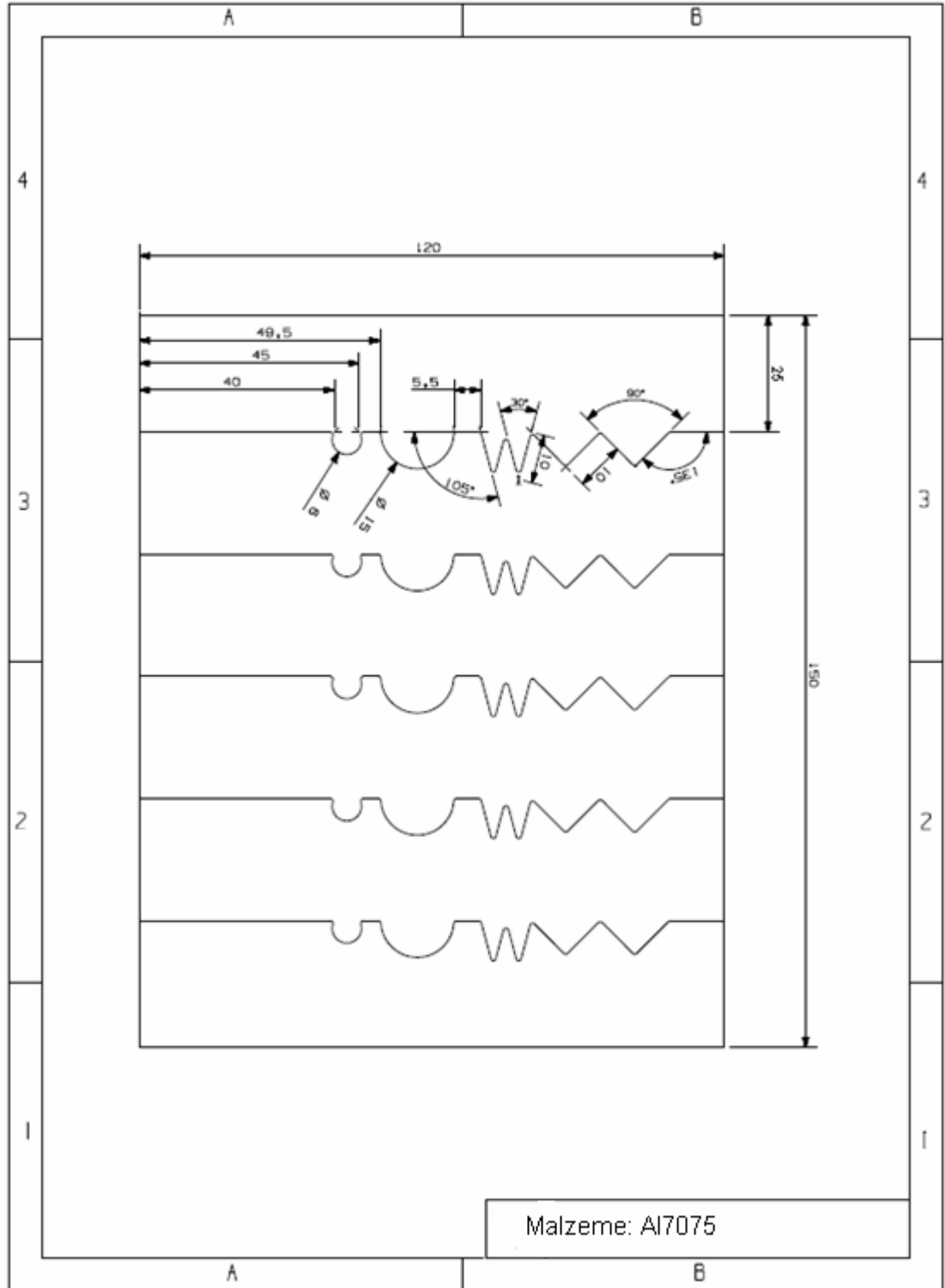


Resim 5.4 150  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  tane boyutu aralığında kolemanit tozu

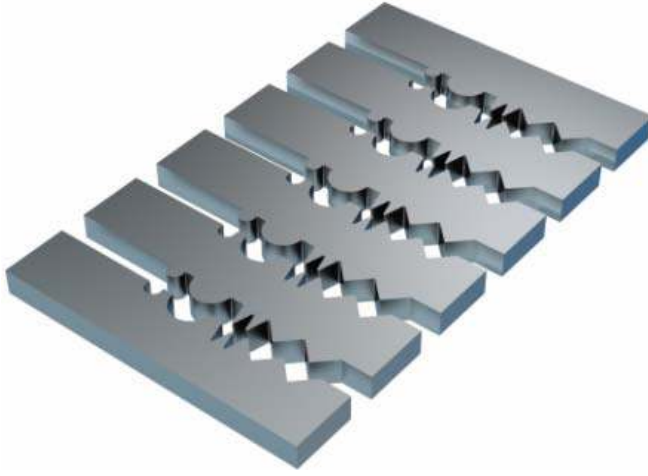
### 5.3. Yöntem

Deneysel çalışma kapsamında, zeolit ve kolemanit tozlarının ASJ ile kesme işleminde aşındırıcı olarak performansı test edilmiştir. Testlerde, endüstride ASJ ile kesilen malzemeler üzerinde denemeler yapılmıştır. İzlenen yol aşağıdaki gibi sunulmuştur:

- İlk kesimler garnet ile yapılmıştır. Kullanılan ilerleme ve aşındırıcı debisi değerleri endüstriyel uygulamalardan alınmıştır.
- Kesme geometrisi teknik resmi Şekil 5.1'de, katı model olarak görünüşü de Resim 5.5'de verilmiştir. Kesme geometrisinin şekildeki gibi seçilmesindeki amaç, aşındırıcılı su jetinin çeşitli geometrilerde (doğrusal, radyüslü ve açılı kesim, vb.) performansını gözlemlemektir.
- Testlerde sabit tutulan işleme parametreleri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Testlerde değişken olarak kullanılan parametreler ise aşındırıcı tipi, ilerleme hızı ve aşındırıcı debisidir (Çizelge 5.17).
- Kolemanit ve zeolitle yapılan kesimlerde, bu tozların sertliklerinin garnet aşındırıcıya göre düşük olması sebebiyle ilk olarak düşük ilerleme değerleri denenmiştir. Kolemanitin kesme performansı değerlendirilerek sonraki denemelerde parametreler tekrar ayarlanmıştır. Parametreler ayarlanırken dikkat edilen bir diğer nokta da değişken olarak alınan parametrelerin yüzey özelliklerine etkisini değerlendirebilme imkanı yaratabilmektir. Bunun için de kolemanitin kesebildiği malzemeler için üç farklı ilerleme ve üç farklı aşındırıcı debisi kullanılmıştır. Aşındırıcı debisi değerleri, literatürde kullanılan değerler ve tezgahın çıkabildiği maksimum aşındırıcı debisi (10 g/s) baz alınarak seçilmiştir.
- Kolemanit hacim olarak %30 ve %50 oranlarında garnet ile karıştırılarak tüm malzemeler, daha önce %100 garnet ile yapılan kesimlerde kullanılan parametrelerle kesilmiştir. Kolemanit katkısının yüzey özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1 Kesme geometrisi teknik resmi

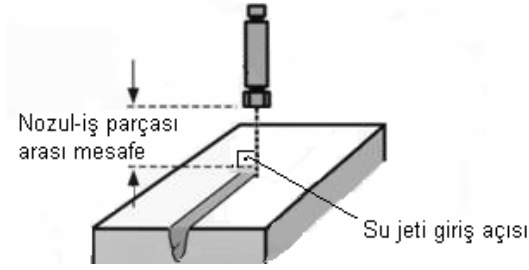


Resim 5.5 Kesme geometrisi

- ASJ ile yapılan doğrusal kesimde elde edilen yüzeyin pürüzlülüğü ve dalgalılığı, kesme genişliği ve kesme profili koniklik açısı, kesme performansını gösteren özelliklerdir [52]. Literatürde yüzey pürüzlülüğü değeri en yaygın olarak Ra, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile ifade edilir. Bu sebeple, kesilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ( $\mu\text{m}$ ), yüzey dalgalılığı ( $\mu\text{m}$ ) ve KG koniklik açısı ( $^\circ$ ) değerleri ölçülmüştür. Ra ve yüzey dalgalılığı terimleri EK1’de açıklanmıştır.

Çizelge 5.16 Testlerde sabit tutulan parametreler

| PARAMETRE                       |         |
|---------------------------------|---------|
| Basınç                          | 450 MPa |
| Orifis çapı                     | 0,25 mm |
| Nozul çapı                      | 1,02 mm |
| Nozul - iş parçası arası mesafe | 2 mm    |
| Aşındırıcı boyutu               | 80 meş  |
| Su jeti giriş açısı             | 90°     |



Şekil 5.2 Nozul-iş parçası arası mesafe ve su jeti giriş açısı

#### 5.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) ve Yüzey Dalgalılığı Ölçümleri

Kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı ölçümleri, Marsurf M300 yüzey kalitesi ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Çizelge 5.18’de ölçümlerde kullanılan cihaz özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.18 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı özellikleri[53]

|                               |                                                                     |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Ölçüm birimi                  | Metrik                                                              |
| Ölçüm ilkesi                  | Temaslı ölçüm                                                       |
| Ölçüm ucu (prob)              | 2 $\mu\text{m}$ uç radiuslu / 0,7 mN kuvvet uygulamalı endüktif ucu |
| Ölçüm ucu hareket boyu (mm)   | 17,5                                                                |
| Ölçüm ucu hareket hızı (mm/s) | 0,5                                                                 |

#### 5.5 Koniklik Ölçümleri

Kesilen numunelerin koniklik ölçümleri üç boyutlu koordinat ölçme tezgahında yapılmıştır. Tezgaha ait özellikler çizelge 5.19’da verilmiştir. ASJ ile kesmede dayama yüzeyi olarak kullanılan yüzey, koniklik ölçümünde de referans yüzey olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.19 Üç boyutlu koordinat ölçme cihazı özellikleri [54]

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| Marka                          | Hexagon       |
| Model                          | Global-070705 |
| Ölçme hızı (mm/s)              | 5             |
| Pozisyonlama hızı (mm/s)       | 300           |
| İvmelenme (mm/s <sup>2</sup> ) | 1000          |
| Hassasiyet (µm)                | 1,9           |

Çizelge 5.17 Testlerde değişken olarak kullanılan parametreler

| Test Numarası | Aşındırıcı                 | Kesilen Malzeme      | Kesme Parametreleri   |                         |
|---------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
|               |                            |                      | İlerleme Hızı (mm/dk) | Aşındırıcı Debisi (g/s) |
| 1             | Garnet                     | AL7075               | 200                   | 5                       |
| 2             |                            | Kompozit malzeme     | 750                   | 5                       |
| 3             |                            | Mermer (Burdur Beji) | 300                   | 5                       |
| 4             |                            | Cam                  | 300                   | 5                       |
| 5             |                            | Ti6Al4V              | 80                    | 5                       |
| 6             | Kolemanit                  | AL7075               | 80                    | 5                       |
| 7             |                            |                      | 80                    | 7,5                     |
| 8             |                            |                      | 80                    | 10                      |
| 9             |                            |                      | 40                    | 7,5                     |
| 10            |                            |                      | 100                   | 7,5                     |
| 11            | Kolemanit                  | Kompozit malzeme     | 250                   | 5                       |
| 12            |                            |                      | 250                   | 7,5                     |
| 13            |                            |                      | 250                   | 10                      |
| 14            |                            |                      | 170                   | 7,5                     |
| 15            |                            |                      | 100                   | 7,5                     |
| 16            | Kolemanit                  | Mermer (Burdur Beji) | 40                    | 10                      |
| 17            |                            |                      | 50                    | 10                      |
| 18            |                            |                      | 60                    | 10                      |
| 19            | Kolemanit                  | Cam                  | 50                    | 10                      |
| 20            | Kolemanit                  | Ti6Al4V              | 20                    | 10                      |
| 21            | %30 Kolemanit + %70 Garnet | AL7075               | 200                   | 5                       |
| 22            |                            | Kompozit malzeme     | 750                   | 5                       |
| 23            |                            | Mermer (Burdur Beji) | 300                   | 5                       |
| 24            |                            | Cam                  | 300                   | 5                       |
| 25            |                            | Ti6Al4V              | 80                    | 5                       |
| 26            | %50 Kolemanit + %50 Garnet | AL7075               | 200                   | 5                       |
| 27            |                            | Kompozit malzeme     | 750                   | 5                       |
| 28            |                            | Mermer (Burdur Beji) | 300                   | 5                       |
| 29            |                            | Cam                  | 300                   | 5                       |
| 30            |                            | Ti6Al4V              | 80                    | 5                       |
| 31            | Zeolit                     | AL7075               | 60                    | 10                      |
| 32            |                            | Kompozit malzeme     | 200                   | 10                      |
| 33            |                            | Mermer (Burdur Beji) | 40                    | 10                      |

## 6. DENEYSEL BULGULAR

### 6.1. Zeolit Tozu ile Yapılan Kesme Deneyleri

Zeolit, kompozit malzeme dışındaki hiçbir malzemenin kesiminde başarılı olamamıştır. Kompozit malzeme kesiminde de, kullanılan düşük ilerleme ve yüksek aşındırıcı debisine rağmen malzeme katmanlarında kopmalara neden olmuştur.

### 6.2. Kolemanit Tozu ile Yapılan Kesme Deneyleri

#### 6.2.1. Ön denemeler

- Kolemanit tozu ile Al7075, kompozit ve mermer (burdur beji) kesimleri gerçekleştirilebilmiştir.
- Cam kesimi testi, garnet tozuna göre çok küçük ilerleme hızıyla (Çizelge 6.1) yapılmasına rağmen kolemanitle başarılı sonuçlar elde edilememiş ve cam çatlamıştır.

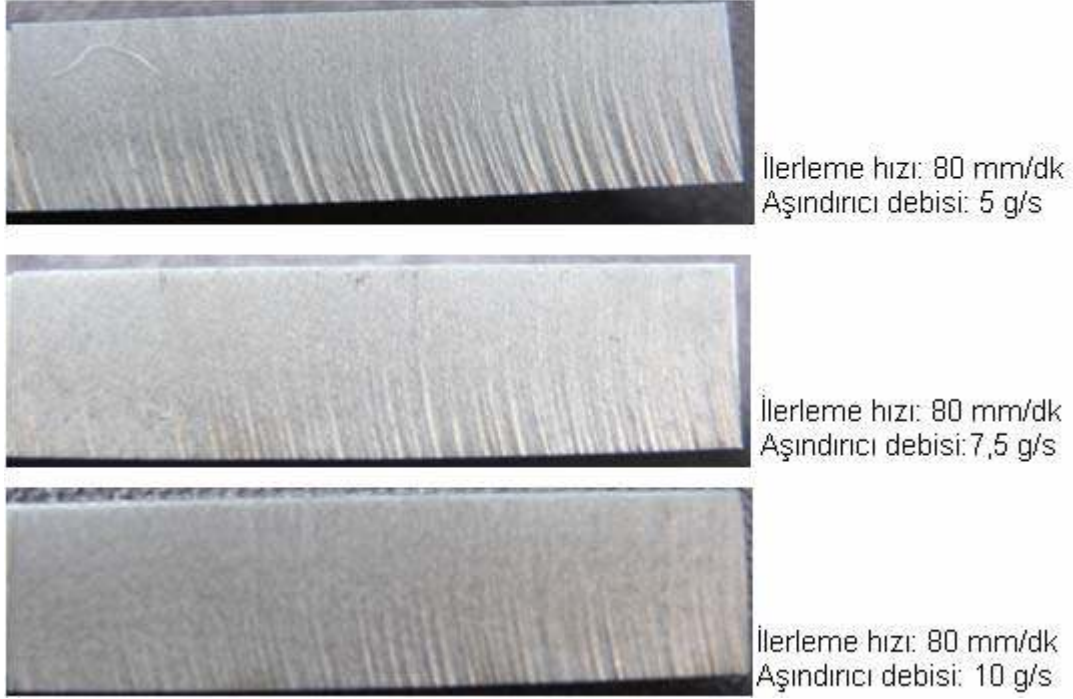
Çizelge 6.1 Cam kesiminde garnet ve kolemanit ile kullanılan kesme parametreleri

| Aşındırıcı | İlerleme hızı (mm/dk) | Aşındırıcı debisi (g/s) |
|------------|-----------------------|-------------------------|
| Garnet     | 300                   | 5                       |
| Kolemanit  | 50                    | 10                      |

#### 6.2.2. Kolemanit tozu ile Al7075 kesme deneyleri

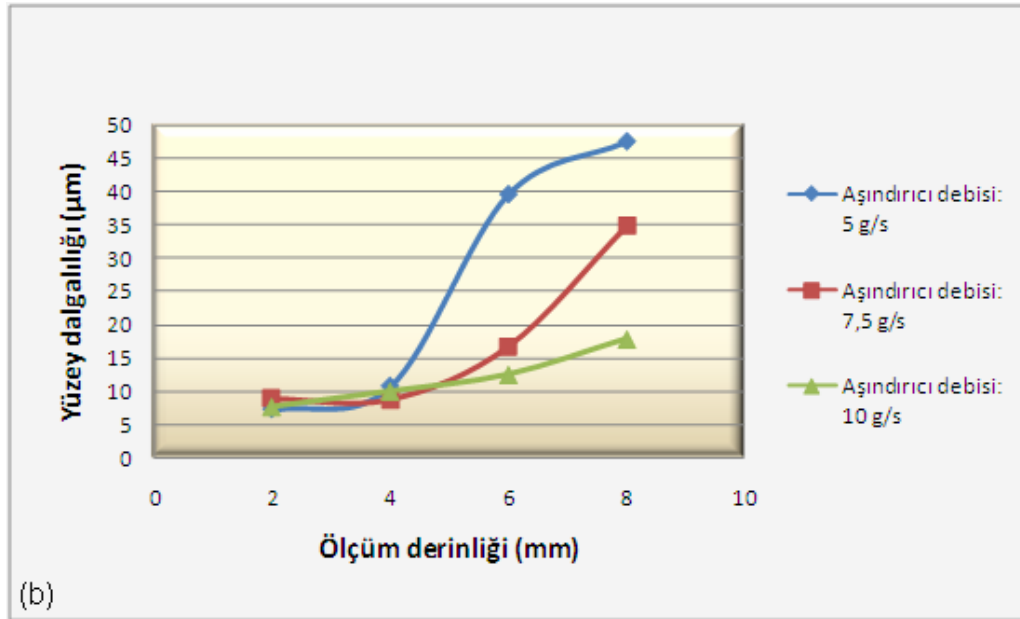
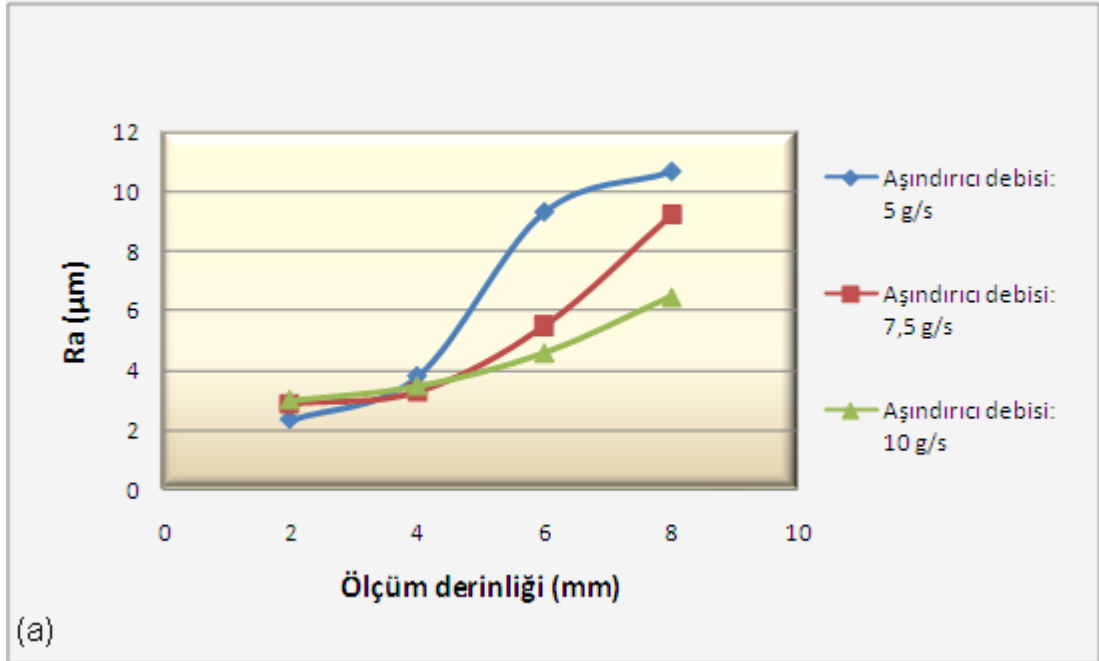
Kolemanit ile yapılan Al7075 kesimlerine 80 mm/dk ilerleme ve 5 g/s aşındırıcı debisi değerleriyle başlanmıştır. Daha sonra aşındırıcı debisi, sırasıyla 7.5 ve 10 gr/s değerlerine çıkarılarak kesimler gerçekleştirilmiştir.

Resim 6.1’de farklı aşındırıcı debileri için Al7075’de elde edilen yüzeylerden örnekler verilmiştir.



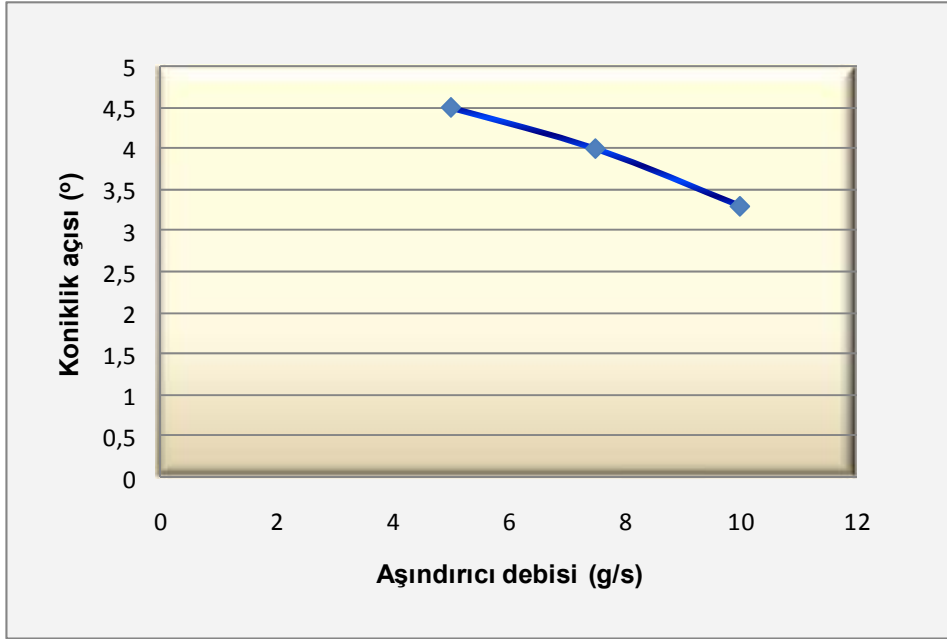
Resim 6.1 Kolumanit ile AL7075 kesiminde 80 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri (5 - 7,5 - 10 g/s) ile elde edilen yüzeyler

Kolumanit tozu ile yapılan Al7075 kesimlerinde artan aşındırıcı debisi ile yüzey kalitesinin değişimi Şekil 6.1’de verilmiştir. 10 mm kalınlığındaki numunelerin düz kesim yapılan bölgelerinden sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 mm derinliğinde ölçümler alınmıştır. Aşındırıcı debisindeki artışla, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerleri elde edilmiştir. Bu etki, su jetinin malzemeye giriş bölgesinde yani kesme-aşınmasının gözlemlendiği bölgede daha küçük değerlerde seyrederken çıkış bölgesine yani deformasyon-aşınmasının gözlemlendiği bölgeye doğru gözle de fark edilebilir düzeylere erişmektedir.



Şekil 6.1 (a) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde aşındırıcı debisi değişiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde aşındırıcı debisi değişiminin yüzey dalgalılığına etkisi

Kolemanit tozu ile yapılan Al7075 kesimlerinde aşındırıcı debisiyle kesme profili konikliği değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir. Koniklik, artan aşındırıcı debisi ile azalmaktadır.

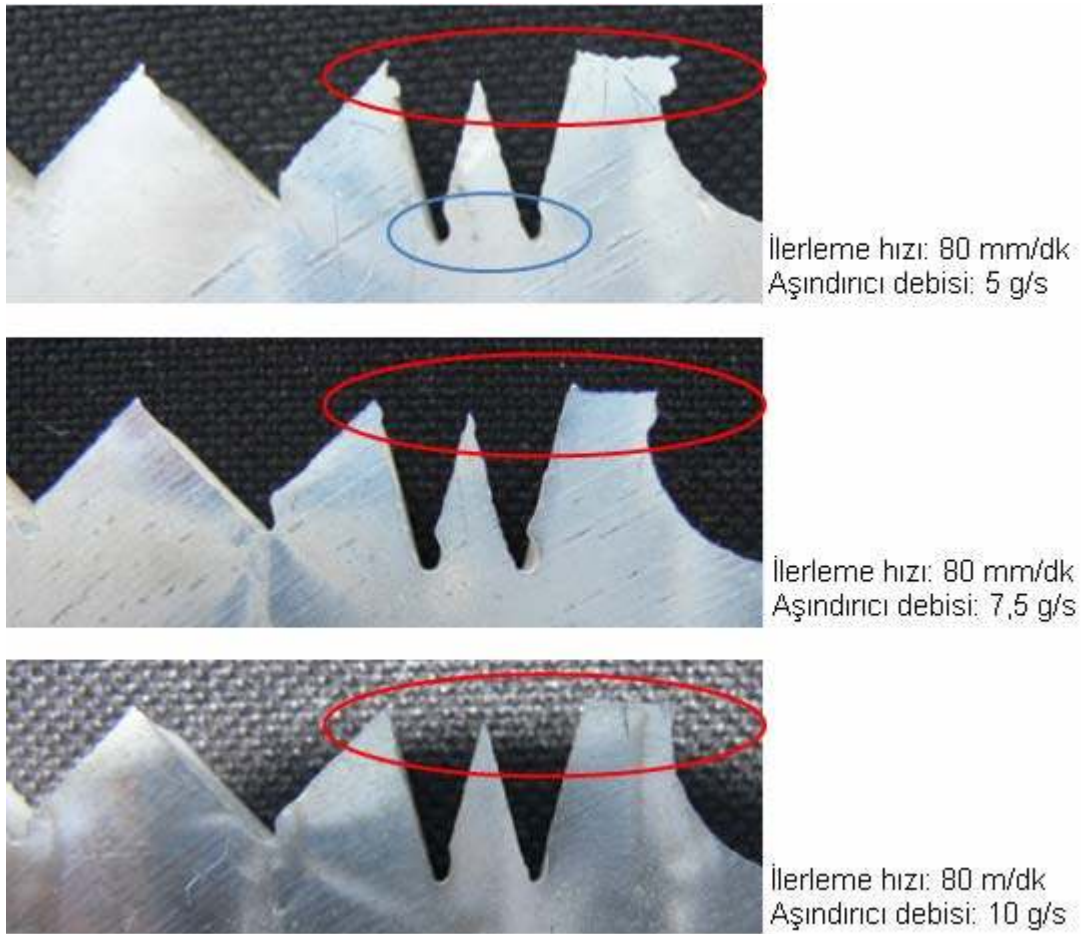


Şekil 6.2 Kolemanit ile Al7075 kesiminde 80 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri (5 – 7,5 - 10 g/s) ile elde edilen kesme profili koniklik açıları

Jetin iş parçasından çıktığı tarafta oluşan çapakların artan aşındırıcı debisiyle azaldığı gözlenmiştir (Resim 6.2). Bu duruma resim üzerinde verilen kırmızı halkalarla dikkat çekilmiştir. Resimde jet sapmasının etkisi de görülmektedir. Jet sapması, jetin iş parçasından çıktığı tarafta 30° ve 90°'lik açılı kesimlerde köşelerdeki geometrik bozukluklara sebep olmaktadır. Jet sapmasının etkisi, doğrusal kesim bölgesinde birbirine paralel izler şeklinde görülmektedir (Resim 6.1).

Al7075 için sonraki kesimler, aşındırıcı debisi 7,5 g/s değerinde sabit tutularak sırasıyla 40 mm/dk ve 100 mm/dk ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Resim 6.3'de elde edilen yüzeyler verilmiştir. Resimde, hızın azalmasıyla yüzey kalitesindeki artış görülmektedir. Şekil 6.4 de ilerlemedeki artışın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. İlerleme hızının artması, birim zamanda malzeme yüzeyine gelen aşındırıcı miktarının düşmesi demektir. Bu da kesme performansını düşürerek yüzey pürüzlülüğü yüksek kesme yüzeyi elde edilmesine neden

olmaktadır. Şekil 6.4, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerlerini kesme derinliği boyunca göstermektedir. İlerleme hızı ile bu değerlerdeki değişim, 4 mm kesme derinliğine kadar daha küçük değerlerde seyrederken kesme derinliğiyle birlikte artmaktadır. Kesme profili koniklik açısının da ilerlemedeki artışla büyüdüğü gözlenmiştir. Testlerde elde edilen koniklik açıları Şekil 6.3'de verilmiştir.



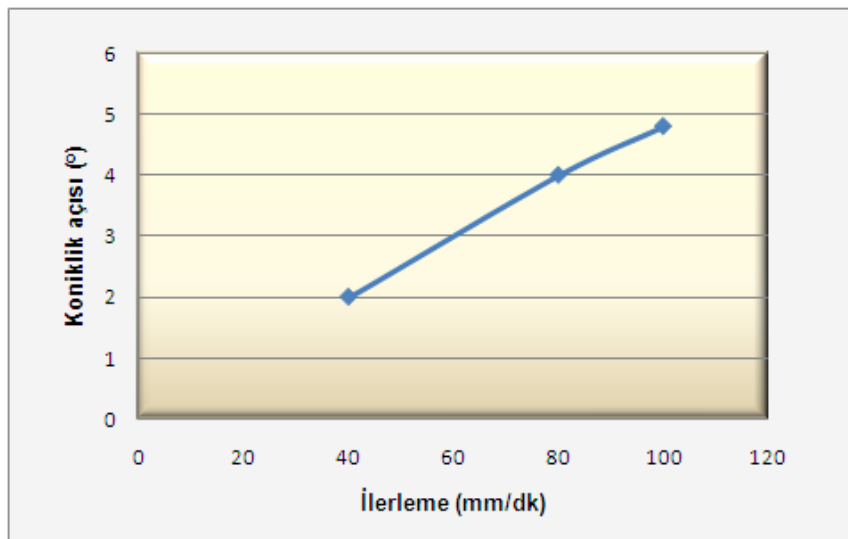
Resim 6.2 Jet sapmasının 90o ve 30o'lik açılı bölgelerde oluşturduğu geometri ve jetin malzemeden çıktığı bölgede oluşan çapaklı bölgenin aşındırıcı debisi ile değişimi

İlerleme hızıyla jet çıkışında oluşan çapaklı bölgenin değişimi Resim 6.4'de verilmiştir. 100 ve 80 mm/dk ilerleme hızlarının kullanıldığı denemelerde oldukça çapaklı bir kesim elde edilirken 40 mm/dk ilerleme hızıyla kesilen

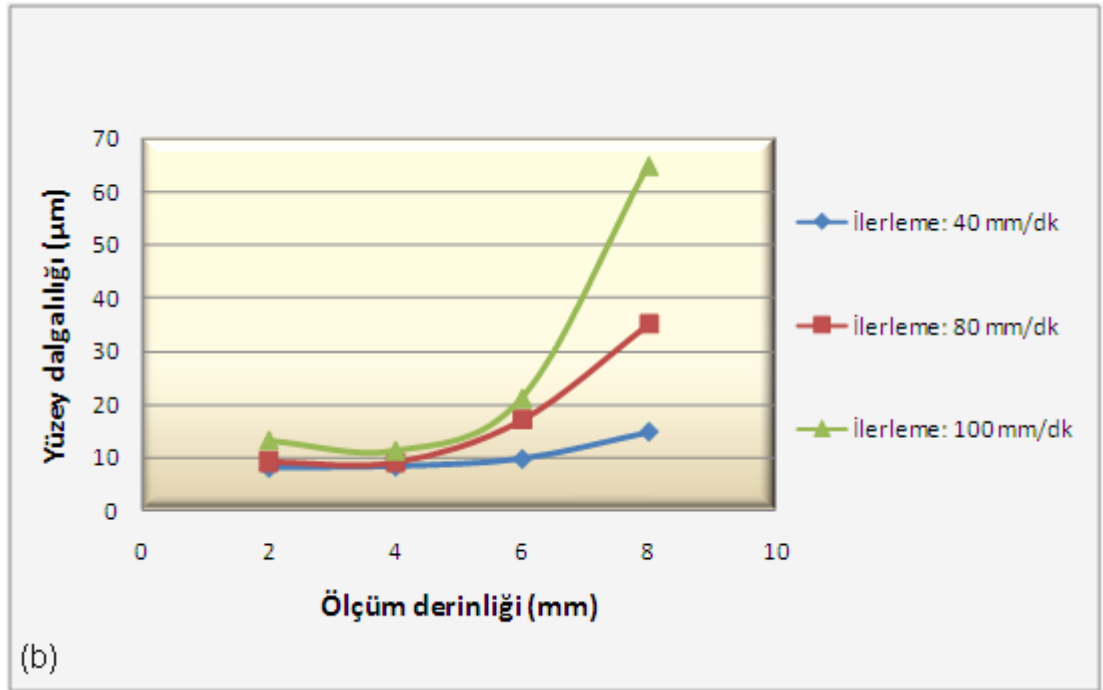
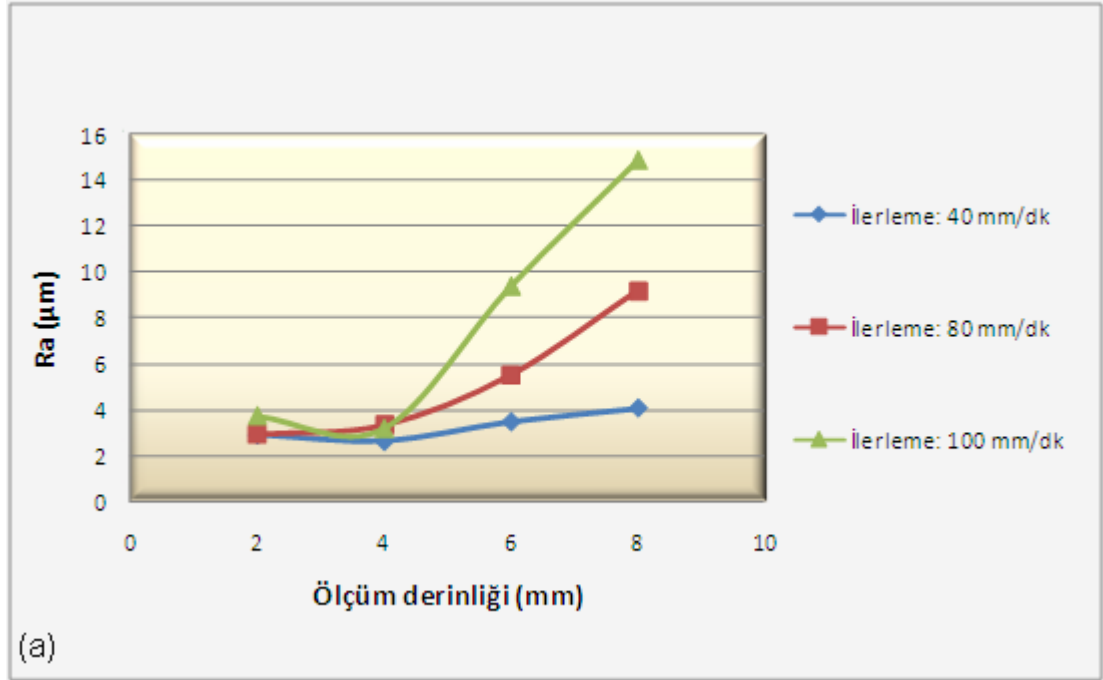
malzemede çapak gözlenmemektedir. 90° ve 30°'lik açılı bölgelerde ise 40 mm/dk ilerleme hızının kullanıldığı kesimde, jet sapmasının etkisi fark edilmemektedir.



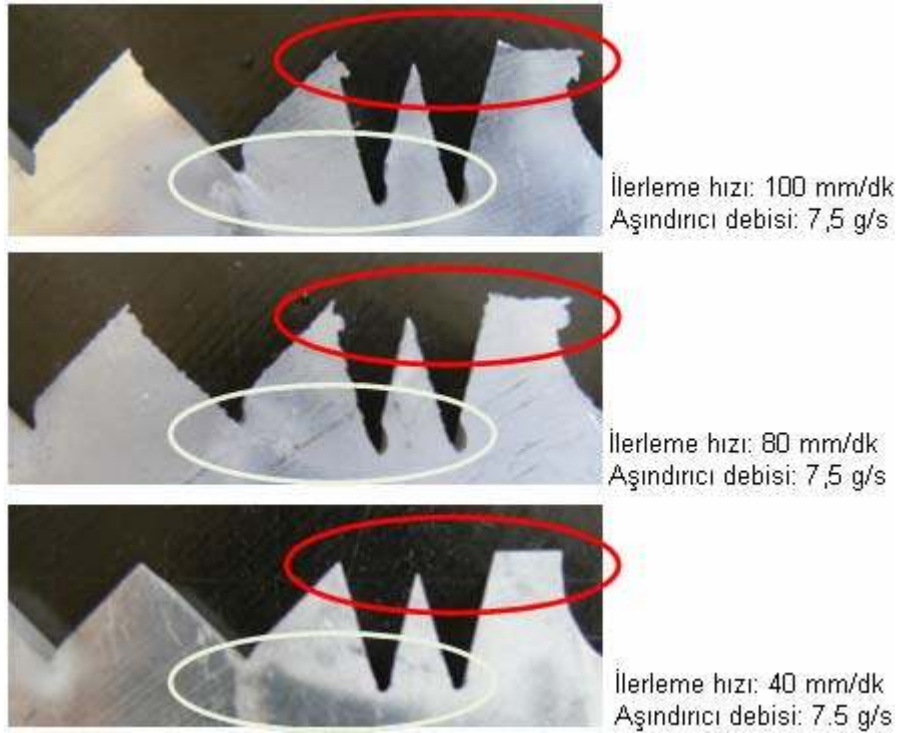
Resim 6.3 Kolanit ile Al7075 kesiminde 7,5 g/s aşındırıcı debisi ve farklı ilerleme hızlarıyla elde edilen yüzeyler



Şekil 6.3 Kolanit ile yapılan Al7075 kesiminde 7,5 g/s aşındırıcı debisi ve farklı ilerleme hızlarıyla elde edilen koniklik açıları



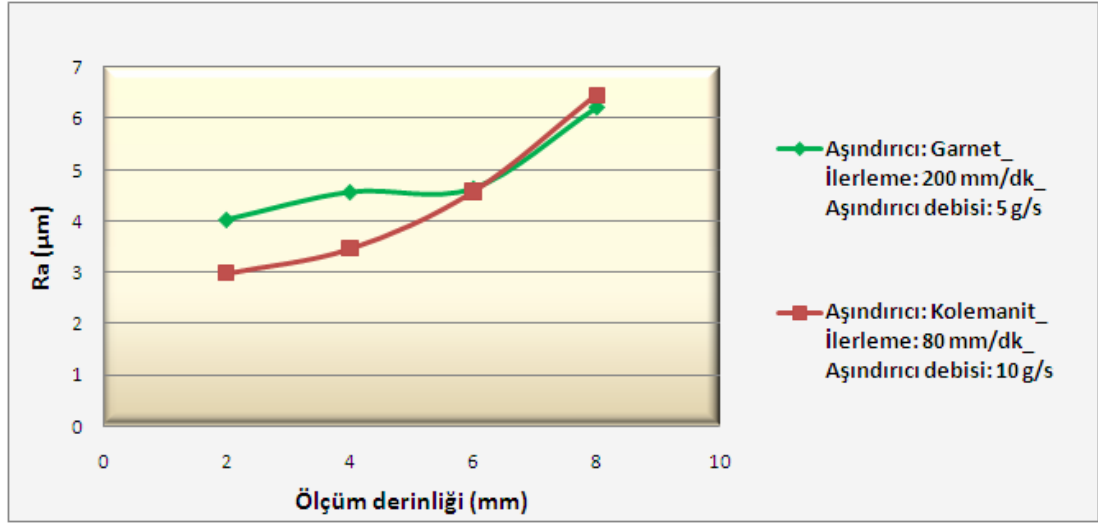
Şekil 6.4 (a) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan Al7075 kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgalılığına etkisi



Resim 6.4 Jetin malzemeden çıktığı bölgede oluşturduğu çapaklı bölgenin ve  $90^\circ / 30^\circ$  açılı bölgelerde jet sapmasının neden olduğu geometrinin ilerleme hızı ile değişimi

### 6.2.3. Al7075 kesme deneylerinde kolemanit ve garnet tozu performanslarının karşılaştırılması

Kolemanit tozunun performansını değerlendirmek açısından garnet ve kolemanit ile yapılan kesimler karşılaştırılmıştır. Şekil 6.5'de garnet ve kolemanit ile yapılan kesimlerden birer tanesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, değişen ölçüm derinliğine göre verilmiştir. Şekilde verilen kesimlerde garnet tozu için kullanılan ilerleme değeri 200 mm/dk, kolemanit için 80 mm/dk'dır. Aşındırıcı debisi ise garnet için 5 g/s, kolemanit için ise 10 g/s'dir. Kolemanit tozu ile yapılan %60 daha düşük ilerleme ve %50 daha yüksek aşındırıcı debisiyle ancak garnet ile yapılan kesimde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşabilmektedir.



Şekil 6.5 Garnet ve kolumanite ile yapılan kesimlerde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Bu bulgular yardımıyla kolumanite kullanımını maliyet açısından değerlendirmek mümkündür. Eti Maden İşletmeleri'nden temin edilen 3-25 mm boyut aralığındaki Bigadiç kolumaniti yurtiçi satış fiyatı 210 \$/ton'dur. Garnet maliyeti ile karşılaştırabilmek için, kolumanitin ASJ'de aşındırıcı olarak kullanılabilir özelliklere getirilmesi (uygun tane boyutu, tane boyut aralığı vb.) için gereken maliyet de hesaba katılmalıdır. Türkiye'de ASJ ile kesme için aşındırıcı üretimi olmadığından benzer prosesleri içeren çimento üretimi referans alınmıştır. Bir çimento fabrikasının kırma-öğütme-eleme prosesleri esas alınarak, elektrik, işçilik, nakliye, amortisman giderleri hammadde fiyatına eklenerek kolumanitin aşındırıcı olarak maliyeti çıkarılmıştır (Çizelge 6.2). Al7075 testlerinde kolumanite ile 80 mm/dk ilerleme hızı ve 10 g/s aşındırıcı debisi kullanıldığında, garnet ile 200 mm/dk ilerleme hızı ve 5 g/s aşındırıcı debisi ile yapılan kesimde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılmıştır. Bu şartlarda, Al7075 numunesi kullanarak 1 m kesme boyu için maliyet hesabı yapıldığında Çizelge 6.3'deki durum ortaya çıkmaktadır. Buna göre, 1 m kesim için kolumanite maliyeti, garnet maliyetinin yaklaşık 1,8 katıdır.

Çizelge 6.2 Kolemanit maliyeti

|                                                   |        |
|---------------------------------------------------|--------|
| Kolemanit yutüçi satış fiyatı (\$/ton)            | 210,00 |
| Elektrik giderleri (\$/ton)                       | 3,50   |
| Sarf malzemesi giderleri (\$/ton)                 | 1,00   |
| Kurutma maliyeti (\$/ton)                         | 1,00   |
| İşçilik giderleri (\$/ton)                        | 6,00   |
| Genel giderler (muhasabe, kırtasiye vb.) (\$/ton) | 2,00   |
| şirket karı (\$/ton)                              | 22,35  |
| Kolemanit maliyeti (\$/ton)                       | 245,85 |

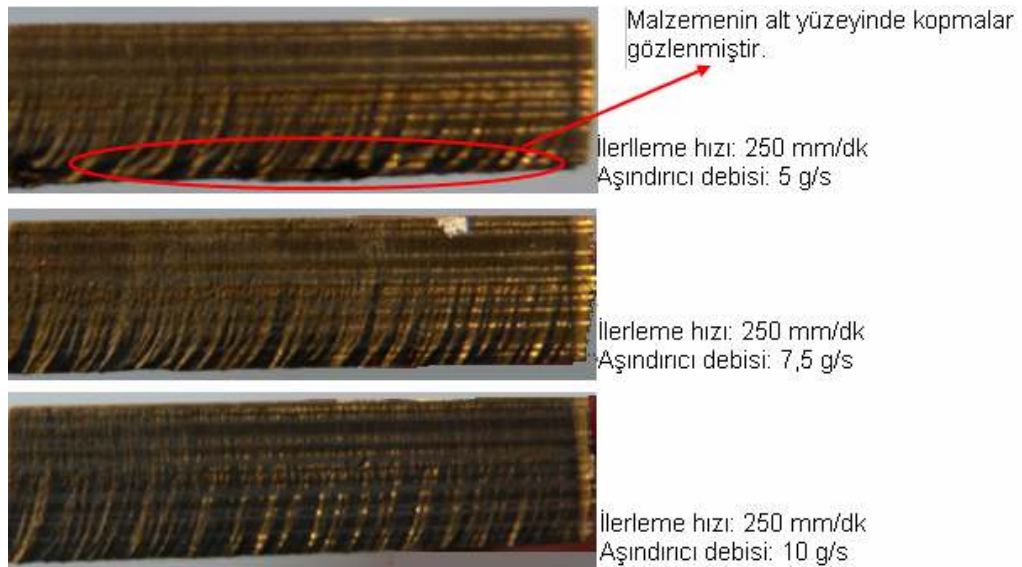
Çizelge 6.3 Kolemanit ve garnet maliyetlerinin Al7075 kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması

| Aşındırıcı                      | Garnet | Kolemanit |
|---------------------------------|--------|-----------|
| İlerleme hızı (mm/dk)           | 200    | 80        |
| Aşındırıcı debisi (g/s)         | 5      | 10        |
| Kesme boyu (m)                  | 1      | 1         |
| Kesme süresi (dk)               | 5      | 12,5      |
| Harcanan aşındırıcı miktarı (g) | 1500   | 7500      |
| Aşındırıcı maliyeti (\$/ton)    | 700    | 245,85    |
| İşleme maliyeti (\$)            | 1,05   | 1,84      |

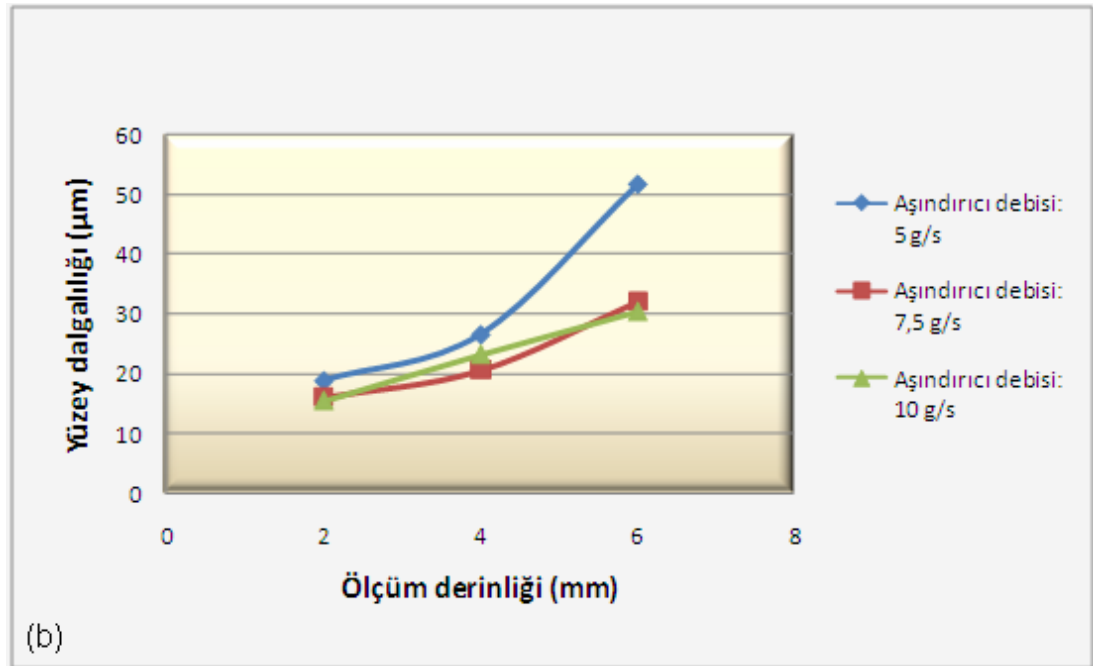
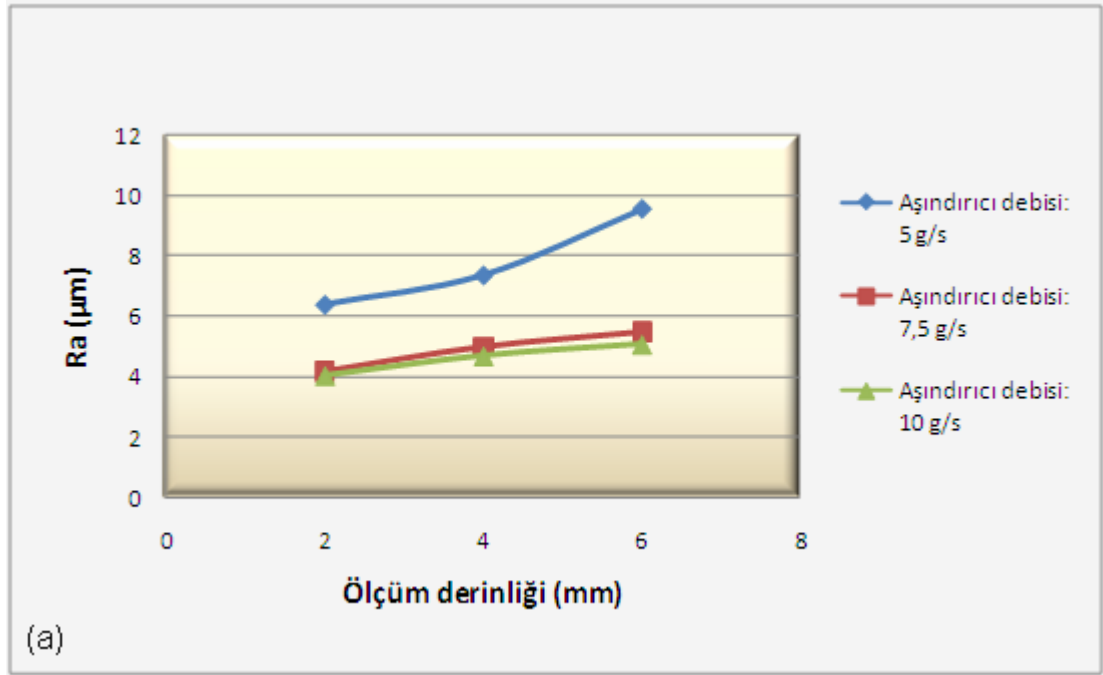
#### 6.2.4. Kolemanit tozu ile kompozit malzeme kesme deneyleri

Kolemanit ile kompozit malzeme ilk olarak, 250 mm/dk ilerleme ve 5 g/s aşındırıcı debisi ile kesilmiştir. Sonrasında aşındırıcı debisi sırasıyla 7.5 ve 10 g/s değerlerine çıkarılarak kesimler yapılmıştır. Elde edilen yüzeyler Resim 6.5’ de verildiği gibidir. 5 g/s aşındırıcı debisi ile yapılan kesimlerde malzemenin alt tarafında kopmalar gözlenmiştir. Aşındırıcı debisinin 7,5 g/s’ye artırılmasıyla kopmalar engellenmiştir. Artan aşındırıcı debisi Al7075

kesimlerindeki gibi, yüzeydeki izlerin azalmasında etkili olmuştur. Şekil 6.6'da artan aşındırıcı debisinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerlerine etkisi verilmiştir. 7,5 ve 10 g/s aşındırıcı debileriyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri tüm ölçüm derinliklerinde birbirine daha yakınken 5 g/s'de bu değerlere göre yüksek pürüzlülükler elde edilmiştir. Tüm aşındırıcı debileri için 2 mm ölçüm derinliğinde çok yakın yüzey dalgalılığı değerleri gözlenmekle birlikte ölçüm derinliği arttıkça 5 g/s aşındırıcı debisi için diğer debilere göre yüksek değerler elde edilmiştir. 7,5 ve 10 g/s aşındırıcı debilerinde ortaya çıkan yüzey dalgalılığı değerleri ölçüm derinliği boyunca birbirine yakındır.

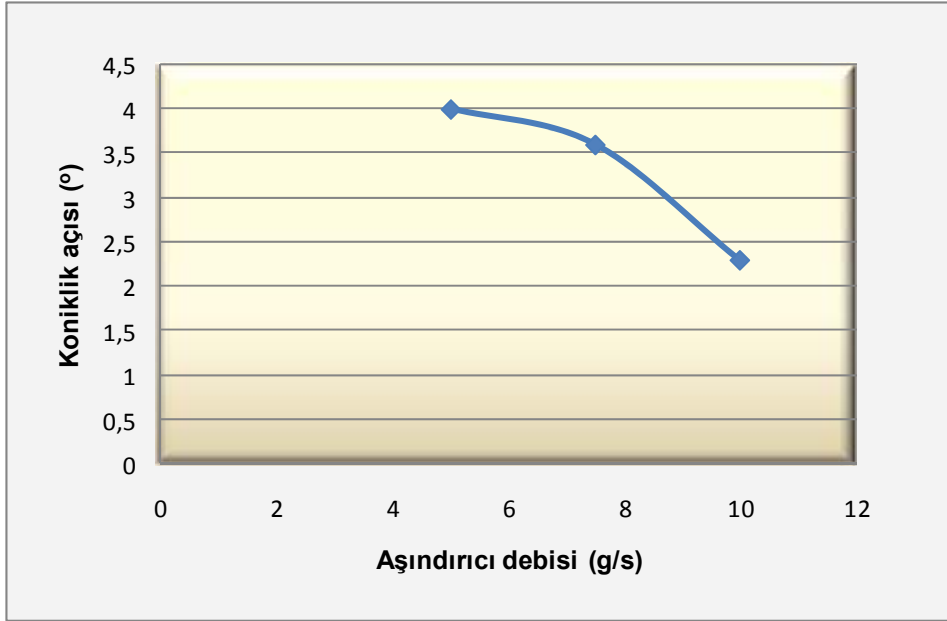


Resim 6.5 Kolemanit ile kompozit kesiminde 250 mm/dk ilerleme ve farklı aşındırıcı debileri ile elde edilen yüzeyler



Şekil 6.6 (a) Kolemanit ile kompozit malzeme kesiminde aşındırıcı debisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile kompozit malzeme kesiminde aşındırıcı debisinin yüzey dalgalılığına etkisi

Aşındırıcı debisi değişiminin kesme profili koniklik açısına etkisi Şekil 6.7’de verilmiştir. Koniklik açısı, daha önce Al7075 kesimlerinde de gözlemlendiği gibi artan aşındırıcı debisi ile azalmaktadır.

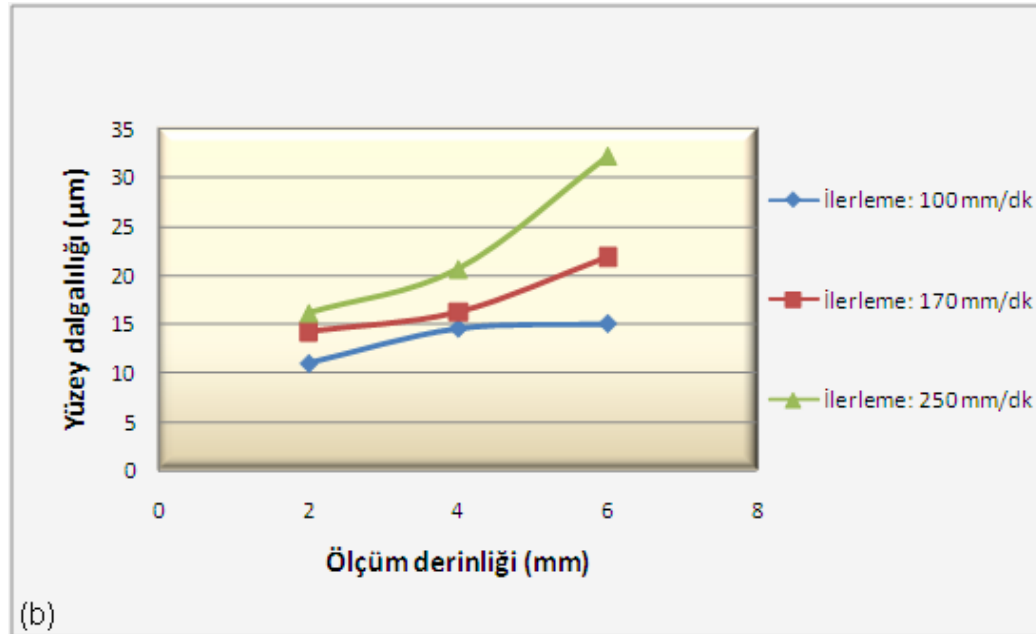
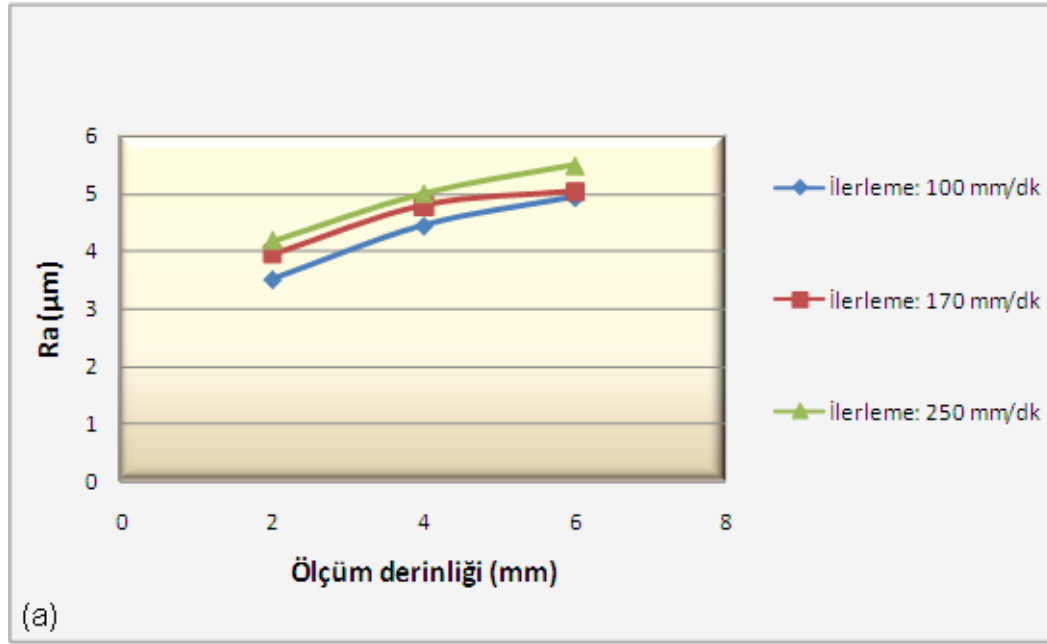


Şekil 6.7 Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde koniklik açısının aşındırıcı debisine göre değişimi

Aşındırıcı debisindeki artış, birim zamanda yüzeye daha fazla aşındırıcı tanesinin çarpması demektir. Bu da kesme aşınma bölgesini artıran bir etki yaratır. Testlerde de görüldüğü üzere debideki artış hem yüzey pürüzlülüğü hem de koniklik açısında iyileşme sağlamaktadır.

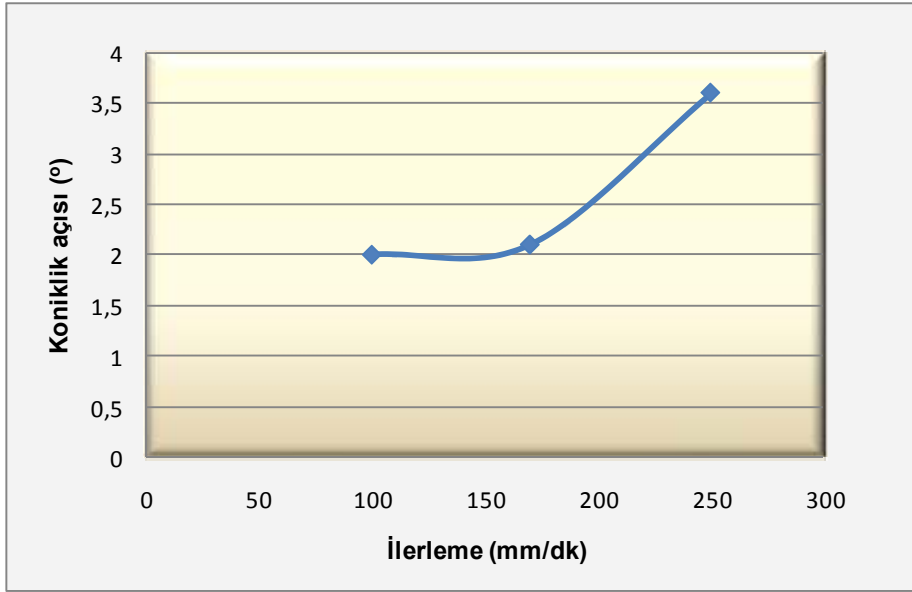
7,5 g/s aşındırıcı debisi sabit tutularak farklı ilerleme hızlarıyla (250 mm/dk, 170 mm/dk, 100 mm/dk) kesme denemeleri yapılmıştır. İlerleme hızının kompozit malzeme kesiminde kesme performansına etkisini gözlemlemek üzere yapılan denemeler, artan ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerlerini de artırdığını göstermektedir (Şekil 6.8). Bu etki Al7075 ile yapılan denemelerde de gözlenmiştir. Ancak Al7075 kesimlerinde farklı ilerlemelerle, kesme-aşınma bölgesinde yakın yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerleri elde edilirken deformasyon-aşınma bölgesine doğru gidildiğinde pürüzlülük ve dalgalılık değerlerinin ilerlemeyle birlikte belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Kompozit malzeme kesiminde ise farklı ilerleme hızlarında kesme-aşınma bölgesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri farkı, deformasyon aşınma bölgesinde de muhafaza edilmiştir. Yüzey

dalgallılığında elde edilen durum deformasyon aşınma bölgesindeki değişim açısından Al7075 sonuçlarına yakın olsa da kesme-aşınma bölgesinde ilerleme hızı etkisi kompozit malzeme kesiminde daha farkedilebilir.



Şekil 6.8 (a) Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile yapılan kompozit malzeme kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgallılığına etkisi

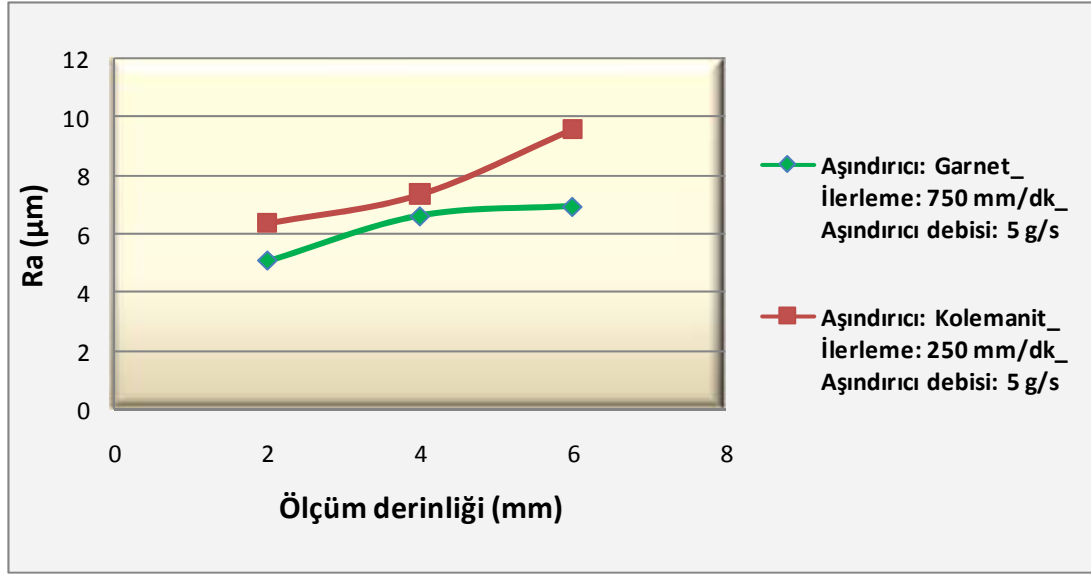
İlerleme değişimiyle kesme profili koniklik açısındaki değişim, kompozit malzeme için Şekil 6.9'da verildiği gibidir. Koniklik açısının ilerleme hızıyla birlikte arttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.9 İlerleme değişiminin koniklik açısına etkisi

#### 6.2.5. Kompozit malzeme kesme deneylerinde kolemanit ve garnet tozu performanslarının karşılaştırılması

Kompozit malzeme kesiminde, kolemanit performansını değerlendirmek açısından garnet tozu ile yapılan karşılaştırma Şekil 6.10'da sunulmuştur. Aynı aşındırıcı debisinde garnet tozu ile kolemanite göre 3 kat daha hızlı kesim yapılmasına rağmen garnet ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri kolemanitle elde edilen değerlerden daha düşüktür. Maliyet açısından 1 m kesim boyu için karşılaştırıldığında Çizelge 6.4'deki durum elde edilmektedir. Garnet tozunun daha iyi yüzey kalitesi sağladığı kesimde garnet ve kolemanitle işleme maliyeti birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 6.10 Garnet ve kilemanit ile yapılan kompozit malzeme kesimlerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Çizelge 6.4 Kilemanit ve garnet maliyetlerinin kompozit malzeme kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması

| Aşındırıcı                      | Garnet | Kilemanit |
|---------------------------------|--------|-----------|
| İlerleme hızı (mm/dk)           | 750    | 250       |
| Aşındırıcı debisi (g/s)         | 5      | 5         |
| Kesme boyu (m)                  | 1      | 1         |
| Kesme süresi (dk)               | 1,3    | 4,0       |
| Harcanan aşındırıcı miktarı (g) | 400    | 1200      |
| Aşındırıcı maliyeti (\$/ton)    | 700    | 245,85    |
| İşleme maliyeti (\$)            | 0,28   | 0,30      |

#### 6.2.6. Kilemanit tozu ile mermer kesme deneyleri

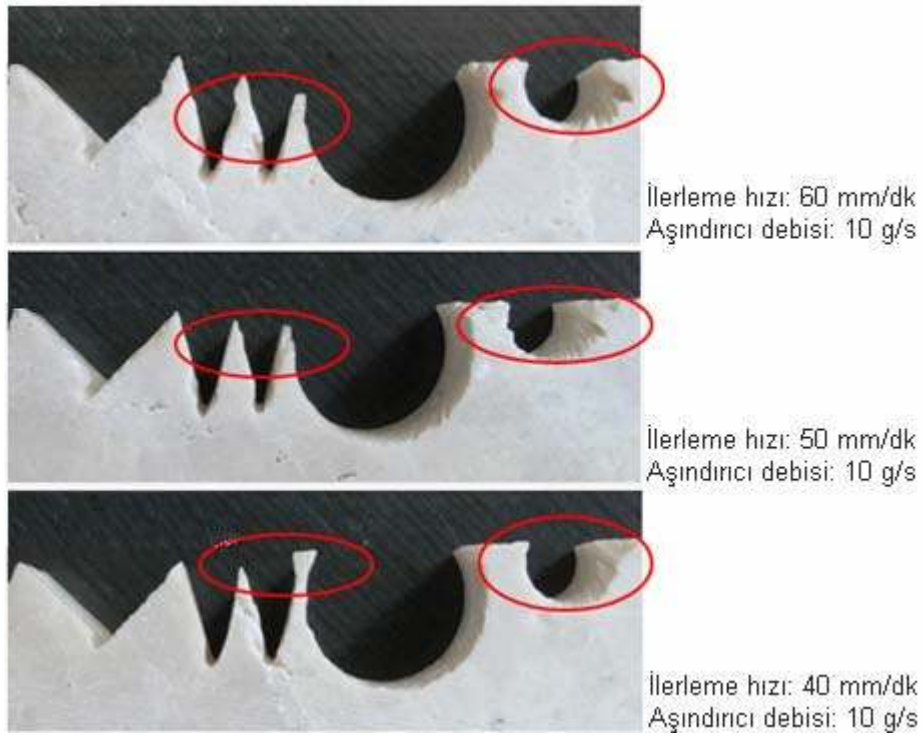
Kilemanit ile mermer kesimine 50 mm/dk ilerleme ve 10 g/s aşındırıcı debisi ile başlanmıştır. Maksimum aşındırıcı debisi kullanılmasına rağmen iyi bir kesme performansı gözlenmediğinden aşındırıcı debisi değiştirilerek yapılan denemeler mermer için yapılmamıştır. İlerleme hızının 60 mm/dk değerine

ayarlanarak yapıldığı kesimde ise jet çıkışında, malzemede kırılmalar gözlenmiştir. Bu yüzden ilerleme daha fazla artırılmamış ve 40 mm/dk'ya düşürülerek deneme kesimi yapılmıştır. Doğrusal kesim yüzeyleri Resim 6.6'da verilmiştir. İlerleme hızının artması, Al7075 ve kompozit malzemede de gözleendiği gibi yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerlerinde artışa neden olmuştur (Şekil 6.12). Resim 6.7'de jetin iş parçasından çıktığı bölgede oluşturduğu bozuk geometri, kırılmalar ve bunların ilerleme hızıyla değişimi verilmiştir.

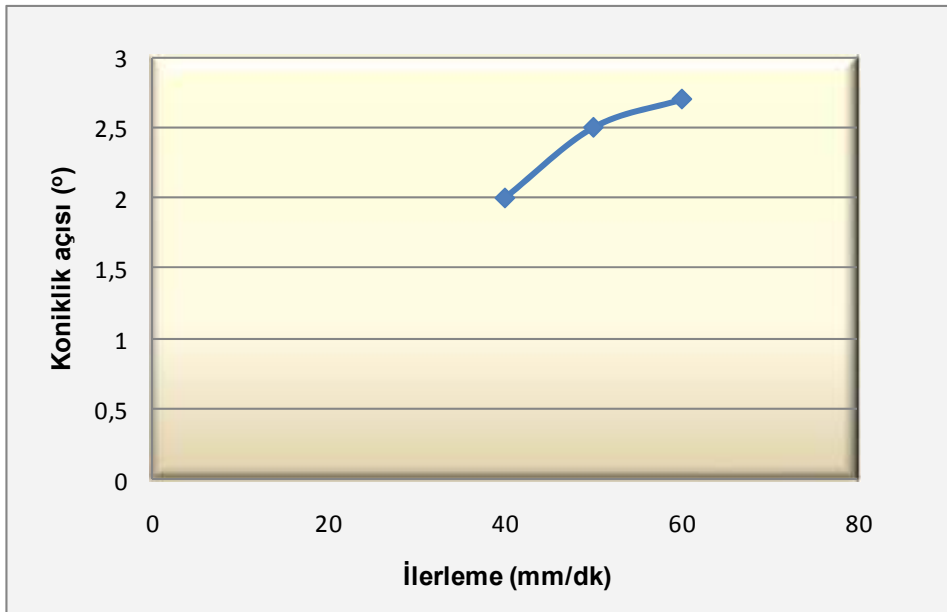


Resim 6.6 Kulemanit ile mermer kesiminde elde edilen yüzeyler

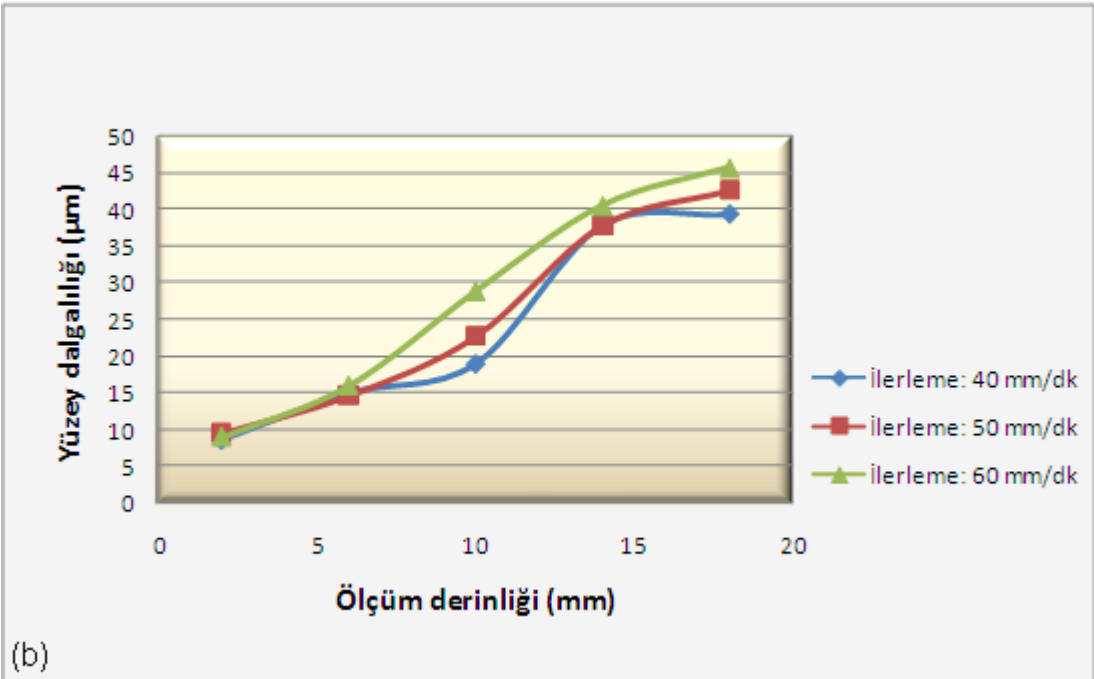
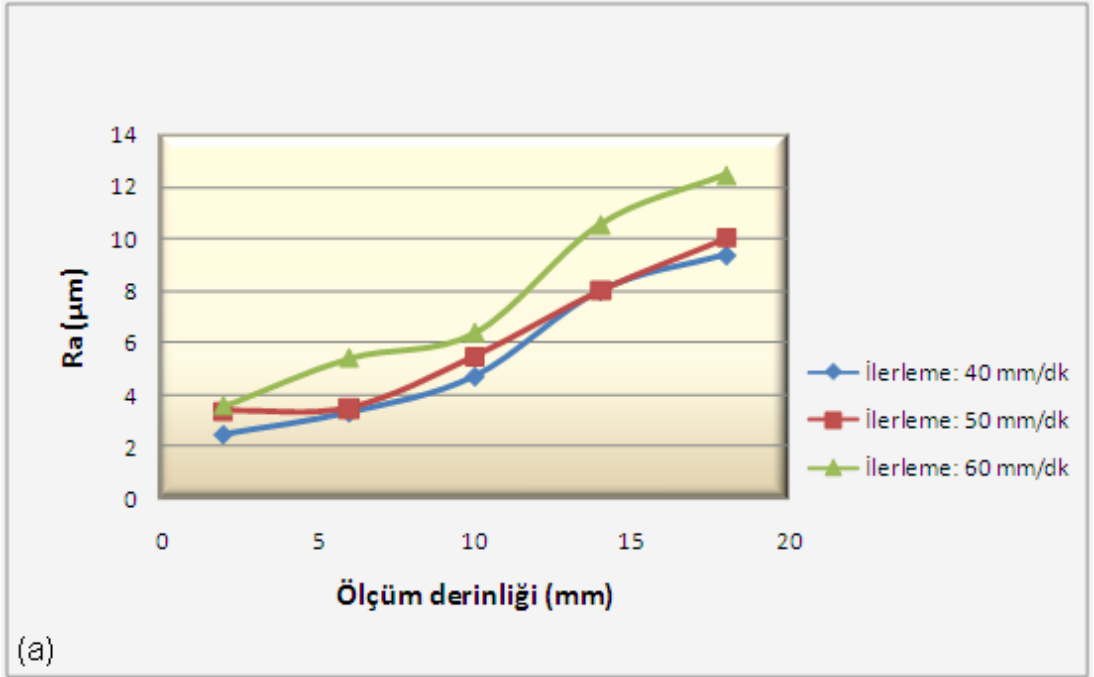
Kesme profili koniklik açısının ilerleme ile birlikte artış gösterdiği mermerle yapılan testlerde de gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.11'de verildiği gibidir.



Resim 6.7 Kolemanitle ile mermer kesiminde farklı ilerlemelerde jet çıkışında oluşan kesme geometrisi



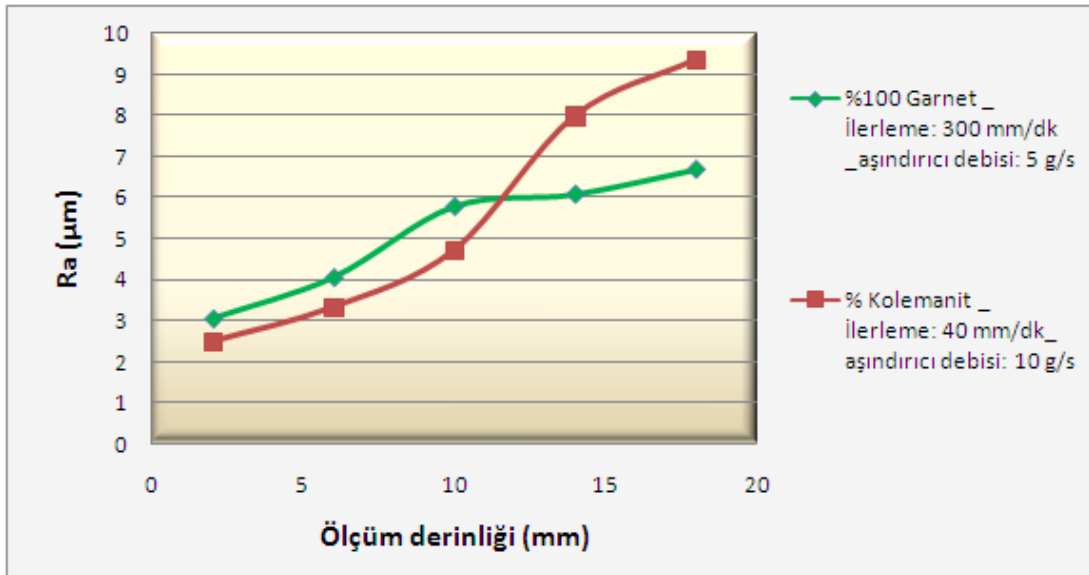
Şekil 6.11 Kesme profili koniklik açısının ilerleme hızıyla değişimi



Şekil 6.12 (a) Kolemanit ile mermer kesiminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kolemanit ile mermer kesiminde ilerleme hızının yüzey dalgalılığına etkisi

### 6.2.7. Mermer kesme deneylerinde kolemanit ve garnet tozu performanslarının karşılaştırılması

Mermer kesiminde kolemanit performansı, garnet performansı ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kolemanit tozuyla 40 mm/dk ilerleme hızı ve 10 g/s aşındırıcı debisiyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile garnet tozuyla 300 mm/dk ilerleme ve 5 g/s aşındırıcı debisiyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri aynı grafik üzerinde Şekil 6.13'de sunulmuştur. Kolemanit tozuyla yapılan mermer kesiminde, garnet aşındırıcı ile kullanılan ilerlemenin yaklaşık %13'ü ve aşındırıcı debisinin iki katı seçilmesine rağmen yüzey pürüzlülüğü değerleri garnet ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. İşleme maliyet açısından karşılaştırıldığında Çizelge 6.5'deki durum elde edilmiştir. Düşük ilerleme hızı ve yüksek aşındırıcı debisi sebebiyle kolemanit sarfiyatı garnet'a oranla oldukça fazladır. Buna bağlı olarak işleme maliyeti kolemanit için garnet'a göre 5,7 kat daha fazla çıkmıştır.



Şekil 6.13 Mermer kesiminde kolemanit performansının garnet performansı ile karşılaştırılması

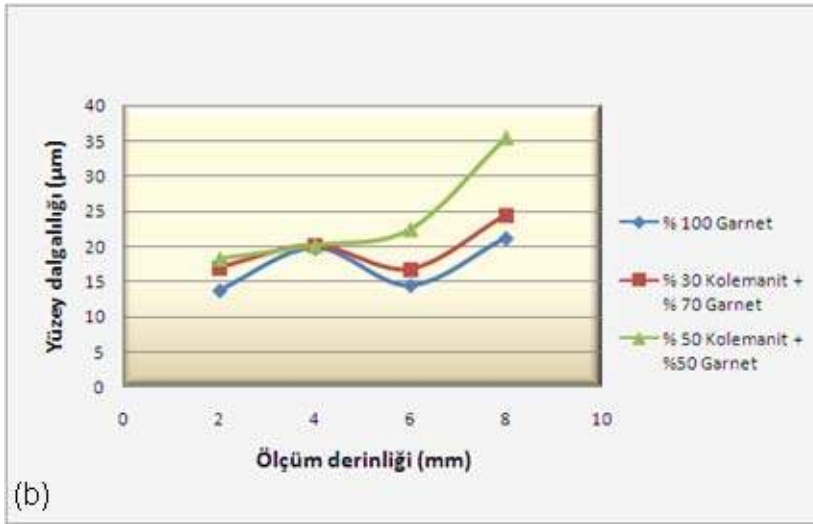
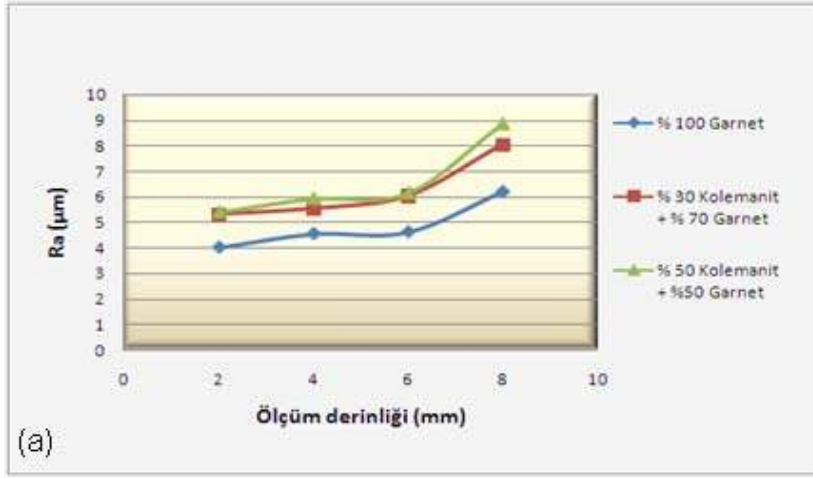
Çizelge 6.5 Kolemanit ve garnet maliyetlerinin mermer kesiminde 1 m kesme boyu için karşılaştırılması

| Aşındırıcı                      | Garnet | Kolemanit |
|---------------------------------|--------|-----------|
| İlerleme hızı (mm/dk)           | 300    | 40        |
| Aşındırıcı debisi (g/s)         | 5      | 10        |
| Kesme boyu (m)                  | 1      | 1         |
| Kesme süresi (dk)               | 3,3    | 25,0      |
| Harcanan aşındırıcı miktarı (g) | 1000   | 15000     |
| Aşındırıcı maliyeti (\$/ton)    | 700    | 245,85    |
| İşleme maliyeti (\$)            | 0,7    | 3,69      |

### 6.3. Kolemanit ve Garnet Tozu Karışımları ile Yapılan Kesme Deneyleri

Kolemanitin sırasıyla %30 ve %50 oranlarında garnet ile karıştırılarak denendiği testlerde gözlemlenmek istenen, kolemanit katkısının yüzey özelliklerine etkisidir. Al7075, kompozit malzeme, mermer, cam ve Ti6Al4V, garnet ile yapılan denemelerde kullanılan kesme parametreleri kullanılarak bahsedilen karışımlarla kesilmiştir. Parçaların doğrusal kesim yapılan bölgelerinden ölçülen yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açıları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.14’de Al7075 kesiminde kolemanit katkısının yüzey özelliklerine etkisi görülmektedir.

Al7075 deneylerinde kolemanit katkısı ile yapılan kesimlerle garnet ile yapılan kesimler karşılaştırıldığında, yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısı değerlerinin garnet aşındırıcıda daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kolemanit oranı arttıkça bu değerler de artmaktadır. Ayrıca, artan kolemanit oranıyla çapak oluşumu ve jet sapması etkisinde de artış gözlenmektedir.



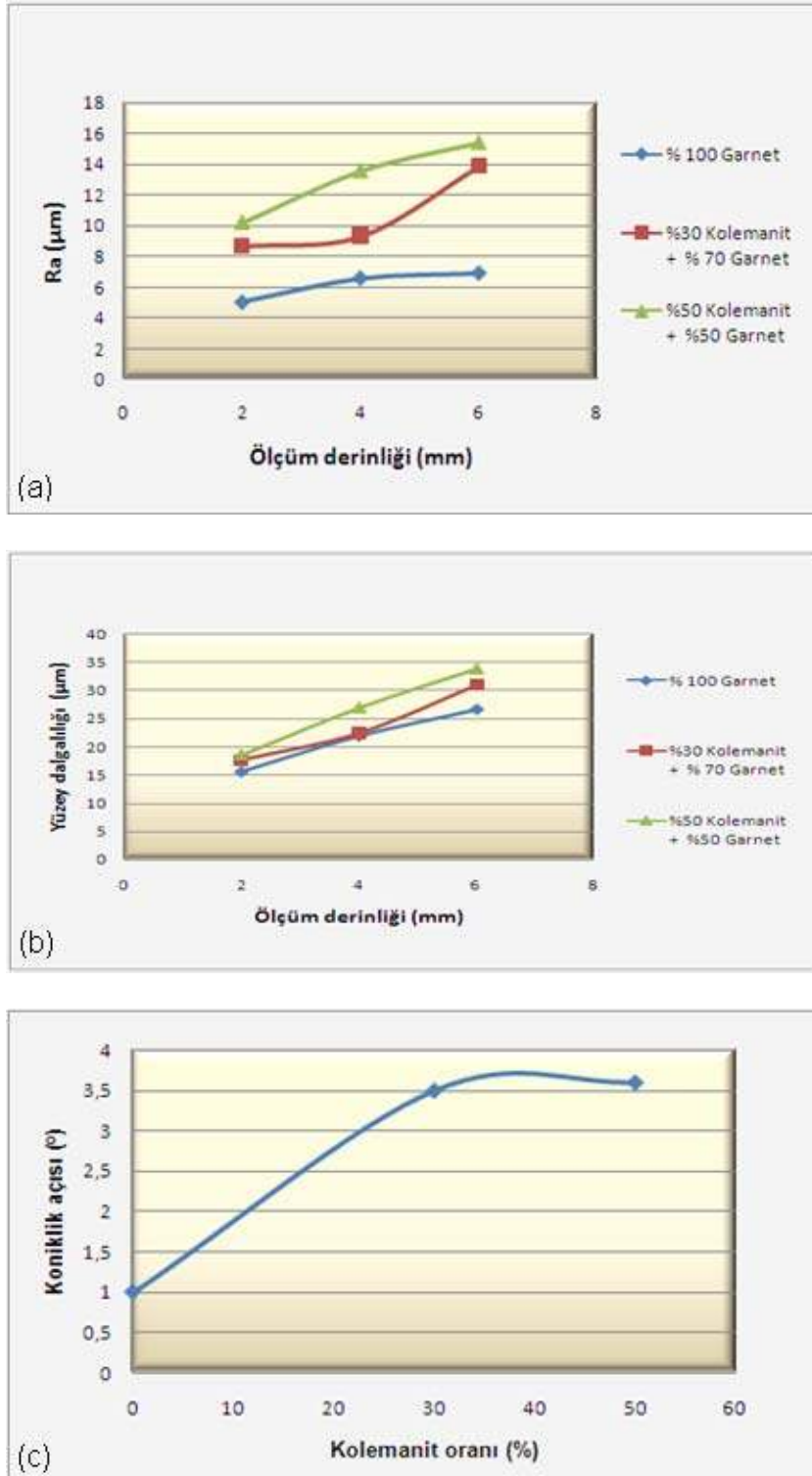
Şekil 6.14 (a) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Al7075 kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi

Kolemanit katkısı kompozit malzeme kesiminde de yüzey özelliklerinde iyileşme sağlamamıştır. Al7075 kesimlerindeki gibi yüzey karakteristiğini belirleyen pürüzlülük, dalgalılık ve koniklik açıları kolemanit oranıyla birlikte artış göstermiştir (Şekil 6.14).

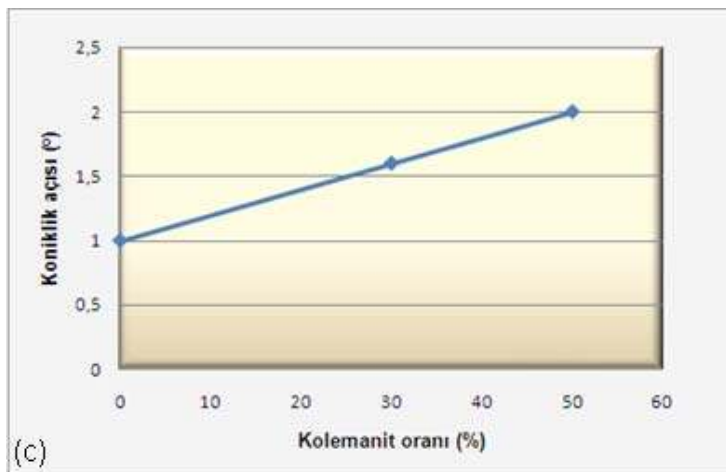
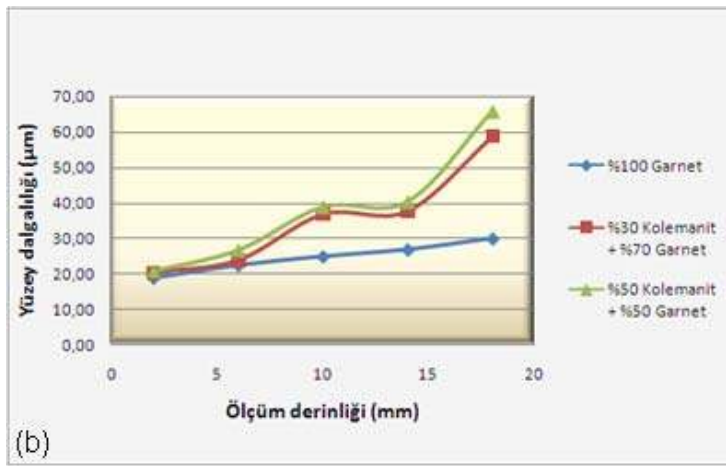
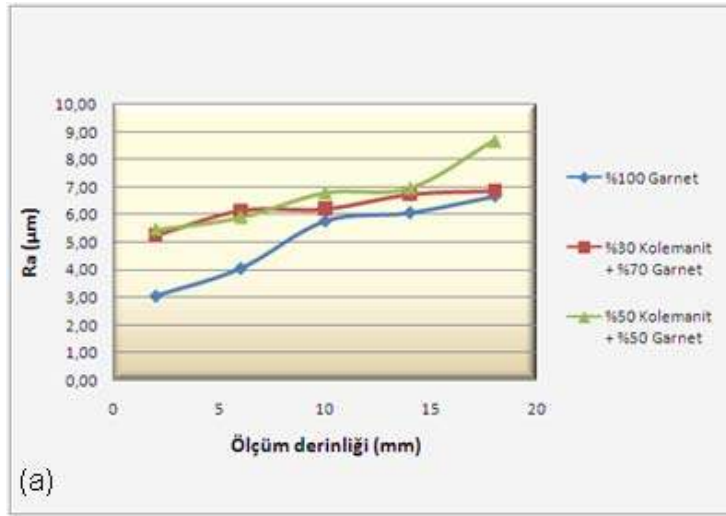
Mermer kesiminde de denenen kolemanit katkılı aşındırıcı karışımı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısı değerlerinin büyümesine neden olmuştur (Şekil 6.16). Artan kolemanit oranıyla birlikte jet çıkışında oluşan geometrik bozukluklar en fazla mermer deneylerinde gözlenmiştir.

Kolemanitle yapılan cam kesimlerinde düşük ilerleme ve yüksek aşındırıcı debisine rağmen olumlu sonuç alınamamıştır. Kolemanitin belli oranlarda garnet ile karıştırılmasıyla yapılan testlerde cam kesimleri, garnet ile kullanılan parametrelerle kesilebilmiştir. Ancak yüzey özellikleri olarak bakıldığında kolemanit-garnet karışımları ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısı değerleri, garnet ile elde edilen değerlerden daha büyüktür (Şekil 6.17).

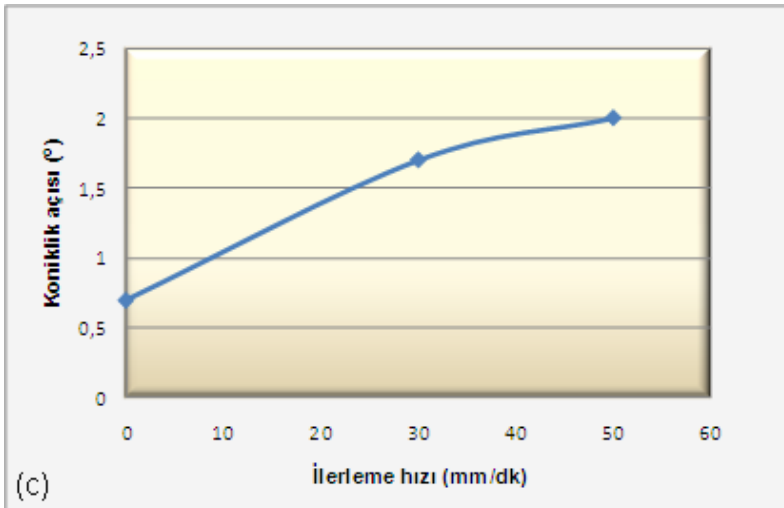
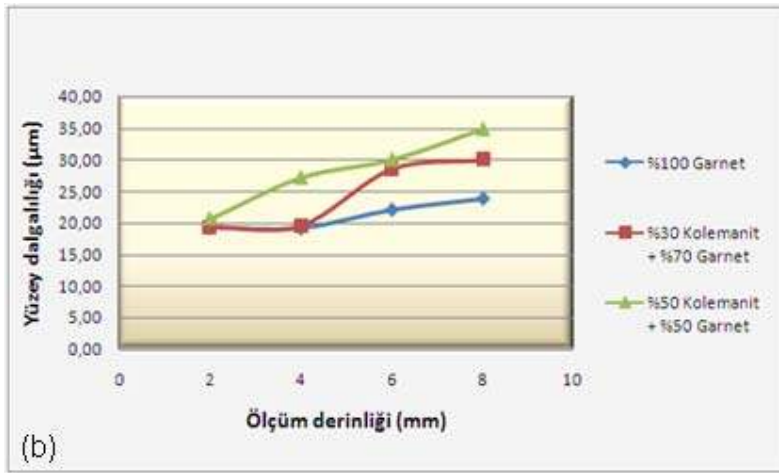
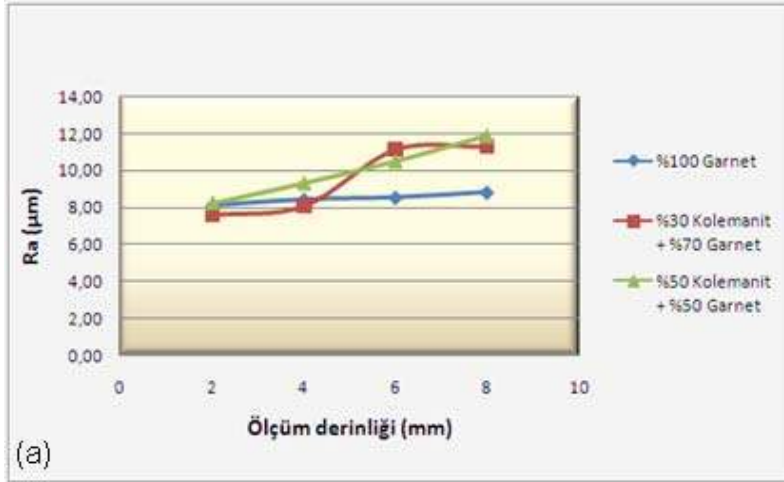
Ti6Al4V kesiminde kolemanit ile yapılan testlerde olumlu sonuçlar alınamamıştır. % 30 kolemanit + % 70 garnet karışımı ile Ti6Al4V kesilebilmiş ancak garnet ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısı değerlerine ulaşamamıştır (Şekil 6.18). %50 kolemanit + % 50 garnet aşındırıcı karışımı da denenmiş ancak bu karışım, titanyum kesiminde başarılı olamamıştır. Jet, doğrusal kesimleri yapabilmiş ancak 90° ve 30°'lik açılı dönüşlerde jet çıkış bölgesinde malzemeyi koparamamıştır (Resim 6.8).



Şekil 6.15 (a) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Kompozit malzeme kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi



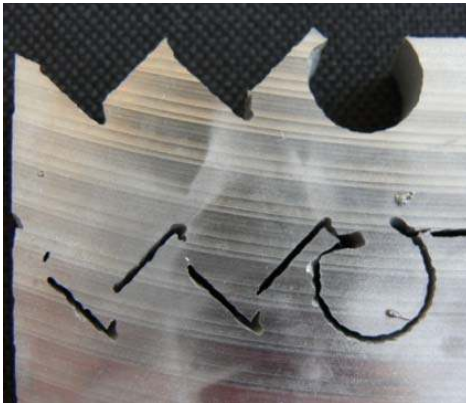
Şekil 6.16 (a) Mermer kesimde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Mermer kesimde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi (c) Mermer kesimde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi



Şekil 6.17 (a) Cam kesiminde kolemanit katkısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi  
 (b) Cam kesiminde kolemanit katkısının yüzey dalgalılığına etkisi  
 (c) Cam kesiminde kolemanit katkısının koniklik açısına etkisi



Şekil 6.18 (a) Ti6Al4V kesiminde kolemanit katkısıyla yüzey pürüzlülüğüne etkisi (b) Ti6Al4V kesiminde kolemanit katkısıyla yüzey pürüzlülüğüne etkisi yüzey dalgalılığına etkisi



Resim 6.8 % 50 kolemanit + % 50 garnet karışımı ile kesilen Ti6Al4V numunesinin jet çıkış tarafı

## 7. DENEYSEL BULGULARIN TARTIŞILMASI

- Aşındırıcı sertliği ASJ ile kesmede, kesme performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu çalışmada elde edilen bulgular da aşındırıcı sertliğinin erozyon mekanizması üzerindeki etkisini göstermektedir. 3 Mohs sertliğindeki zeolit, deneylerde kullanılan numunelerden sadece karbon prepreg tabakalı kompozit malzemeyi kesebilmiştir. Kesme performansı, 8 Mohs sertliğindeki garnet tozuna göre oldukça düşüktür. Kullanılan düşük ilerleme hızı ve yüksek aşındırıcı debisine rağmen malzeme katmalarında kopmalara neden olmuştur. Deneysel bulgular, zeolitin ASJ ile kesmede aşındırıcı olarak kullanılamayacağını göstermektedir.
- 4.5 Mohs sertliğindeki kolemanit tozu ile test numunelerinden Al7075, kompozit malzeme ve mermer kesilebilmiştir. Kolemanit tozunun bu kesimlerdeki performansını değerlendirmek için garnet performansı ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Al7075 testlerinde kolemanit ile kullanılan ilerleme değeri, garnet ile kullanılan değer yaklaşık % 40'ı ve aşındırıcı debisi de iki katı iken ancak garnet ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerine yaklaşılabilmektedir. Karbon prepreg tabakalı kompozit malzeme testlerinde, garnet ile kullanılan hızın 1/3'ü kullanılmasına rağmen kolemanit ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri daha yüksek çıkmıştır. Mermerde ise kolemanitle, garnet testlerindeki ilerlemenin %13'ü, aşındırıcı debisinin iki katı kullanıldığında ancak garnet ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılabilmiştir. Sonuçlar, yüzey kalitesi yüksek kesimler için kolemanit tozunun düşük hızlarla çalıştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.
- Maliyet açısından kolemanit ve garnet karşılaştırıldığında, düşük ilerleme hızları ve yüksek aşındırıcı debileri sebebiyle kolemanit işleme maliyetlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Al7075 için kolemanit işleme maliyeti, garnet işleme maliyetinin 1,8 katı, mermer için 5,7 katıdır.

Kompozit malzeme içinse birbirine çok yakın işleme maliyeti sağlayan kesimler karşılaştırıldığında kolemanit ile daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Ancak ileriki çalışmalarda kolemanit performansı çeşitli yöntemlerle artırılarak maliyet düşürülebilir.

- Aşındırıcı boyutu ve boyut dağılımı ASJ ile kesme performansını etkileyen önemli parametrelerdendir. Çalışmada kullanılan garnet tozu 80 meş boyutunda olduğundan kolemanit tozu da 80 meş boyutuna öğütülmüştür. Boyut olarak daha kaba aşındırıcı ile yüksek hızlarda kesimler yapmak mümkündür. İleriki çalışmalarda, kolemanit 50-60 meş boyutlarında öğütülerek kesme performansı artırılabilir. Aşındırıcı kalitesini belirleyen parametrelerden birisi de tane boyutu dağılımıdır. Garnet, ASJ için direkt aşındırıcı olarak üretildiğinden tane boyutu dağılımı, toz ve yabancı maddelerden arındırma işlemi sistematik ve hassas şekilde yapılmaktadır. Kolemanit, -300  $\mu\text{m}$  / +150  $\mu\text{m}$  boyutlarında öğütülmüş ancak tane boyutu dağılımına bakılmamış ve yabancı madde ve tozdan arındırma işlemi yapılmamıştır. Bu işlemlerin de kontrolüyle kolemanitin aşındırıcı olarak performansının artırılması mümkündür.
- Hem kolemanit tozunun farklı ilerleme hızlarında ve aşındırıcı debilerinde performansını hem de bu parametrelerin ASJ ile kesmede yüzey özelliklerine etkisini gözlemlemek amacıyla farklı ilerleme hızları ve aşındırıcı debileriyle testler yapılmıştır. ASJ ile kesmede kesme kalitesini ortaya koyan yüzey özelliklerinden yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve kesme profili koniklik açıları ölçülmüştür. Tüm numuneler için artan ilerleme hızı, bu değerlerin büyümesine sebep olmuştur. Bunun nedeni, nozul ilerleme hızının artmasıyla birim zamanda yüzeye gelen aşındırıcı miktarının düşmesidir. Jet sapmasının etkisi yüksek ilerleme hızlarında daha fazla görülmektedir. Al7075 kesimlerinde jetin malzemedan çıktığı bölgede çapaklara, mermerde ise kırılmalara neden olan bu etki, radyuslu ve açılı kesimlerde istenilen geometrinin elde edilmesini engellemektedir. Jet sapmasının etkisini azaltmak için radyuslu ve açılı kesimlerde düşük ilerleme hızı, doğrusal kesimlerde ise yüksek ilerleme hızı kullanmak etkili olabilir. Artan aşındırıcı debisi, birim zamanda yüzeye daha fazla aşındırıcı

tanisinin çarpmasıyla kesme performansının artmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, aşındırıcı debisi artırılarak yapılan kesimlerde yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısında daha düşük değerler sağlamıştır.

- Garnet tozuna %30 ve %50 oranlarında kolemanit eklenmesiyle elde edilen karışımın kullanıldığı testlerde garnet tozuna oranla sertliği düşük olan kolemanitin, garnet tarafından kesilen yüzeyde parlaticı etki göstermesi beklenirken, kesilen tüm numuneler için yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve koniklik açısı değerleri sadece garnet ile yapılan kesimlere göre artmıştır. Ayrıca, kolemanit oranı arttıkça jet çıkışında görülen geometrik bozukluklar, apaklanmalar ve kırılmalarda da artış gözlenmiştir. Düşük sertlikte toz katkısının, yüzey özelliklerini olumlu yönde etkilemediğinin tespiti üzerine, sertliği kolemanitten daha düşük olan zeolit ile karışım testleri yapılmamıştır.
- Suyun içersine uzun zincir yapılı polimer yağlarının karıştırılmasıyla etkin jet boyunu uzatmak dolayısıyla kesme performansını artırmak mümkündür. İleriki çalışmalarda bu yöntem kullanılarak kolemanitin aşındırıcı olarak performansı artırılabilir.

## 8. SONUÇ

Su jeti ile kesmede, kolemanit ve zeolit tozunun aşındırıcı olarak kullanılabilirliğinin incelendiği çalışmada çeşitli malzemelerle kesme testleri yapılmıştır.

- Zeolit, karbon prepreg tabakalı kompozit malzeme dışında hiçbir malzemenin kesiminde başarı sağlayamamıştır. Bu sonuç zeolit tozunun düşük sertliğinden dolayıdır.
- Testler sonucunda aşındırıcı sertliğinin kesme mekanizması üzerindeki etkisinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit, performans açısından garnet ile karşılaştırılmış olup, garnet tozuna göre küçük ilerleme hızlarıyla ve yüksek aşındırıcı debileriyle çalışılmasına rağmen cam ve titanyum kesiminde başarı sağlanamamıştır. Kesebildiği diğer malzemeler için, yine daha küçük ilerleme hızları ve yüksek aşındırıcı debileri ile garnet performansı yakalanabilmiştir. Tüm malzemeler için kolemanit işleme maliyeti, garnet işleme maliyetinden daha yüksek çıkmıştır. Kolemanit işleme maliyeti, garnet işleme maliyetinin 1,8 katı, mermer için 5,7 katıdır. Kompozit malzeme içinse birbirine çok yakın işleme maliyeti sağlayan kesimler karşılaştırıldığında kolemanit ile daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.
- Kolemanitle yapılan kesimlerde düşük ilerleme hızları ile hem kesme-aşınma bölgesinde hem de deformasyon aşınma bölgesinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığı değerleri elde edilmiştir. Ancak yüzey kalitesindeki değişim, deformasyon aşınma bölgesinde daha fazladır. Düşük ilerleme hızları aynı zamanda küçük koniklik açıları sağlamıştır.
- Aşındırıcı debisindeki artış da pürüzlülük ve dalgalılık değerlerinde azalma ve koniklik açısında iyileşme sağlamıştır.

- Kolemanit %30 ve %50 oranlarında garnet ile karıştırılarak kesme deneyleri yapılmıştır. Kolemanit katkısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerleri ve kesme profili koniklik açılarında artış gözlenmiştir. Ayrıca, %50 kolemanit + % 50 garnet karışımıyla yapılan titanyum kesiminde jet, 90° ve 30° açılı dönüşlerde başarı sağlayamamış ve parçayı koparamamıştır.
- Garnet tozuna kolemanit katkısının, kesme performansına olumlu etkisi gözlenemediğinden, sertliği kolemanitten daha düşük olan zeolitle, garnet karışımı testleri yapılmamıştır.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: KMT Waterjet Systems, “Waterjet Cutting, A Technology on The Rise”  
[http://www.kmtgroup.com/opencms/en\\_UK/waterjet\\_systems/resources/processes/downloads/KMT\\_technology\\_description\\_ENG.pdf](http://www.kmtgroup.com/opencms/en_UK/waterjet_systems/resources/processes/downloads/KMT_technology_description_ENG.pdf) (2008)
2. Geren, N., Tunç, T., “Yapısal Farklılıklar İçeren Su-Jeti Kesme Sistemlerinin En Uygununun Belirlenmesi”, **Mühendis ve Makine**, 500:42-49 (2001)
3. Yazıcıoğlu, O., Yalçinkaya S., “Endüstride Aşındırıcılı Su Jeti Tasarımları”, **Mühendis ve Makine**, 522: 44-48, (2003)
4. Akkurt, A., “Endüstriyel Mühendislik Malzemelerinin Aşındırıcı Su Jeti (AWJ) ile Kesilmesinde Kesme Yüzeyindeki Yüzey Özellikleri Sertlik ve Mikroyapı Değişimlerinin Diğer Kesme Yöntemleri ile Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi”, Doktora tezi, **G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2002)
5. DPT, “Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri (Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu-Sodyum Sülfat-Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu”, **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik ÖİK Raporu, Ankara**, Cilt II, 1-65 (2001)
6. Geren N., Tunç T., “Su jeti kesme sistemlerinde kullanılan basınç artırıcılarda gerilme analizleri ve tasarım sınırları” **9.Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalatı Kongresi**, Ankara (2000)
7. Hashish, M., “Optimization factors in abrasive waterjet machining”, **Journal of Engineering for Industry**, 113:132-139 (1991)
8. İnternet: Flow International Corporation, “Waterjet seminar”  
<http://www.scribd.com/doc/7150120/Water-Jet-Seminar> (2002)
9. Çoğun, C., “Alışılmamış imalat yöntemleri ders notları” **G.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi**, Ankara (2003)
10. Tikhov, R. A., Babanin, V. F., Petukhov, E. N., Starikov, I., “High pressure jet cutting”, **ASME Pres**, ISBN 07918800202 (1992)
11. Ansorge, A., “Fluid jet principles and applications”, **Carbide and Tool Journal**, 198: 16-20 (1985)
12. Becker, R., Gray, G. M., “Evaluation of waterjet cutting systems for slicing potatoes”, **Journal of Food Science**, 57 (1):132-137 (1992)

13. Miller, F. K., "Waterjet cutting: technology and industria applications", **T.E.P.**, London, U.K. 154 (1990)
14. Hashish, M., "Pressure effects in abrasive-waterjet (AWJ) machining", Transactions **ASME Journal of Engineering Materials and Technology**, 111 (7): 221-228 (1989)
15. OMAX 2652 Aşındırıcılı su jeti ile kesme tezgahı ürün kataloğu, **OMAX** (2010)
16. Alkire, T.D., "Advances in direct-drive pump technology brings the competitive edge back to ultrahigh-pressure waterjets", **Proceedings of the 7th American Waterjet Conference**, 363-374, USA (1993)
17. Summers, D.A., "Waterjetting Technology 1st ed.", **Chapman & Hall**, London, 39-40 (1995)
18. Ohman, J.L., "Abrasives: Their characteristics and effect on waterjet cutting", **Proceedings of the 7th American Waterjet Conference**, 351-362, USA (1993).
19. Momber, A.W., Kovacevic R., "Principles of abrasive waterjet machining", **Springer – Verlag London Limited**, USA (1998)
20. Vasek, J., Martinec, P., Foldyna, J., Hlavac, L., "Influence of properties of garnet on cutting process", **Proceedings of the 7th American Waterjet Conference**, 375-388, USA (1993)
21. İnternet: OMAX Waterjet Cutting Systems "Abrasive Waterjet nozzles"  
[http://www.omax.com/tech101\\_c.php](http://www.omax.com/tech101_c.php)
22. Miranda, R.M., Lousa, P., "Abrasive waterjet cutting of portuguese marbles", **Proceedings of the 7th American Waterjet Conference**, 443-457, USA (1993)
23. İnternet: Indian Institutes of Technology & Indian Institute of Science, "Web Courses, Manufacturing Processes, Waterjet and Abrasive Waterjet Machining", <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-37.pdf>
24. Nanduri, M., Taggart D.G., Kim, T.J., "The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear", **International Journal of Machine Tools&Manufacture**, 42: 615-623 (2002)

25. Nanduri, M., Taggart, D.G., Kim, T.J., Haney, C., Skeelee, F.P., "Effect of inlet taper on AWJ nozzle wear", ***Proceedings of the 9th American Waterjet Conference***, 223-238, Deaborn (1997)
26. Hashish, M., Loscutoff, W.V., Reich, P., "Cutting With Abrasive Waterjets", ***Proceedings of the Second U.S. Waterjet Conference***, 421-436, Missouri (1983)
27. Hashish, M., " Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets", ***Transactions ASME Journal of Engineering Materials and Technology***, 113: 354-362 (1991)
28. Hashish, M., " A Modeling Study of Metal Cutting With Abrasive Waterjets", ***Transactions ASME Journal of Engineering Materials and Technology***, 106: 88-100 (1984)
29. Lemma, E., Chen, L., Siores, E., Wang, J., "Study of Cutting Fiber-Reinforced Composites by Using Abrasive Waterjet With Cutting Head Oscillation", ***Composite Structures***, 57: 297-303 (2002)
30. Hascalik, A., Çaydaş, U., Gürün, H., "Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining of Ti6Al4V Alloy", *Materials and Design*, 28, 1953-1957 (2007)
31. Wang, J., Wong, W.C.K., "A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 39: 855-870 (1999)
32. Hashish, M., Du Plessis, M.P., "Prediction Equations Relating High Velocity Jet Cutting Performance to Standoff Distance and Multipasses", ***J Eng Ind***, 101: 311-318 (1979)
33. Azmir, M.A., Ahsan, A.K., "Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining", ***Journal of Materials Processing Technology***, 198: 122-128 (2008)
34. Zeng, J., Kim, T. J., "Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials", ***Jet Cutting Technol.***, 483-501, Dordrecht (1992)
35. Wang, J., Guo, D. M., "The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics", ***Journal of Materials Processing Technology***, 133: 371-377 (2003)
36. Fowler, G., Pashby, I.R., Shipway, P.H., "The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V", ***Wear***, 266: 613-620 (2009)

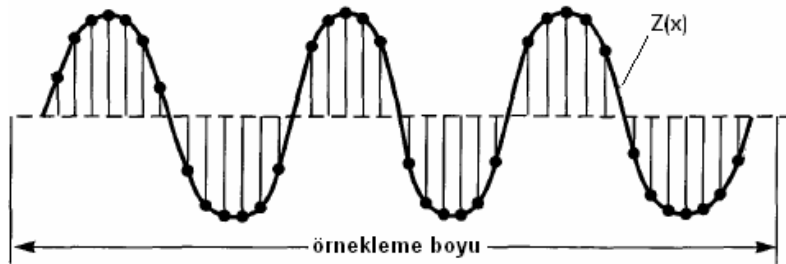
37. Axinte, D.A., Srinivasu, D.S., Kong M.C., Butler-Smith P.W., "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", ***International Journal of Machine Tools&Manufacture***, 49: 797-803 (2009)
38. Khan, A.A., Haque M.M., "Performance of difference abrasive materials during abrasive water jet machining of glass", ***Journal of Materials Processing Technology***, 191: 404-407 (2007)
39. Azmir, M.A., Ahsan, A.K., "A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate", ***Journal of Materials Processing Technology***, 209: 6168-6173 (2009)
40. Australian GMA Garnet, Ürün Kataloğu, ***GMA Garnet GmbH (Europe)*** (2010)
41. İnternet: ETİ Maden İşletmeleri "Bor Ürünleri" [http://www.etimaden.gov.tr/tr/0\\_sayfa\\_ortakSayfa.asp?hangisayfa=4\\_sayfa\\_4](http://www.etimaden.gov.tr/tr/0_sayfa_ortakSayfa.asp?hangisayfa=4_sayfa_4) (2004)
42. DPT, "Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri (Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu-Sodyum Sülfat-Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu", ***Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik ÖİK Raporu***, Cilt II, 1-65 Ankara (2001)
43. Toprak, R., Girgin, İ., "Aktifleştirilmiş Klinoptilolit ile Deri Sanayii Atık Sularından Kromun Giderilmesi", ***Türk J Engin Environ Sci***, 24: 343-351 Ankara (2000)
44. DPT, "Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri (Mika-Zeolit-Lületaşı) Çalışma Grubu Raporu", ***Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik ÖİK Raporu***, Cilt II, 56-74 Ankara (2001)
45. SAE Aerospace Material Specification, AMS-QQ-A-250/12 (2007)
46. Karaca, D., "Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelemindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının DeneySEL İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 39-42 (2010)
47. HexToW AS4 karbon elyaf ürün kataloğu, ***Hexcel Corporation*** (2010)
48. İnternet: Tan Mermercilik "Burdur Beji" <http://www.tanmadencilik.com/icerikler.aspx?kimlik=bejmarble> (2010)

49. SAE Aerospace Material Specification, AMS 4911L, Malzeme spesifikasyonu, SAE (2007)
50. Toydemir, N., "Camı oluşturan ana maddeler ve cam türleri", **G.Ü., Merkez Kütüphanesi**, 2-5, Ankara (1990)
51. HP 19/45 Basınçlandırma Ünitesi Ürün Kataloğu, **UHDE High Pressure Technologies** (2010)
52. Hashish, M., "Status and potential of waterjet machining of composites", **Proceedings of the 10th American Waterjet Conference**, 811-827, Houston (1999)
53. MarSurf M300 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ürün kataloğu, **Mahr Metrology** (2009)
54. Global-070705 üç boyutlu koordinat ölçme tezgahı ürün kataloğu, Hexagon Metrology (2008)
55. ASME B46.1, "Surface texture (surface roughness, waviness, and lay)", **ASME** (2002)

## EKLER

### Ek-1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve dalgalılık:

İş parçası yüzeyinde kesici takımın oluşturduğu topografya, pürüzlülük, dalgalılık ve form bozukluklarını bir arada barındırır. Bu yüzeysel sapmalar, kesilen yüzeyin fonksiyonu üzerinde farklı etkilere sahip olabilir. Dolayısıyla birbirlerinden ayrı değerlendirilmeleri gereklidir. Pürüzlülük, kesici takımın iş parçası yüzeyinde oluşturduğu birbirine çok yakın düzensiz izlerdir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra, yüzey pürüzlülüğünün ifadesi için en yaygın kullanılan parametredir. Yüzey pürüzlülük değerlerine karşılık gelen z-koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır (Şekil 1.1). Dalgalılık, kesme esnasında oluşan titreşim vb. etkilerin neden olduğu pürüzlülüğü göre büyük dalga boyuna sahip yüzey sapmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık profilleri Şekil 1.2’de verildiği gibidir.

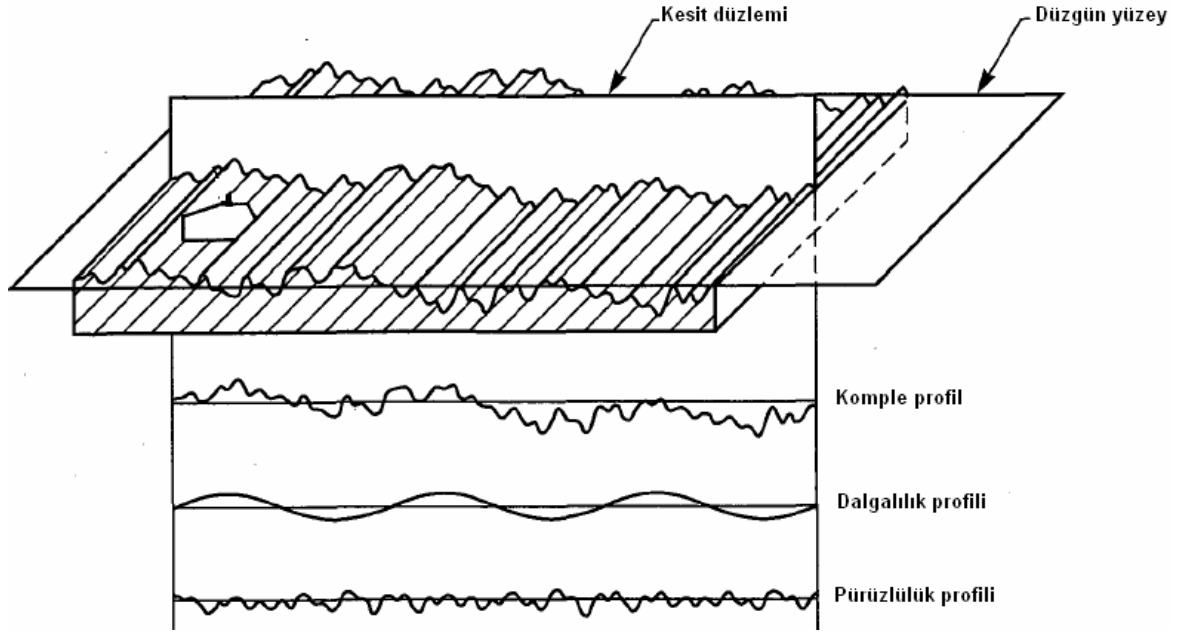


Ra = ortalama yüzey pürüzlülüğü

$$= \text{Toplam taralı alan} / \text{örnekleme boyu} \quad Ra = (1/L) \int_0^L |Z(x)| dx$$

Şekil 1.1 Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra [55]

Ek-1 (Devamı). Ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve dalgalılık:



Şekil 1.2 Pürüzlülük ve dalgalılık profilleri [55]

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : COŞANSU, Gülay  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 20.07.1980 / Ankara  
 Medeni hali : Bekar  
 e-mail : [gcosansu@tai.com.tr](mailto:gcosansu@tai.com.tr)

### Eğitim

#### Derece

Yüksek lisans

#### Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi/  
Makina Mühendisliği

#### Mezuniyet tarihi

Lisans

Gazi Üniversitesi/  
Makina Mühendisliği

20.01.2003

Lise

Kaya Bayazıtöğlu Lisesi

15.06.1998

### İş Deneyimi

#### (Ay/Yıl)

#### Yer

#### Görev

11/2006-...

TAI

Tasarım Mühendisi

01/2003-10/2006

Eskasan LTD. ŞTİ.

Üretim Mühendisi

06/2001-07/2001

ORS Rulman Fabrikası

Stajyer Makine Müh.

07/2000-08/2000

HEMA Dişli Fabrikası

Stajyer Makine Müh.

06/1999-07/1999

Türk Traktör Fabrikası

Stajyer Makine Müh.

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Voleybol, tenis, sinema, gezi