



**Research Article / Araştırma Makalesi**

**THE CHARACTERIZATION OF FRONT CUTTING GEOMETRY AND SURFACE PROPERTIES IN ABRASIVE WATER JET CUTTING OF ALUMINUM ALLOY MATERIALS**

**Adnan AKKURT\***

*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar-ANKARA*

**Received/Geliş: 10.11.2013 Revised/Düzelme: 13.04.2014 Accepted/Kabul: 04.05.2014**

---

**ABSTRACT**

It has been compulsory to use unusual machining methods, against the developments in the manufacturing sector. The Abrasive Water Jet (AWJ) method is the least known and common one. Unknown aspects of the method makes limited use. The AWJ method shows various surface roughness values depend on the cutting depth although capable of cutting all kinds of materials. So that caused to adversely affected the widespread use of the method. The cutting front geometry consists to opposite direction of the feeding is another negative ways beside on the adversely effects on the cut surface properties on workpiece. In this study, the modelling of cutting front geometry was considered to provide a positive impact on expand the usability of AWJ methods. The aluminum alloys were used as workpiece regarding an uneasy machining material for AWJ and the experimental results were evaluated.

**Keywords:** Abrasive waterjet, cut front geometry, surface properties, surface roughness.

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI MALZEMELERİN AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KESİLMESİNDE OLUŞAN YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE KESME ÖNÜ GEOMETRİSİNİN KARAKTERİZASYONU**

**ÖZET**

Makine imalat sanayindeki gelişmeler farklı işleme metotlarının kullanımlarını zorunlu kılmıştır. Aşındırıcılı su jeti bu yöntemlerden en az tanınan ve kullanılan yöntemlerden biridir. Bilinmeyen yönleri yöntemin kullanımını sınırlı kılmaktadır. Her türlü malzemeyi işleyebilme yeteneğine rağmen elde edilen yüzeylerin kesme derinliğine bağlı olarak farklılık göstermesi, yöntemin yaygın kullanılmasını olumsuz etkilemiştir. Kesik yüzey özelliklerindeki olumsuzlukların dışında ilerleme yönüne ters oluşan kesme önü geometrisi de yöntemin olumsuz yönlerindedir. Kesme önü geometrisinin modellenebilmesi bu yöntemin kullanılabilirliğini yaygınlaştıracığı ön görüşü ile yöntem için işlenmesi en sıkıntılı olduğu düşünülen farklı özelliklerdeki alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde uygulamalar yapılmış ve bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Aşındırıcı su jeti, kesme önü geometrisi, yüzey özellikleri, yüzey pürüzlüğü.

---

**1. GİRİŞ**

Gelişmekte olan malzeme teknolojisi üstün özellikli bir çok malzemeyi makine imalat sanayinde kullanıma sunmuşlardır. Geleneksel yöntemlerle işlenemeyen (yoğun takım kırılma ve

---

\* e-mail/e-ileti: aakkurt@gazi.edu.tr, tel: (312) 202 87 37

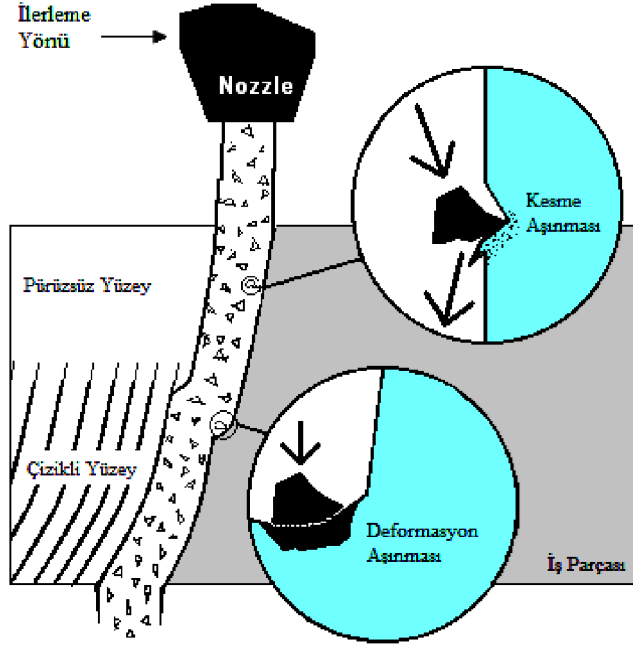
aşınmalarının yansira ekonomik olmayan hatta işlemenin imkansızlıklarından dolayı) bu malzemeler için ileri kesme yöntemi olarak tanımlanan yöntemlerin kullanımları zorunlu olmuştur. Bu yöntemlerden özellikle soğuk işleme yöntemi olarak tanımlanabilecek olan aşındırıcılı su jeti ile işleme; kesilen malzemelerin metalürjik ve mekanik özellikleri dikkate alındığında en verimli yöntem olarak tercih edilmektedir [1, 2]. Makine imalatında yoğun kullanım alanı bulan alüminyum malzemelerin diğer yoğun kullanılan malzemelere oranla ısı iletme katsayıları çok yüksek olmasından dolayı termal kesme yöntemleri ile kesilmelerinde malzeme özelliklerinde büyük değişimler söz konusu olmaktadır. Aşındırıcılı su jeti ile işleme yönteminde kesilen malzemelerde ısıl gerilmeler oluşmamakta, dolayısıyla da gerilme giderme işlemine gerek duyulmamaktadır, bu yüzden malzeme özelliklerinin önemli olduğu üretimlerde aşındırıcılı su jetinin kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Günümüz makine imalat sanayinde tornalama, frezeleme, delme ve özellikle kesme gibi işleme yöntemlerinde ulaşılmak istenen keskin köşe ve dik yüzeyleri su jeti ile işlemede elde etmek, diğer bazı işleme yöntemlerine oranla daha zordur. Bu çalışma ile hedeflenen; alüminyum alaşımı malzemelerin kesilmesi sırasında ortaya çıkan ideal kesme geometrisinden sapma miktarını hesaplayarak, aşındırıcılı su jeti ile işlemedeki en büyük olumsuzluklardan biri olarak görülmekte olan kesme geometrisinde ki sapma miktarını önceden bilinmesi ve hedeflenen yüzey toleranslarının kapsamında olup olmadığını bilerek işlem yapılmasını sağlamaktır.

## 2. KESME ÖNÜ GEOMETRİSİNİN OLUŞUMU

Kesme kalitesini belirleyen faktörler; jet oluşturan su-aşındırıcı oranı, aşındırıcı boyutu, kesme derinliği, nozulun yaklaşma mesafesi, jet basıncı, yanal ilerleme hızı ve kesilen malzeme olarak ifade edilebilir. Kesme kalitesi doğru parametrelerin seçimi ile mümkün olabilir. Yapılan deneysel çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde en etkin iki parametrenin yanal ilerleme hızı ve aşındırıcı akış hızı yani jeti oluşturan su-aşındırıcı oranı olduğu belirlenmiştir [3-5].

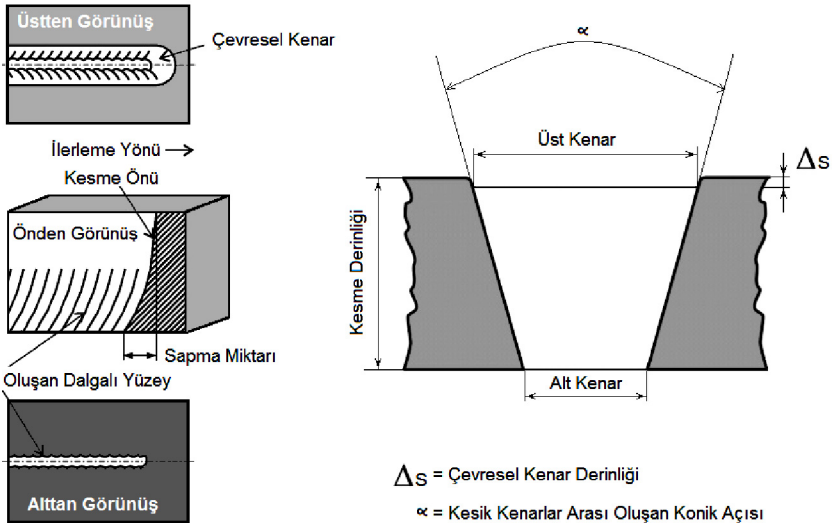
Aşındırıcılı su jeti ile işleme sürecindeki mekanizmalar, genellikle işleme parametrelerine ve malzeme kalınlığına bağlıdır. İlk aşamada dar bir açı altında iş parçasına çarpan aşındırıcı tanecikler nispeten düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır. Bu aşamadaki mekanizma “kesme – aşınma mekanizması” olarak adlandırılmaktadır. Çizgisel izlerin oluşmasına sebep olan ve kararsız işleme özellikleri sergileyen ikinci bölgede etkili olan mekanizma ise “deformasyon – aşınma mekanizması olarak isimlendirilmektedir. Bu ikinci nüfuziyet süreci, Şekil 1’ de görülen kesme yüzeyinin alt kısmındaki çizgisel izlerin temel sebebidir. Bu bölgede talaş kaldırma işlemi daha geniş bir açı altında etkili olan aşındırıcı taneciklere bağlı erozif aşınmayla kontrol edilebilir [ 2-5].

Aşındırıcılı su jetiyle elde edilen yüzeyler incelendiğinde kesme derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki artış kaçınılmazdır. Bu da iş parçasında ki kesme derinliğinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmakta ve değişkenlik göstermektedir. Yüksek enerjili huzme kullanılan herhangi bir kesme işlemi sürecinde olduğu gibi, aşındırıcılı su jeti ile kesme sırasında da yüzey pürüzlülüğündeki bu türden değişimler, araştırmaların ağırlıklı olarak talaş kaldırma mekanizmalarına yoğunlaşmasına sebep olmuştur [6-7].



Şekil 1. Aşındırıcılı su jeti ile kesik yüzey oluşum süreçleri[6]

Aşındırıcılı su jeti ile kesme süreci içerisinde aşındırıcı tanecikteki keskinliğin, jet basıncı ve jet hızında oluşan kayıplar çizikli yüzeyi kaçınılmaz kılmaktadır. Bu çizgisel yüzeyler sebebiyle ideal bir kesme işlemi elde edilememekte ve Şekil 2’de ki kesme önü geometrisi olarak tanımlanan sapmaya bağlı kademenin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [8, 9].

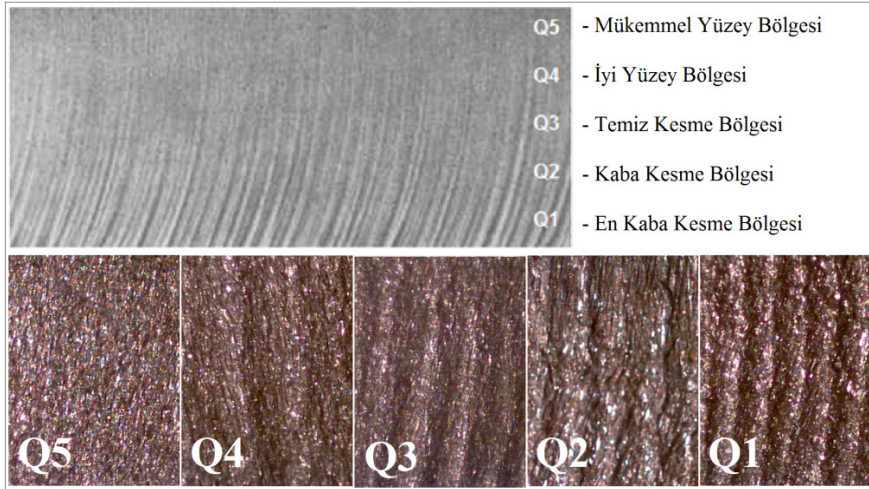


Şekil 2. Kesme işlemi ve kesme yüzey görünümleri [8, 9]

Aşındırıcılı su jeti ile kesme sırasında malzemeye etki eden kuvvet, kesme yönünde olduğu kadar, düşey yönde de etki eder. Her iki yönde etki eden kuvvetin büyüklüğü, iş parçasının malzeme özellikleri tarafından değil, asıl kesme önündeki geometri tarafından belirlenir. Kesme önündeki geometri, aşındırıcılı su jetine göre küçük açıyla eğik olan genel bir eğim ve bu eğim üzerinde yüksek düzeyde aşınma (erozyon) alanları olarak etki eden küçük ölçekli bir dizi kademe olmak üzere iki bileşene sahiptir. Ayrıca kesmenin başladığı üst yüzey ile alt yüzey arasında boyutsal farklılıklar elde edilen kesik yüzeylerin geometrilerinin düzensizliğine de sebep olmaktadır [8, 10].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmada ASJ ile kesilen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğüne yanıl ilerleme hızının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada GMA Garnet aşındırıcı kullanılarak kimyasal kompozisyonları Çizelge 1’de verilmiş olan alüminyum alaşımı malzemeler kesilmiştir. Planlanan çalışmada alüminyum malzemelerin seçilmesinin önemli bir sebebi de ASJ ile kesilen yüzeylerde oluşan aşındırıcı batmaları ve bunların kaybetmiş oldukları keskinlik ve jet enerjisindeki kayıpların sebep olduğu oyuk ve çiziklerdir. Bu oyuk ve çizikler aşındırıcılı su jeti ile kesilen yüzeyin kalitesini belirler. Her bir malzeme ve her bir yüzeyde farklı özellikler olduğundan standart bir kalite ifadesi yoktur. Asj ile elde edilen yüzeyin mikroskop altında x20 büyütme görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. ASJ ile kesilen yüzey kaliteleri [2, 11]

Kesilen bir yüzeyde beş farklı kalite bölgesi bir arada bulunur ve bu kalite bölgelerinin tamamı bir birine bağlı ifade edilir. Yani en Q5 ile ifade edilen en iyi yüzey kalitesi kendinden sonraki kaliteleri belirler [11, 12]. Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kesme derinliğine bağlı olarak, su jetinde oluşan enerji kayıplarının kesilen yüzeyin topografyasına etkisini değerlendirmek için Şekil 4’de geometrisi ve kesme genişlikleri verilmiş (185x150x20 mm) olan parça farklı iki yanıl ilerleme hızı ile kesilmiştir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, her malzeme gurubu ve her kalınlık tezgah üreticisi firmanın önerdiği ve ortak kesme hızı olan 25 mm/dak kesme hızı ile kesilmiştir (Çizelge 3). Her bir yanıl ilerleme hızı için altı kesme işlemi yapılmıştır. Su jeti içerisinde bulunan aşındırıcı şekil ve dağılımlarının homojen olmaması ve geometrilerinin farklı olmasından dolayı her bir yanıl ilerleme ile 12 toplamda 24 adet kesilmiş yüzey elde edilmiştir.

**Çizelge 1.** Kesilen malzemelerin kimyasal bileşimleri

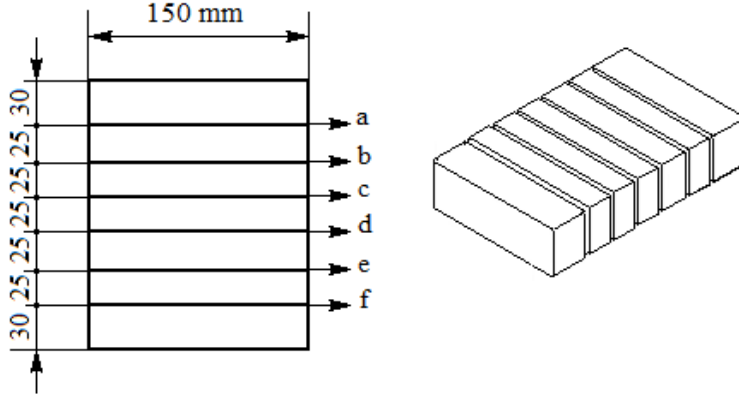
	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Mg	Ni	Ti	Cr	Al
Tic. Saf Al.	0.151	0.509	0.340	0.0044	0.701	≈ 1.17	0.0078	0.0625	0.0102	99.97
AA 2024	4.5	0.5	0.5	0.25	0.6	1.4	0.002	0.015	0,1	93.3
AA 5083	0.1	0.5	0.4	0.2	0.6	4.4	0.0025	0.015	0.15	95.6
AA 6061	0.0192	0.278	0.185	0.0943	0.290	2.57	0.0111	0.0196	0.015	96,1
AA 7075	1.6	0.55	0.403	5.48	0.014	2.59	0.01	0.2	0.215	89.6

Özellikle firma önerisi ile seçilmiş olan yanal ilerleme hızlarında daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Belirli değerlerin üzerindeki yanal ilerleme hızlarının artışı daha kaba yüzeylere sebep olmaktadır. Fakat yapılan çalışmada yanal ilerleme hızının malzeme özelliğine bağlı etkilerini incelemek hedeflendiğinden, tüm değerlendirmeler sadece ortak seçilmiş olan yanal ilerleme hızı; 25mm/dak ile kesilen numuneler üzerinden yapılmıştır. Elde edilmiş olan kesik yüzeylerin tamamında yanal ilerleme hızı ile birlikte tüm kesme parametreler sabit tutulmuştur. Bu durumda aşındırıcılı su jeti ile alüminyum alaşımı malzemelerin özelliklerine bağlı kesme önü geometrilerini oluşturan sapma miktarı, yüzey pürüzlülükleri ve üst yüzeyden alt yüzeye (dikine) sertlik değişimleri araştırılmıştır. Ayrıca alt ve üst kesik genişlikleri P 360 H Profil Projeksiyon cihazı ile ölçülmüştür. İşlem tam koparılmayan kesik üzerinde her bir malzeme için 10 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.

**Çizelge 2.** Aşındırıcılı su jeti ile kesme sistemi ve kesme parametreleri

Elektrik Motoru kapasitesi	22 kw	Enerji Tüketimi	58 kwh
Pompa Kapasitesi	3 l/dak	Yükseltici çalışma basıncı	Min 35 – Max 200
Su tüketimi	≈ 3.5 l/dak	Pompa piston çapı	20 mm
Suyun system sıcaklığı	48 °C	Suyun yükselticiye giriş basıncı	6 bar
Yükseltici çalışma basıncı	200 bar	Suyun nozula giriş çapı	0.25 mm
Suyun yükselticiden çıkış basıncı	20 bar	Aşındırıcı nozul giriş çapı	0.75 mm
Suyun debisi	3 l/dak	Nozulun parçaya uzaklığı	4 mm
Suyun nozuldan çıkış hızı	800 m/s	Suyun çıkış anındaki basıncı	400 MPa
Kesme anında oluşan ısı	≈ 55 °C	Nozulun duruş açısı	90°
Çalışma anında çektiği akım	380 V	Tüketilen enerji,	58 kwh
Tüketilen aşındırıcı miktarı	250 g/dak	Nozul uç malzemesi	Sapphire
Kullanılan aşındırıcı	GMA Garnet	Kimyasal kompozisyon	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Aşındırıcı sertliği	7.5 - 8 Mohs	Aşındırıcı parça büyüklüğü	300 µm
Suyun nozuldan çıkış çapı	0.75 mm	Nozul boyu	76.2 mm
Slurry concent	% 18	Karıştırma tüpü boyu	88,9 mm
Karıştırma tüpü çapı	1,27 mm	Nozul uç ömrü	40-50 saat

Her bir yanal ilerleme hızı ile elde edilen 12 numuneden gelişi güzel seçilmiş olan 4 numune üzerinde 2mm aralıklarla yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş olup aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri bulunmuştur.



Şekil 4. Kesilen parçaların boyutları ve şematik gösterimi

Temaslı pürüzlülük ölçme cihazı (Mitutoyo SurfTest Analyzer 402) ile o yüzeyin ortalama pürüzlülük değerleri ( $R_a$ ) ölçülmüş ve yapılmış olan bu ölçümler diğer bir pürüzlülük cihazı kullanılarak doğrulanmıştır. Aynı yanal hızla ve her bir derinlikte ölçümler tekrarlanmıştır. Pürüzlülük ölçümleri kesilmiş olan numunelerden örnekleme seçilen altı yüzeye uygulanmış ve bu yüzeyler den elde edilmiş olan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak değerler tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Malzemelerin ASJ kesilmesinde kullanılan yanal ilerleme hızlar

Malzeme	Yanal İlerleme Hızları (mm/dak)	
	Firma Önerisi (Katalog)	Ortak Seçilen Değer
Saf Ticari Alüminyum	60	25
AA 2024 Alüminyum Alaşımı	52	25
AA 5083 Alüminyum Alaşımı	46	25
AA 6061 Alüminyum Alaşımı	40	25
AA 7075 Alüminyum Alaşımı	36	25

Aşındırıcılı su jeti ile kesilen malzemelerde, malzeme ve kalınlığa bağlı olarak değişen yüzey özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için, farklı kalınlıklardaki her numune 25 mm/dak'lık ortak yanal hız ile kesilmiştir. Çalışmada yanal hız, malzeme ve kesme derinliğine bağlı yüzey pürüzlüğü değişimleri incelenmiştir.

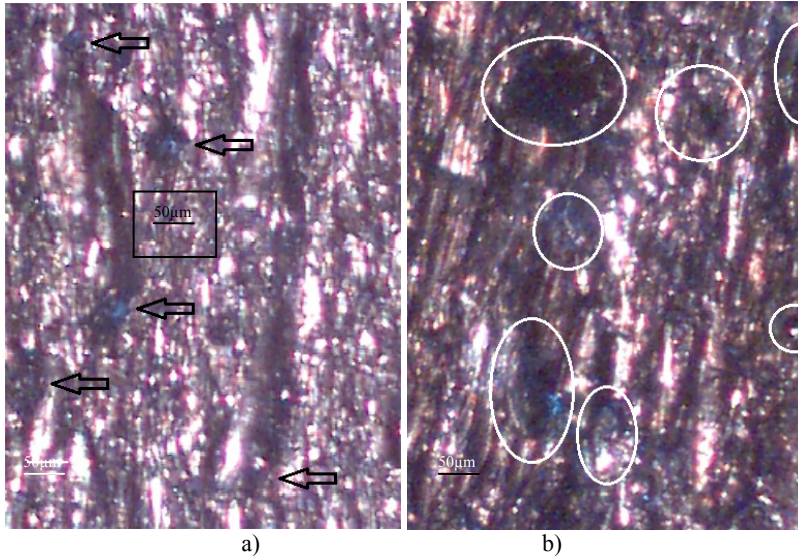
Genel olarak değerlendirildiğinde literatürde aşındırıcılı su jeti ile ilgili kesme parametreleri vb. birçok değişken araştırılmıştır. Ancak yapılan bu çalışmalarda yüzey geometrisi

ve ekonomi ön planda tutulmuş olup elde edilen yüzey özellikleri de yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlikleri gibi sınırlı kalmıştır. Oysa ki elde edilen yüzeyin kalitesi ve durumunu inceleyen çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışma ile yüzeyde oluşan bölgesel oyuk, çukur ve aşındırıcı parçacık batmaları gibi olumsuzluklarında çok önemli olduğu ortaya konmaya çalışılmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Aşındırıcı Tanecik Batması ve Oyuk Oluşumu

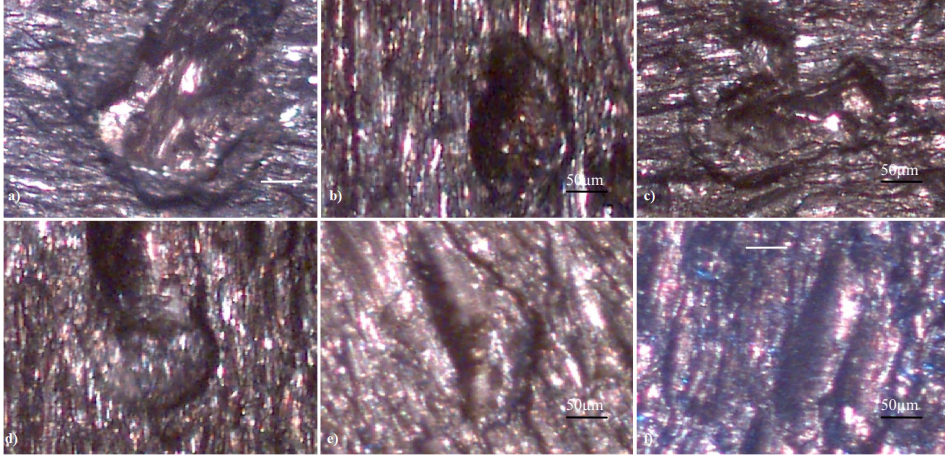
Aşındırıcı su jeti ile kesilen alüminyum alaşımı malzemelerin yüzeyleri incelendiğinde yüzeyde oluşan oyuk ve kanalların dışında, yüze batmış şekilde aşındırıcı taneciklerin olduğu gözlenmiştir. Özellikle yumuşak yapıdaki malzemelerde sıklıkla gözlenen bu durum elde edilen tüm yüzeylerde gözlenmiştir. Şekli 5 a ve b' de bu yüzeylerin görünümüne örnek olan görüntüler izlenebilir. Bu durumun en büyük sebebi; özellikle jet basıncındaki kayıplardır. Çünkü yapılan çalışmada farklı jet basınçlarla sertliği en düşük malzeme olan Ticari Saf Alüminyum malzeme ve en yüksek sertliğe sahip AA 7075 alüminyum alaşımı malzemeler kesilmiş ve basınç ne kadar yüksek seçilirse yüzeyde batık şekilde kalan taneciklerin her iki malzemede de daha az tanecik tespit edilmiştir. Ancak her iki malzeme yüzeyinde batık taneciklerin buluyor olmalarının yanı sıra AA7075 alüminyum alaşımı malzemedeki batık tanecik miktarı Ticari Saf Alüminyum malzemeye oranla çok daha az olduğu izlenmiştir. Bu durum aşındırıcı su jetinin diğer birçok kesme yöntemine olan en önemli üstünlüğünün bir sonucu olarak yorumlanabilir; "Malzeme sertliği arttıkça aşındırıcı su jeti ile kesme işlemi daha iyi sonuçlar vermektedir". Ayrıca aşındırıcı taneciklerin işlem sırasında körelmeleri de kesmeden çok kazıma yaparak deformasyona ve kesme önü geometrisinde daha büyük sapmalara sebep olmaktadır.



Şekil 5. Alüminyum alaşımı malzeme yüzeyine batan aşındırıcı tanecikler

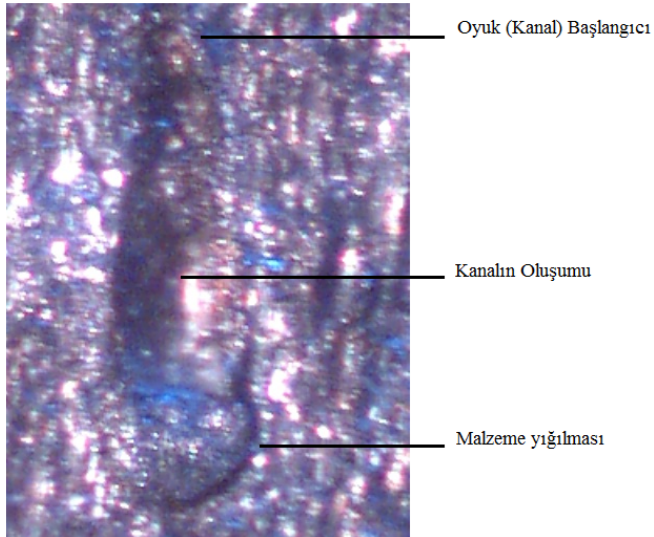
Prensip olarak bir su jeti kesme sistemi potansiyel enerjinin hazırlanması ve potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi olmak üzere iki fiziksel prensibe dayanmaktadır [13]. Bir sıvının çok yüksek basınçla sıkıştırılarak, herhangi bir malzeme üzerine yönlendirilmesi durumunda, enerji dönüşümü için uygun durum sağlanmış olur. Basınçlı sıvı jetinin gönderildiği

noktada meydana gelen enerji dönüşümü, temas noktasında malzemenin kırılmasına neden olur. Söz konusu kırılma ve aşınma birkaç mekanizmanın bir araya gelmesiyle gerçekleşir. Kesme kuvveti hidrostatik enerjinin malzemenin aşınmasını sağlayacak kinetik enerjiye sahip bir jete dönüşmesiyle elde edilir [13, 14]. Bu jet ile kesilen malzeme yüzeyleri kesme derinliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kesik yüzeyleri üzerinde bulunan belli bölgelerdeki oyuk ve kanallardan örnekler Şekil 6' da görülmektedir.



Şekil 6. Kesik yüzey üzerindeki oyuk ve kanal görünümleri

Şekil 6' da aşındırıcı taneçiklerin düzensiz oyuklar oluşturduğu ve her birinin geometrisinin farklı olduğu görülmektedir. Ortaya çıkan bu oyukların bir kısmının malzeme transferi sonucunda her hangi bir yığılma olmaksızın oluştuğu gözlenmektedir



Şekil 7. Kesik yüzeyde deformasyon aşınması sonucu oluşan kanal ve kanaldan boşalıp yüzey üzerine yığılan malzeme



Bu durum aşındırıcı taneciğin keskin ve kesme aşınması ile oyuğu oluşturduğu, diğer taraftan bazı oyuklarda ise kenarlarında malzeme yığılmasının olduğu, bununda aşındırıcı taneciğin keskinliğini yitirmesi sonucu deformasyon aşınması sonucu oluştuğunu ortaya koymaktadır. Deformasyon aşınması ile malzeme transferi sınırlı olmakta ve taşınan bu malzemeler büyük oranda ana malzemeden koparılsalarda belli bir bölümüm oyuk kenarlarına malzeme yığılmasına sebep vermektedir (Şekil 7).

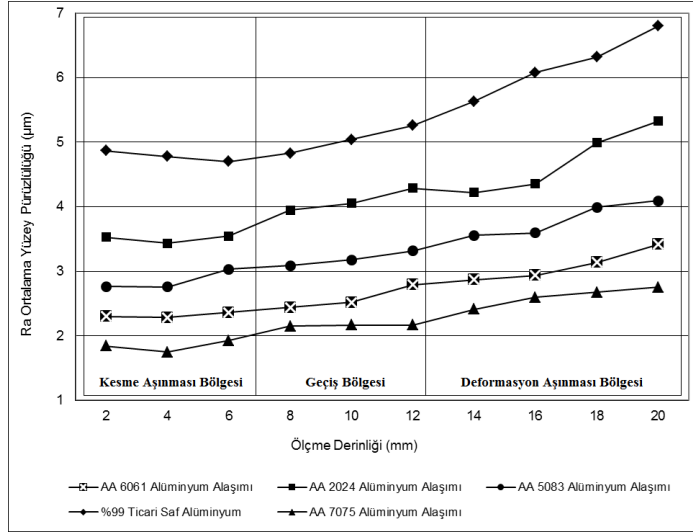
Yapılan bu çalışmada için yapılacak en önemli değerlendirme; ASJ ile elde edilen yüzeylerde oluşan oyukların en önemli sebebi jet basıncında meydana gelen düşmeler yani enerji kayıpları ve jet içerisinde bulunan aşındırıcı partiküllerin körelmesi olduğu görülmüştür. Jet basıncını kesilen her derinliğe eşit ve jet içerisinde bulunan aşındırıcı partikül miktarının artırılması ile bu olumsuzluğun minimize edilebilir.

#### **4.2. ASJ ile Kesilen Alüminyum Alaşımı Malzemelerde Yüzey Özellikleri**

Konu ile ilgili literatür genel olarak değerlendirildiğinde kesik yüzey özellikleri; kesme derinliği boyunca hakim olan iki farklı aşınma mekanizmasının oluşturduğu yüzey özellikleri farklı olmakta ve kesme aşınma mekanizmasının hakim olduğu üst bölgede daha iyi yüzey özellikleri elde edilirken, deformasyon-aşınma mekanizmasının hakim olduğu alt bölgede, artan çizgisel izlerle birlikte yüzey kalitesi de bozulmaktadır. Malzeme kalınlığı arttıkça, yüzeydeki dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü artmaktadır [9, 15]. Bu durum, 20 mm kalınlığındaki numunelerin yüzeyinden alınan ölçüm ve fotoğrafta da görülmektedir (Şekil 3 ve Şekil 8). Malzeme kalınlığının yaklaşık orta bölgesine kadar daha iyi yüzey özellikleri gözlenirken, orta bölge geçildikten sonra yüzey pürüzlülüğünde önemli ölçüde bir bozulma gözlenmektedir. Bu durum literatürdeki, ASJ ile işlemede, enerji kayıplarını karakterize eden çalışmalara bağlı olarak açıklanabilir [16, 17]. ASJ ile işlemede kabul edilebilir yüzey kalitesinin elde edilebilmesi ASJ işleminin kontrol edilebilirliğine bağlıdır. Kesilen yüzeydeki eğrisel ve çizgisel izler (Şekil 5), doğrudan jet hüzmesi enerjisindeki enerji kayıplarıyla ilişkilidir [14, 18, 19].

25mm/dak yanal ilerleme hızı ile yapılan kesme işleminde elde edilen ortalama pürüzlülük değerleri Şekil 8’ de grafikte ve elde edilen bulgular ışığında, farklı kalınlıklar için, yaklaşık  $R^2 = 0,99$  doğrulukla, yüzey pürüzlülüğünün ikinci dereceden bir polinomla modellenebileceği görülmektedir. “y” ortalama yüzey pürüzlülük değerini, “x” ise jet hüzmesinin temas ettiği yüzeyden kesme derinliğini (grafiklerde ölçme derinliği olarak ifade edilen) temsil etmek kaydı ile farklı malzemeler için farklı kalınlıklardaki yüzey özelliklerini temsil eden eğri benzetme yöntemi ile elde edilen polinom denklemleri ve bu eşitliklere ait korelasyon katsayıları Çizelge 4’de özetlenmiştir.

Deneysel olarak belirlenen Ra değerlerinin, kesme derinliğine bağlı olarak değişimini,  $R^2 = 0,99$  doğrulukta temsil eden bu eşitlikler, ASJ ile işlenen parçaların yüzey özelliklerini nümerik olarak modellemeyi esas alan literatürdeki çalışmalara [3, 20] benzer şekilde, incelenen malzemeler ve kalınlıklar için yapılabilecek nümerik modelleme ve simülasyon çalışmalarında kullanılabilecek tarzda bir alt yapı oluşturduğu görülmüştür. Kesme önu geometrisini karakterize eden eğri denklemleri ile benzerliği, yüzey pürüzlülük özelliklerinin kesme önu geometrisinin belirlenmesinde rol oynayan enerji kayıplarının bir fonksiyonu olarak karakterize edebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 8. ASJ ile kesilen alüminyum alaşımı malzemelerin (Ra) pürüzlülük değerleri

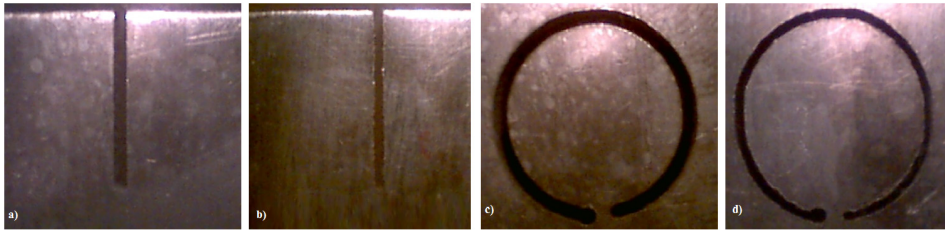
Grafikte görülen en çarpıcı sonuç, ASJ ile kesilen tüm numunelerde, su jetinin ilk temas ettiği yüzeyden itibaren kesme derinliği arttıkça yüzey kalitesinde bir bozulma olması ve maksimum kesme derinliğine ulaşıldığında yüzey pürüzlülük değerlerinin, tüm malzemelerde en yüksek değerlere ulaşmış olmasıdır. Bu durum literatürdeki bulgularla paralellik arz etmektedir [1-3, 6, 12, 14, 18]. Daha önce yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, ASJ ile işlemede elde edilen yüzey kalitesinin, kesme derinliğinin bir fonksiyonu olarak değiştiğini ve nispeten daha düzgün yüzey özellikleri sergileyen bir bölgenin altında çizgisel izlerin oluşmasıyla yüzey kalitesinin bozulduğunu vurgulamaktadır [11, 20, 21]. Bazı araştırmalarda, bu iki bölge arasında “geçiş bölgesi” olarak tanımlanan bir bölgenin varlığından söz edilmektedir. Grafiklerde izlenen bir diğer önemli durum ise sertliği en yüksek alüminyum alaşımı malzemeden en düşük sertlikte ki malzemeye ortalama pürüzlülük değerinin de doğru orantılı olarak değişkenlik göstermesidir. Yukarıda belirtilen çalışmalar yapılan çalışmadaki bulguları destekler niteliktedir.

Kesik kanal yüzeylerinde yapılan incelemelerde ise; kesmeye başlanan kenardan derinlik arttıkça jet basıncına ve kesme derinliğine bağlı olarak oluşan bir sapma söz konusudur. Bu sapma kesmeye başlanan üst bölgede ki ölçü ile kesmenin bittiği alt bölgede ki ölçü arasında bir koniklik meydana gelmektedir. Alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde iki farklı geometrik kesim (Şekil 9.) yapılarak bu sapma araştırılmıştır. Yapılan kesme işlemleri ile elde edilen kanallar üzerinde yapılan ölçümlerdeki sapma değerleri Şekil 10’ da grafikte verilmiştir.

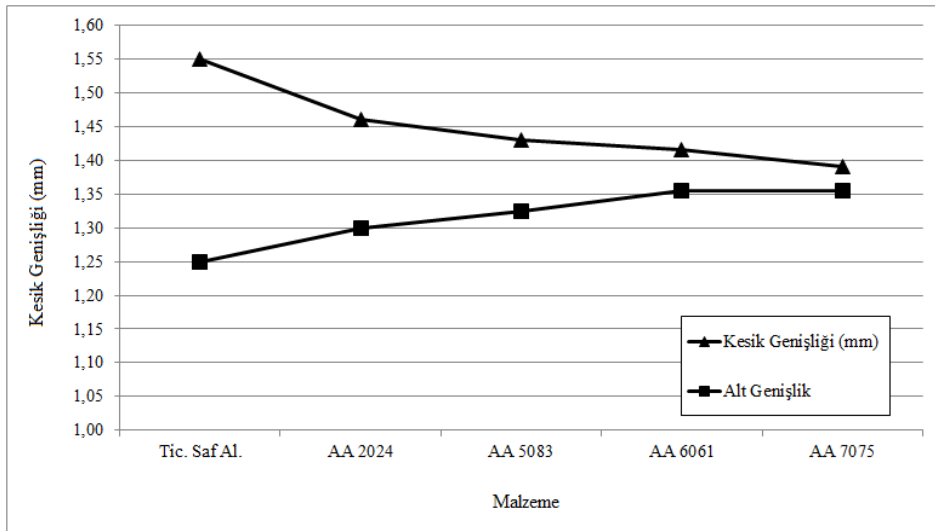
**Çizelge 4.** Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin eğri benzetme yöntemi ile modellenmesi

Malzeme	Kalınlık (20 mm)	Yanal İlerleme Hızı (25 mm/dak)	Eşitlik*	Belirtme Katsayısı (R <sup>2</sup> )
%99 Ticari Saf Alüminyum			$y = 0,0336x^2 - 0,1409x + 4,9137$	R <sup>2</sup> = 0,9905
AA 2024 Alüminyum Alaşımı			$y = 0,016x^2 - 0,0198x + 3,4438$	R <sup>2</sup> = 0,9444
AA 5083 Alüminyum Alaşımı			$y = 0,008x^2 - 0,0633x + 2,6808$	R <sup>2</sup> = 0,9807
AA 6061 Alüminyum Alaşımı			$y = 0,0102x^2 - 0,0124x + 2,2451$	R <sup>2</sup> = 0,9826
AA 7075 Alüminyum Alaşımı			$y = 0,0034x^2 - 0,0769x + 1,6903$	R <sup>2</sup> = 0,9574

“y”, µm olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerini, “x”, mm olarak ölçme derinliğini ifade etmektedir.



**Şekil 9.** ASJ ile kesilen parçaların üst ve alt görünümleri



**Şekil 10.** ASJ ile kesilen parçaların üst ve alt yüzey ölçü sapma miktarları

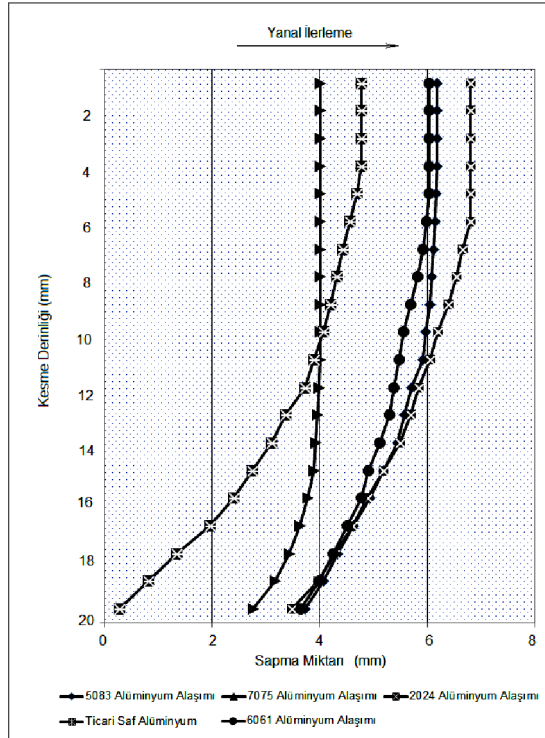
### 4.3. Enerji Kaybı ve Kesme Önü Geometrisinin Oluşumu

Hassas işleme uygulamalarında, kabul edilebilir boyut toleransları ve yüzey kalitesinin elde edilmesi için ASJ işleminin kontrol edilebilirliği esastır. Kesme derinliği yönünde kesik (kesilen kanal) genişliğindeki değişim ile kesik yüzeyindeki eğrisel ve çizgisel izler doğrudan doğruya jet hızı enerjisiindeki kayıplarla ilişkilidir. ASJ ile işleminin doğasına has bu enerji kaybı olayının tamamen elimine edilememesinden dolayı hassas işleme uygulamalarında ASJ ile işleme sürecini kontrol etmek için bu enerji kaybı mekanizmasının daha iyi anlaşılması esastır.

Zeng, Heines ve Kim [22] yaptıkları çalışmada, bu enerji kaybı olayını karakterize etmeyi amaçlayarak, ASJ ile işlenen parçaların kalitesini ve hassasiyetini iyileştirmek için işleme parametrelerini kontrol etmenin mümkün olup olmadığını tartışmışlardır. ASJ kesme veriminin azalmasına bağlı olarak genellikle kesme kafasının ilerleme yönüne zıt yönde çizgisel izler gözlenmektedir. Değişik iş parçalarının işlenmesinde, farklı kesme şartlarına bağlı olmaksızın ortaya çıkan bu izlerin birbirine benzerliği, en ilginç durumlardan biridir. Araştırmacılar bu gözlemi doğrulamak için sünek ve kırılğan malzemeleri temsil eden dört farklı tipte malzeme kullanarak bir dizi işleme deneyini, farklı işleme parametreleriyle gerçekleştirmişlerdir. Bu malzemelerde elde edilen çizgisel izlerin, iş parçasındaki derinliğe bağlı olarak farklı ölçülerde sapmalar meydana getirdiğini ortaya koymuşlardır. Enerji kaybı süreci, malzemelerin ASJ ile işlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu durum, özgül enerji ve çizgisel izlerin oluşumu gibi, yöntemdeki ekonomiklik ve kaliteyle ilgili parametreleri etkilemektedir. Momber ve arkadaşlarının geliştirdiği matematiksel model; enerji kaybı olmadan oluştuğu kabul edilen ideal kesme önü geometrisi ile gerçek işleme sırasında oluşan kesme önü geometrisinin karşılaştırılmasıyla oluşturulan, parabolik modeli esas almaktadır [23, 24]. Yapılan çalışmada, bu parabolik modellerle kurulan ilişkilerden enerji kaybı için kullanılacak katsayılar çıkarılmış ve enerji kaybının tahmini için kullanılacak eşitlikler, matematiksel olarak modellendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada farklı özellikteki, aynı kalınlıktaki alüminyum alaşımı malzemeler aynı yanal ilerleme hızı ile kesilmiş ve elde edilen yüzeydeki sapmalar ölçülmüştür. Yüzeyde oluşan izler bir parabol ile karakterize edilmiştir. Literatür de yer alan çalışmalarda kesme önü geometrisinin matematiksel olarak parabolik bir fonksiyonla modellenmesinin kullanıldığından aynı yöntem bu çalışmada da uygulanmıştır [24-27]. İdeal geometriden sapmaya bağlı olarak kayıp enerji, önemli ölçüde işleme derinliğindeki artışa bağlı olarak artmış yani derinlik arttıkça sapma miktarının doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Kayıp enerjinin, önemli ölçüde işleme derinliğindeki artışa bağlı olduğu görülmüştür. Dolayısı ile malzeme kalınlığındaki artışa bağlı olarak yüzey kalitesinde bir bozulmanın görülmesi beklenen bir sonuçtur. Bu durum, çalışmada kesilmiş numunelere ait sapma miktarlarını gösteren grafikte açıkça görülmektedir (Şekil 11). Bütün bu veriler değerlendirildiğinde yanal ilerleme hızının ve kesme derinliğinin kesme önü geometrisinin oluşumunda en önemli parametreler olduğu görülmüştür.

Yanal hızın azalması ile yüzey kalitesinin bir miktar iyileştiğini göstermekle birlikte, yanal hızdaki çok büyük değişimlere karşılık elde edilen iyileşmenin çok küçük kaldığı görülmüştür. Bu durumda kesme önü geometrisinde en önemli parametrenin kesilen malzemenin kalınlığı olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca yanal hızdaki artışın işleme maliyetlerine getireceği kazanç dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğündeki bu küçük değişim ihmal edilebilir boyuttadır [2].



Şekil 11. Kesme derinliğine bağlı oluşan sapma miktarı grafiği

Şekil 11. incelendiğinde en büyük sapmanın sertliği en düşük malzemede en düşük sapmanın da sertliği en yüksek malzemede olduğu görülmüştür. Bu durum ASJ' nin daha sert malzemelerin kesiminde daha iyi sonuç verdiğiğine atıf edilebilir. Elde edilen grafik yardımı ile kesme önü geometrisi, matematiksel olarak parabolik bir fonksiyonla modellenilebilir niteliktedir. Deneylemlerden elde edilen çizgisel iz eğrileri, Şekil 11'de görüldüğü gibi karakterize edilmiştir. Bu eğriler, niteliksel olarak yorumlamak ve kıyaslamak için eğri benzetme uygulamasında, hepsinin bir parabol eğrisiyle çakıştıkları (0,880 – 0,998 arasındaki bir korelasyon katsayısıyla) tespit edilmiştir. Eğri benzetme denklemleri ve  $R^2$  korelasyon katsayıları Çizelge 5' de gösterilen eğriler ile basit bir fonksiyon cinsinden kesme önü geometrisi karakterize edilmiştir.

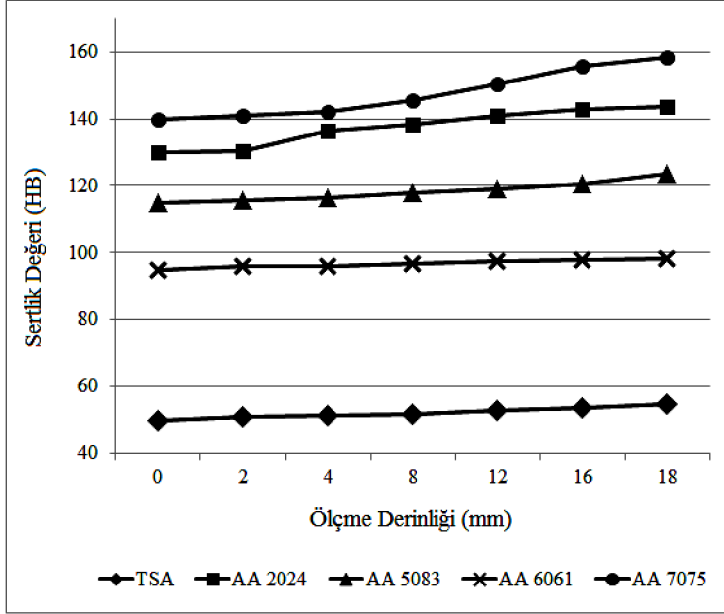
Çizelge 5. Sapma miktarı değerlerinin eğri benzetme yöntemi ile modellenmesi

Malzeme	Eşitlik*	Belirtme Katsayısı ( $R^2$ )
Ticari Saf Alüminyum	$y = -0,0161x^2 + 0,5627x + 7,8621$	$R^2 = 0,9956$
AA 2024 Alüminyum Alaşımı	$y = -0,0111x^2 + 0,4046x + 11,16$	$R^2 = 0,9986$
AA 5083 Alüminyum Alaşımı	$y = -0,0109x^2 + 0,3491x + 11,441$	$R^2 = 0,9947$
AA 6061 Alüminyum Alaşımı	$y = -0,0079x^2 + 0,2857x + 11,466$	$R^2 = 0,9962$
AA 7075 Alüminyum Alaşımı	$y = -0,0065x^2 + 0,1787x + 10,895$	$R^2 = 0,8832$

\*"y", mm olarak sapma miktarı, "x", mm olarak ölçme derinliğini ifade etmektedir.

#### 4.4. Kesme Derinliğine Bağlı Sertlik Değişimi

Yapılan çalışmada derinliğe bağlı sertlik değişimlerini bulabilmek için kesilen yüzeylerden örnekleme seçilen 6 numunenin üzerinde 4mm aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Burada birinci başlangıç derinliği 2mm ve son ölçüm derinliği 18mm' de yapılmıştır. Grafik üzerinde sıfır (0) ile gösterilen derinlikteki sertlik malzemenin çekirdek sertliğidir.



Şekil 12. Kesme derinliğine bağlı oluşan sapma miktarı grafiği

Tüm numuneler üzerinde yapılan bir diğer inceleme ise, sertlik ölçümleri derinliğe bağlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde derinlik arttıkça sertlikte de artış olduğu görülmüştür. Bu durum kesme derinliğine bağlı jet enerjisinde ki kayıpların sebep olduğu deformasyon aşınmasından kaynaklı elde edilen yüzeylere su ve aşındırıcının oluşturduğu jet kesmeden çok ezme (baskı) yaptığı ile açıklanabilir.

Grafik incelendiğinde sertlikteki en büyük değişimler en sert malzemeler olan AA 7075 ve AA 2024 malzemede meydana geldiği görülmüştür. Bunu deformasyon aşınması sonucu meydana gelen baskı kuvveti, malzemenin düzgün kesilmemesi yani transfer edilen malzemenin deformasyon etkisi ile kopması vb. bağlanabileceği gibi kesilen malzemenin yapısındaki elementlerin deformasyon aşınmasının sebep olduğu darbe etkileri vb. bağlanabilir.

## 5. SONUÇLAR

ASJ ile kesme yönteminin aynı malzeme grubu üzerinde kapsamlı bir değerlendirmesini amaçlayan bu çalışmada, özellikle makine imalat sanayinde yoğun kullanıma sahip alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

- Kesilen numuneler değerlendirildiğinde, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak, yüzeyde eğrisel-çizgisel izler halinde oluşan dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlüğü artmaktadır. Kesilen yüzeylerde, jet huzmesinin temas ettiği ilk yüzeye yakın

üst bölgede daha iyi yüzey özellikleri elde edilirken, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak, alt bölgede paralel çizgiler halinde oluşan eğrisel izler şeklinde yüzey özellikleri bozulmaktadır. Bu özellikleri sergileyen ASJ ile kesilmiş bir yüzeyin kalitesi, alt kısımda oluşan bu çizgili ve dalgalı yüzey özelliklerine göre belirlenmelidir.

- ASJ ile elde edilen yüzeylerde oluşan oyukların en önemli sebebi jet basıncında meydana gelen düşmeler yani enerji kayıpları ve jet içerisinde bulunan aşındırıcı partiküllerin körelmesi olduğu görülmüştür. Jet basıncını kesilen her derinliğe eşit ve jet içerisinde bulunan aşındırıcı partikül miktarının artırılması ile bu olumsuzluğun minimize edilebilir.

- ASJ ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve kesme sırasında meydana gelen sapma miktarı yani kesme önü geometrisi eğri benzetme yöntemi ile modellenenabilir nitelikte olup istenilen derinlikte meydana gelecek pürüzlülük ve kesme önü geometrisi belirtilen modelle bulunabilir.

- Kesme derinliğine bağlı olarak aynı yüzeyde yüzey sertlikleri de değişkendir. Alüminyum alaşımı malzemeler için bulunan bu durum diğer malzemeler içinde söz konusu olabilir.

- Aşındırıcı su jeti ile kesme işlemlerinde numune üst kenar ile alt kenar arasında açılı yüzey oluşmakta yani üstte ölçülen kesme aralığı ile kesimin alt yüzey kanal ölçüsü arasında belirgin bir fark ve kesme kalitesi izlenmektedir. Bu kesme sırasında meydana gelen enerji kayıpları ve aşındırıcı körelmelerine bağlanabilir.

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Steinhauer, T. J., “Abrasive water jets on the cutting edge of technology”, Flow Systems, USA, (1989).
- [2] A. Akkurt, “Çeşitli malzemelerin Aşındırıcı Su Jeti İle Kesilmesinde Yüzey Özellikleri, Sertlik ve Mikro yapı Değişimlerinin Farklı Kesme Yöntemleriyle Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2002).
- [3] Niu, M., Fukunishi, Y., Sawamura T., “Control of striated roughness on the surface cut by abrasive water jet”, BHR Group Jetting Technology, pp. 769-777 Ishinomaki Senshu University, Japan, (1996).
- [4] Momber, A. W., Kovacevic, R., Schüneman, R., et al, “The influence of abrasive grain size distribution parameters on the abrasive water jet machining process”, In: Rajurkar KP (ed) 1996 Proc. 25 th North American Manuf. Engrs , Dearborn , pp 21-26, (1996).
- [5] Mozurkiwicz, M., Fincuan, L., Ferguson, R., “Investigation of abrasive cutting head internal parameters” , In.:Woods P A (ed) 1988 Proc..9 th. Int. Symp. Jet Cutting Techn, BHRA Fluid Engng Cranfield, (1988).
- [6] Ohlsson, L., “The theory and practice of abrasive water jet cutting”, *PhD Thesis*, Lulea University of Technology, Sweden, (1995).
- [7] Juo, N. S., Louis, H., Meier, G., “Surface structure and kerf geometry in abrasive water jet cutting: formation and optimization”, Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, USA, 1 – 26 (1993).
- [8] Orbanic, H. Junkar, M. “Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting” *Wear* Volume 265, Issues 5–6, 25 August 2008, Pages 821–830.
- [9] Maros, Z., “Energy Approach of the Taper at Abrasive Waterjet Cutting” *Production Processes and Systems*, vol. 6. (2013) No. 1. pp. 89-96.
- [10] Kong, M. C., Axinte, D., “Response of titanium aluminide alloy to abrasive waterjet cutting: geometrical accuracy and surface integrity issues versus process parameters” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2009 Volume 223: 19-42.
- [11] Singh, P. L., Chen, W.L., Munoz, I., “Comprehensive evaluation of abrasive waterjet cut surface quality”, 6th American Water Jet Conference, pp. 139-161, Houston, USA,

- (1991).
- [12] Akkurt, A., “Cut Front Geometry Characterization in Cutting Applications of Brass with Abrasive Water Jet” *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 19(4) June 2010—599.
  - [13] Akkurt, A., “The Cutting Front Side Geometry in The Applications of D3 Cold Work Tool Steel Material Via Abrasive Water Jet”, *Gazi University Journal of Science*, Vol 26, No 2 pp. 225-239 (2013).
  - [14] Blickwedel, H., Guo, N. S., Haferkamp, H., Louis, H., “Prediction abrasive jet cutting performance and quality”, *Proceedings of 9th International Symposium on Jet Cutting Technology*, pp.163-179, BHRA, Fluid Engineering Centre, UK, (1990).
  - [15] Momber, A., Kovacevic, R., “Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting”, *ASME, Manufacturing Science and Engineering*, 361-366, USA, (1994).
  - [16] Hashish, M., “Optimization factors in abrasive-waterjet machining”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113. pp132-139, (1991).
  - [17] Momber, A., Kovacevic, R., “Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting”, *ASME, Manufacturing Science and Engineering*, 361-366, USA, (1994).
  - [18] Hashish, M., “A modeling study of jet cutting surface finish”, *PED–Vol. 58*, pp.151-167, (1992).
  - [19] Murai, H., Nishi, S., 1989, “Structure of Waterjet and Erosion of Materials” *Proceedings of the 5th American Waterjet Conference*, pp 29-31, Toronto, Canada.
  - [20] Niu, M. S., Kobayashi, R., Yamaguchi, T., 1995, “Kerf Width in Abrasive Waterjet Machining”, *Department of Machine Intelligence and Systems*.
  - [21] Hashish, M., “Characteristics of surfaces machined with abrasive water jet”, *Journal of Eng. Mat. And Tech.*, Vol. 113, pp.354-362, (1991).
  - [22] Zeng, J., Hines. R., Kim. T. J., “Characterization of energy dissipation Phenomena in abrasive water jet cutting”, *Proceeding of the 6th American Water Jet Conference*, pp. 163-177, *Water Jet Technology Association*, USA. (1991).
  - [23] Momber, A., “A simplified mathematical energy dissipation model for water jet and abrasive water jet cutting processes”, *8th Amer. Water Jet Conference*, August 26 – 29, Houston, 829 – 843, (1995).
  - [24] Momber, A., Kovacevic, R., “Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting”, *ASME, Manufacturing Science and Engineering*, 361-366, USA, (1994).
  - [25] Zeng, J., Hines. R., Kim. T. J., “Characterization of energy dissipation Phenomena in abrasive water jet cutting”, *Proceeding of the 6th American Water Jet Conference*, pp. 163-177, *Water Jet Technology Association*, USA. (1991).
  - [26] Hashish, M., 1984, “On the Modeling of Abrasive Waterjet Cutting”, *Proc. Of Seventh Int. Symposium on Jet Cutting Technology*, Paper No E1, *BHRA Fluid Engineering*, Ottawa, Canada.
  - [27] Tan, D. K. M., 1986, “A Model for The Surface Finish in Abrasive Waterjet Cutting”, *Proceedings of 8th International Symposium on Jet Cutting Technology*, pp. 31-38, England.