

# Ticari Saf Alüminyum ve Al-6061 Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Aşındırıcı Su Jeti ile Kesilmesi Uygulamalarında Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Adnan AKKURT  
Yenimahalle Anadolu Teknik, Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi  
06170, ANKARA

## ÖZET

Yeni ve alternatif bir üretim yöntemi olarak gündeme gelen Aşındırıcı Su Jeti (AWJ) ile kesme, endüstriyel amaçlı malzemelerdeki gelişmelere paralellik gösterecek şekilde, işlenmesi güç malzemelerin işlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Kesme yöntemlerindeki işleme kalitesi genel olarak; malzeme özelliklerindeki değişim, elde edilen yüzey özellikleri ve kesilen kanalın geometrisi ile karakterize edilmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel olarak yaygın kullanılan Ticari Saf Alüminyum ve Al-6061 Alüminyum Alaşımı malzemelerden hazırlanan farklı kalınlıklardaki (5, 10, 15, 20mm) numunelerin AWJ ile kesilmesinde elde edilen yüzey özelliklerinde meydana gelen değişimlerin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle işleme parametrelerinden yanıl hız değişken, diğer parametreler ise sabit tutularak, AWJ ile kesilmiş ve elde edilen yüzeylerin yüzey özellikleri incelenerek, kesme önü geometrisi karakterize edilmiştir. Değişik malzeme ve kesme önü geometrisini karakterize eden deneysel bulgular, nümerik modelleme ve simülasyon çalışmalarında kullanılabilen özellikte bir alt yapı oluşturmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Su jeti, Su jeti ile kesme, Su jeti teknolojisi, Aşındırıcı su jeti uygulamaları, Aşındırıcı su jeti ile kesme

## Effect of Cutting Speed on Surface Roughness in AWJ Cutting Applications of Commercial Pure Aluminium and Al-6061 Aluminium Alloy

### ABSTRACT

Abrasive Water Jet (AWJ) cutting is a recently developed alternative cutting and machining process. AWJ process is especially used for the engineering materials that are difficult to cut or machining with conventional processes. The quality of cutting processes is generally defined by the effect of processes on the material properties, surface texture and the geometry of the kerf. In this study the surface characteristics of commercial pure aluminum and Al-6061 aluminum alloy materials cut with AWJ are assessed. In the study feed rate was selected as variable parameter and other parameters were selected as fixed for AWJ applications. To define preliminary geometry of kerf and surface properties of studied materials; specimens with different thickness (5, 10, 15, 20) were cut with AWJ. Experimental data obtained in cutting different materials with AWJ is given in the study. These experimental data can be used in the modeling and simulating studies.

**Keywords:** Waterjet, Waterjet Cutting, Water jet technology, Abrasive water jet applications, Abrasive water jet machining

### 1. GİRİŞ

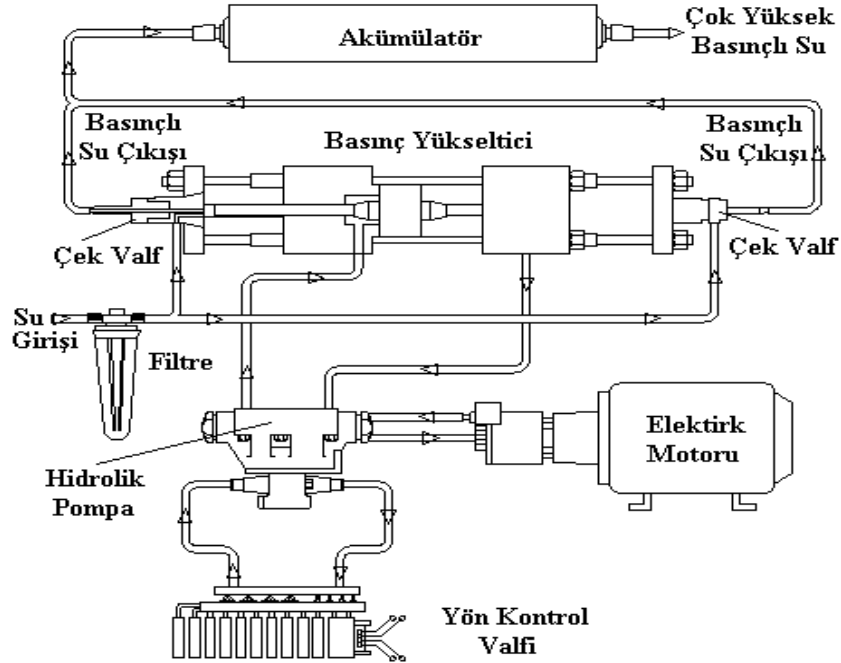
İmalat teknolojisi, gelişen teknolojiye paralel bir davranış göstermekte olup üretimde kalite ve ekonomi en çok aranan özelliklerdir. Bu amaçla, endüstrideki uygulayıcılar imalatta mümkün olan bütün seçenekleri kullanma çabası içine girmişlerdir. Maddelerin su ile kesilebileceği yıllardır bilinmekle beraber bu tekniğin güvenilirliği ve yeterliliği ancak son yıllarda olumlu bir seviyeye ulaşmıştır. Gelişmiş ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılan su jeti teknolojisi; hassas yüzey

işleme ve temizleme işlemlerinde 1968'den bu yana kullanılmaktadır. Geçen bu süre içerisinde kağıttan-çeliğe, camdan-plastiğe, tahtadan-kumaşa kadar değişik özellikteki malzemelerin kesilmesinde kullanılmıştır (1-3). Bu teknolojinin en büyük avantajı soğuk bir kesme işlemi olmasıdır. Böylelikle kesilen malzemelerde ısı gerilmeler oluşmamakta, dolayısıyla da gerginlik giderme işlemine gerek duyulmamaktadır. Bu metotla bilinen tüm malzemeler yüksek sıcaklık oluşmadan işlenebilmekte / kesilebilmektedir (4). Lastik ve plastik ile kaplanmış çeliklerde ve katlı kompozit malzemelerde

yanma ve ergime sıcaklıkları farklı olduğundan, su jeti şimdilik sorunsuz kesim için kullanılabilir tek yöntemdir. Asbest, tuğla, plastik, deri, kumaş, kağıt, patlayıcı ve yanıcı maddelerin kesme işlemleri sırasında; zehirli gazlar, toz, talaş veya kimyasal kirlilik oluşmaz. Kesme işlemi su ile sağlandığından gıda sektöründe ihtiyaç duyulan sağlık koşullarına tümüyle uygundur (5).

Su jeti ile kesme saf su jeti (Water jet – WJ)

ve aşındırıcılı su jeti (Abrasive Water jet – AWJ) ile kesme olarak iki değişik yöntemle yapılmaktadır. Her iki yöntemde çok yüksek hız kazandırılmış su jeti kullanılmaktadır. Ancak aşındırıcılı su jeti ile işlemede, basınçlı suya küçük boyutlarda aşındırıcı parçacıklar ilave edilmektedir (6). Şekil 1’de Su jeti ile kesme sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Su jeti ile kesme sistemi (1)

Endüstriyel malzemelerdeki gelişmeler her iki yöntemin de uygulama alanlarında önemli bir ilerleme sağlamıştır. Bilhassa uzay teknolojisi bu tip ileri malzemeler için büyük talepleri ortaya koymaktadır. Bu malzemeler daha yüksek mukavemetin yanı sıra daha düşük yoğunluklar, yalıtım özellikleri ve sıcaklığa karşı direnç gibi özellikleri zorunlu hale getirmiştir.

Geleneksel yöntemler kullanıldığında bu tür yeni malzemeler ya güçlükle işlenebilmekte, ya da hiç işlenememektedir. Bu durumda yeni imalat yöntemlerine ihtiyaç olmasına bir çözüm olarak, su jeti gündeme gelmektedir. Kesilecek malzemeye gerçek anlamda metal bir kesici dokunmadığından bu kesme tekniği tamamen yeni bir yöntemi temsil etmektedir (7). Prensipte olarak bir su jeti kesme sistemi potansiyel enerjinin hazırlan-

ması ve potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi olmak üzere iki fiziksel prensibe dayanmaktadır (8). 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 (1, 2, 9, 10).

Aşındırıcılı su jeti ile kesme tekniği daha sert malzemelerin kesme işleminde kullanılır. Bu kesme işleminde, bir pompa düzeneği yardımıyla su basıncı 400 ~ 415MPa'a kadar yükseltilir ve yüksek basınçlı su

kesme başlığına taşınır. Kesme başlığında yüksek basınçlı su akışı, bir orifis içerisinden karıştırma odasına odaklanır. Bu odada, önceden dozajlanmış belli miktardaki aşındırıcı parçacıkları odaklanmış su akışına eklenir. Karıştırma odasından ayrılıştta, 0.75 – 1.2 mm arasındaki bir safır uçtan geçirilen karışım iş parçasına odaklanır ve bunun sonucu aşınma ve kırılmalar meydana gelerek istenen işlem gerçekleştirilir (11,12).

Geleneksel kesme yöntemleri uygulandığında sorunlara yol açan titanyum alaşımları ve benzer özelliklerdeki metal alaşımlar, aşındırıcı su jeti ile çok daha kolay bir şekilde işlenebilmektedir. Kompozit malzeme kullanımının yaygınlaşması ve sandviç ağ tipi konstrüksiyonların kullanımı, mevcut kesme yöntemleriyle istenildiği gibi gerçekleştirilememektedir. Aşındırıcılı su

jeti, bu uygulamalar için iyi bir çözüm oluşturmaktadır (12).

Lazer, plazma – ark ve elektron ışını gibi geleneksel olmayan tek noktalı kesme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, su jeti ile işleme yöntemlerinin önemli üstünlükleri göze çarpmaktadır. Su jeti yöntemlerinde eritme/buharlaştırma olmadan kesme gerçekleştirildiği için, malzemede ısıdan etkilenen bölge olmaz ve kesilen malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişme gözlenmez. Bu nedenle su jeti çok yüksek sıcaklıklarda ve patlayıcı atmosferik ortamlarda tercih edilmektedir. Su jeti kesilen yüzeylerde aşırı cüruf oluşmasına neden olmadığı için ikincil işlem ihtiyaçlarını ortadan kaldırmaktadır. Bu avantaj, maliyeti oldukça azaltmaktadır.

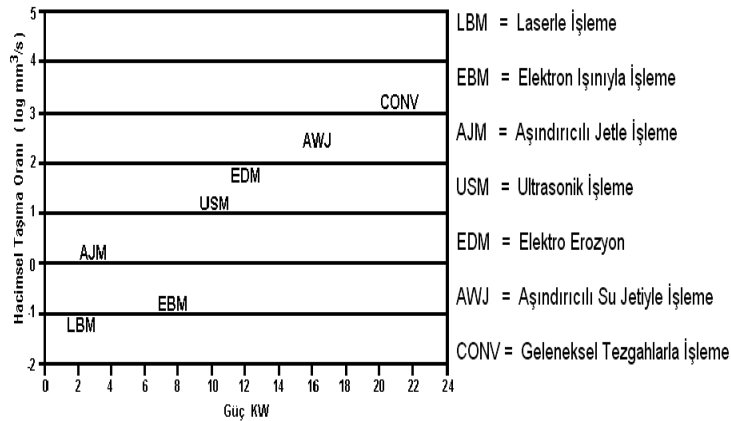
Kısaca özetlenirse su jeti sistemleri, kesme yüzey kalitesi, yanal hızı, uçucu kesme tozu çıkarmaması, aşındırıcısız sistemlerin gıda endüstrisi gibi sıhhi uygulamalarda kullanılabilir olması, kesme kuvvetlerinin çok küçük olması, sert, yumuşak, yapışkan malzemelerin aynı nozulla kesilebilmeleri, ince parçaların üst üste konularak aynı anda kesilebilmeleri gibi çok sayıda üstünlük sağlar. Sağladığı bu kadar çok üstünlüğüne karşın,

sel araştırmaya konu olmuştur. Çok sayıdaki parametrenin etkilerinin henüz tam olarak anlaşılammış olması sebebiyle, AWJ ile işleme akademik anlamda en çok çalışılan konuların başında yer almaktadır.

Ülkemizde henüz tam anlamıyla tanınmayan bu işleme teknolojisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve ülkemiz imalat sektöründe de yaygın ve etkili bir biçimde kullanılmasını teşvik etmek amacıyla yola çıkılan bu çalışmada, uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. AWJ ile yapılan kesme ve talaş kaldırma işlemlerinde, elektro erozyon gibi diğer alternatif kesme yöntemlerini olumsuz etkileyen malzeme kusurları işlemi olumsuz etkilemektedir.

Plazma ve lazer ile kesmede, kullanılan ısı enerjisi nedeniyle kesilen yüzeylerde işlenmesi oldukça zor olan yüksek sertlik derecesine sahip yapı değişiklikleri meydana gelmektedir (1, 6).

Şekil 2’de farklı işleme metodlarının güç seviyelerine bağlı olarak hacimsel talaş kaldırma oranları karşılaştırmalı olarak verilmiştir(13). AWJ ile 1,6 - 300mm kalınlıkta malzemeler  $\pm 0,13\text{mm}$  toleransla kesilebilmektedirler (7,14). AWJ ile yapılan kesme ve talaş kal-



Şekil 2. Farklı metotlarının güç seviyelerine bağlı olarak hacimsel talaş kaldırma oranları (13)

su jeti teknolojisinin ülkemizde yeterince kullanılmamasının en önemli nedeni bu teknolojinin yeterince tanınmıyor olmasıdır. Özellikle son yıllarda, sağladığı üstünlükler, esnek imalat sistemlerine olan ihtiyaç ve su jeti sistemlerinin esnek imalata uygunluğu, su jeti kesme sistemlerinin gelişmiş ülkelerde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Su jeti sistemlerinin yapısı ve temel elemanları, kesilecek malzeme türü, kalınlığı ve istenen yüzey kalitesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

Aşındırıcı su jetiyle işleme yönteminin çok fazla parametre içermesi nedeniyle, bu parametrelerin optimizasyonun önemli olmaktadır. Bu optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için; donanım kapasitesi, işleme parametreleri ve çeşitli fiziksel olgular gibi pek çok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bütün bu özellikleri sebebi ile AWJ yönteminin daha iyi anlaşılması, daha etkin ve verimli kullanılması pek çok bilim-

dırma işlemlerinde elde edilen toleranslar elektro erozyon yöntemi ile elde edilen toleranslara yakındır (14). AWJ ile 150 mm derinliğe kadar delme işlemleri her açıda  $\pm 0,03\text{mm}$  hassasiyetle yapılabilmektedir.

AWJ ile gerçekleştirilebilecek minimum delme çapı  $0,2 \pm 0,03 \text{ mm}$  dir (5).

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

AWJ ile kesilen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğüne kesme hızının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler % 99 saflıkta ticari saf alüminyum ve Al 6061 - alüminyum alaşımı malzemelerdir. Deneyde kullanılan bu malzemelere ait kimyasal bileşimler Çizelge 1 de, kesilen malzemelerin fiziksel, mekanik ve işlenme özellikleri ise Çizelge 2’ de verilmiştir. Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kesme derinliğine

bağlı olarak, su jetinde oluşan enerji kayıplarının kesilen yüzeyin topografyasına etkisini değerlendirmek için farklı malzeme kalınlıkları seçilmiştir. Kesilecek malzemelerden, Şekil 3’ te görüldüğü gibi 5, 10, 15 ve 20mm kalınlıklarında ve 100x60mm boyutlarında dört adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bir kısmı tezgah üreticisi firmanın önerdiği 20m/dak’lık yanal hızı ile diğerleri ise farklı yanal hızlarda kesilmiştir. Farklı yanal hızlarda kesilen numunelerin yüzeyleri önerilen hızlarda elde edilen yüzeyler ile karşılaştırılarak yanal hızın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan deney numuneleri

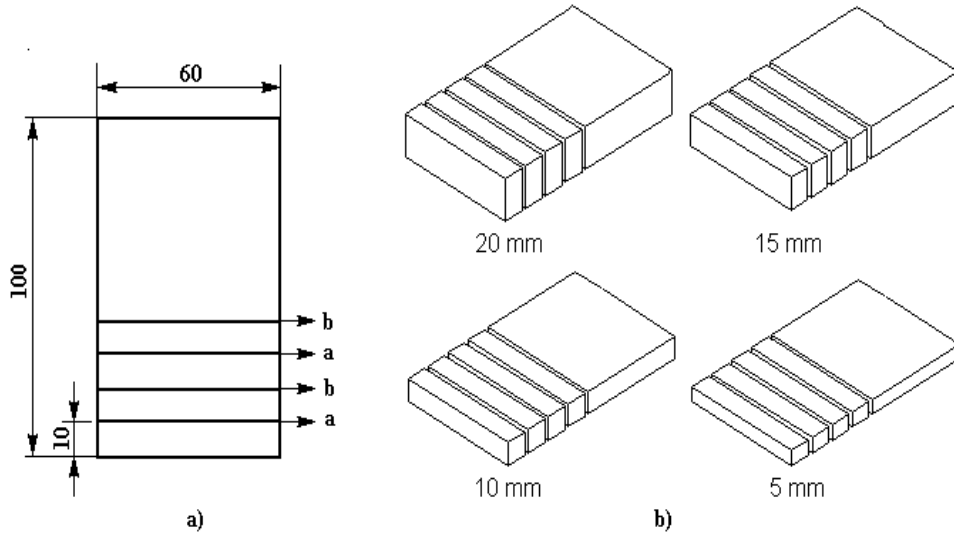
maslı pürüzlük ölçme cihazı (Mitutoyo Surfrest Analyzer 402) ile o yüzeyin pürüzlük değerleri ( $R_a$ : ortalama pürüzlük,  $R_z$ : profildeki en yüksek 5 çıkıntı ile en derin 5 girintinin genliklerinin aritmetik ortalaması ve  $R_{max}$ : ölçme yapılan profildeki en yüksek pürüzlük değeridir) ölçülmüş ve bu ölçümler “Hommelwerke Hommel Tester T100” cihazında yapılan örneklemeye ölçümlerle doğrulanmıştır.

Aşındırıcı su jeti ile kesilen malzemelerde, malzeme ve kalınlığa bağlı olarak değişen yüzey pürüzlük değerlerini incelemek amacıyla, farklı kalınlıklardaki

Çizelge 1. Kesilen malzemelerin kimyasal bileşimleri

% 99 Saflıkta Ticari Saf Alüminyum							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr
0.340	0.509	0.151	0.701	≈ 1.17	0.0044	0.00778	0.0102
S	Ti	Sb	Pb	Al			
< 0.005	0.0625	< 0.0625	0.00685	98.94			

Al 6061 - Alüminyum Alaşımı							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr
0.185	0.278	0.0192	0.290	2.57	0.0943	0.0111	0.0150
S	Ti	Sb	Pb	Al			
< 0.005	0.0196	< 0.003	0.0323	96.60			



Şekil 3. Kesilen parçaların boyutları ve şematik gösterimi.

kesme hızı parametresi dışındaki diğer tüm parametreler sabit tutularak kesilmişlerdir.

Hazırlanan numunelerin kesilmesinde Çizelge 3’ te verilen kesme hızları kullanılmıştır. Elde edilen her yüzeyde, 5 mm ve 10 mm kalınlıktaki numuneler için 1 mm aralıklarla, 15 mm kalınlıktaki numuneler 1,5 mm aralıklarla ve 20 mm kalınlıktaki numuneler 2 mm aralıklarla (kenardan ölçme derinliği) her bölge için üç farklı noktada yüzey pürüzlük ölçümleri yapılarak, te-

her numune 20 mm/dak’lık ortak yanal hız ile kesilmiştir. Elde edilen dört yüzeyde aynı ölçümler tekrarlanarak bu dört yüzeye ait pürüzlük değerlerinin aritmetik ortalaması değerlendirilmeye alınmıştır.

Aşındırıcı Su Jetiyle Kesme Sistemi Malzemelerin kesimlerinde su jetiyle imalat yapan Makon firmasındaki INGERSOLL – RAND marka üç eksenli aşındırıcı su jetiyle kesme tezgahı ve bu tezgahın basınç

ünitesi kullanılmıştır. Aşındırıcılı su jeti ile kesme tezgahı ve basınç ünitesinin teknik bilgileri çizelge 3.b

## 2.1. AWJ İle Kesilen %99 Ticari Saf Alüminyum ve Al-6061 Alüminyum Alaşımı Mal-

Çizelge 2. Kesilen malzemelerin fiziksel, mekanik ve işlenme özellikleri (15)

Fiziksel Özellikler	Tic. Saf. Alüminyum	6061 Alüminyum Alaşımı
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.713	2.713
Ergime noktası (C <sup>0</sup> )	643	640
Isı iletkenliği, (100 °C); (Kcal/ cm/C <sup>0</sup> )	190	147
Genleşme katsayısı (0-100°C), (°C <sup>-1</sup> ) x10 <sup>-6</sup>	23.6	24.2
Isınma ısısı (0-100°C); (Kcal/kg/C <sup>0</sup> )	0.22	0.23
Özdirenç (Oda sıcaklığı) (μ Ω – Cm)	2.92	3.8
<b>Mekanik Özellikler</b>		
Gerilmede elastikiyet modül, (kg/cm <sup>2</sup> )x10 <sup>3</sup>	703	703
Çekme dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	914	1266
Akma dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )	356	562
Uzama (5 cm de), (%)	40	30
Alan küçülmesi, (%)	38	35
Sertlik	23 HBN	30 HBN
Büzülme dayanımı (100 saatte %1 uzama) (kg/cm <sup>2</sup> ) 705 °C	200	240
<b>İşlenme Özellikler</b>		
Tavlama sıcaklığı, C <sup>0</sup>	343	413
Dövme sıcaklığı (başlangıç), C <sup>0</sup>	140	177
Talaşlı işlenme indeksi	C - D	B
Kaynak özellikleri	A	A

A = Çok iyi B = İyi C = Orta D = Kötü

Çizelge 3. Malzemelerin AWJ kesilmesinde kullanılan kesme hızları mm/dak

Malzeme	5 mm		10mm		15 mm		20mm	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Saf Ticari Alüminyum	295	20	133	20	83.5	20	60	20
Al-6061 Alüminyum Alaşımı	280	20	110	20	70	20	40	20

Çizelge 3.b Aşındırıcılı su jeti ile kesme tezgahı ve basınç ünitesi teknik bilgileri

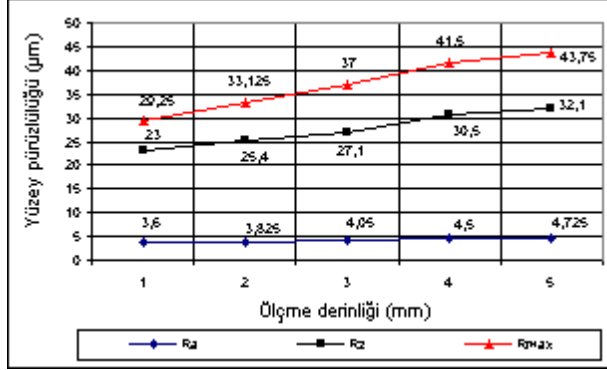
<b>Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme Tezgahı ve Basınç Ünitesi</b>	
Kontrol sistemi	BOSCH CNC yazılımı, CAD dosyalarının transferi şeklinde bilgisayar üzerinden kontrol ve kumanda gerçekleştirilerek çalışmaktadır.
Tahrik Sistemi	AC Servo motor
İlerleme (kesme) hızı aralığı	0-6000 mm/min
Cihazın çalışma sahası	x, y, z eksenleri sırasıyla 1250 X 2500 X 200 mm
Üç eksen de ilerleme hızı	7000 mm/min
Doğrusal ve Dairesel hareket hassasiyeti	0.01mm, 0.1°
Sistemde kullanılan pompa	SL □ 75HP Yüksek basınç pompası, yükseltici tipindedir
Pompa piston çapı	20 mm
Yükseltici çalışma basıncı	minimum 35 bar – maksimum 200 bar
Basınç yükseltme kapasitesi	1/20 oranında
Elektrik Motoru kapasitesi ve Enerji Tüketimi	22 kw, 58 kwh
Çalışma anında çektiği akım	380 V
<b>Su ile İlgili Parametreler</b>	
Su tüketimi	2.5 – 5 lt/min
Maksimum su basıncı	4000 MPa
Su debisi	3 lt/min
Suyun basınç yükselticiye giriş basıncı	6 bar
Suyun basınç yükselticiden çıkış basıncı	20 bar
Suyun nozula giriş çapı	0.25 mm
Suyun nozuldaki çıkış çapı	0.75 mm
Suyun nozuldaki çıkış hızı	800 m/s
Sistemde kullanılan suyun çekme sıcaklığı	min: 0°C max: 60°C çekme sıcaklığı

de sunulmuştur.

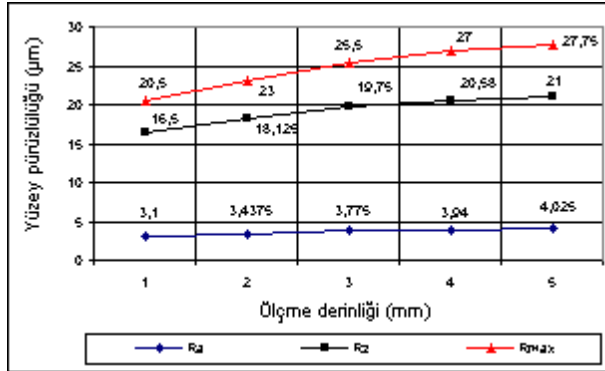
### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

**zemelerde Yüzey Pürüzlülük Değerleri**  
5, 10, 15 ve 20 mm kalınlığındaki %99 Ticari Saf Alüminyum ve Al - 6061 Alüminyum Alaşımı malzeme için ilgili kalınlığa bağlı olarak tavsiye edilen

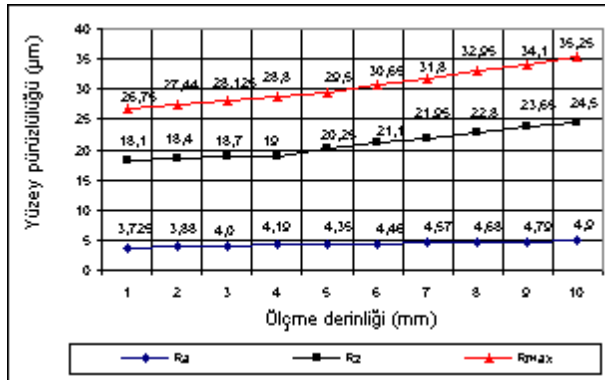
yanal hızlarda ve 20 mm/dak'lık ortak yanal hızda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri temaslı ölçme cihazı "Mitutoyo Surftest Analyzer 402" cihazı Johansson masterlar ile 1'er mm yükseklikler ayarlanarak ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



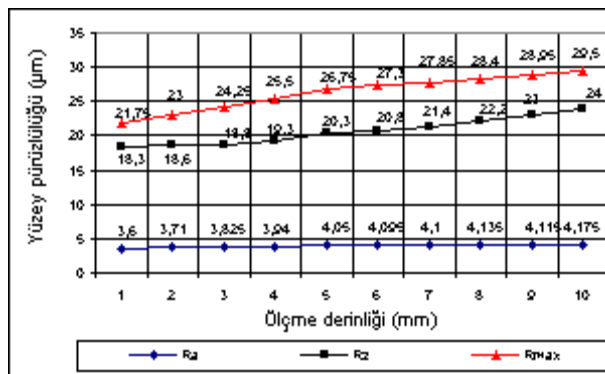
a) Kalınlık = 5 mm v = 295 mm/dak



b) Kalınlık = 5 mm v = 20 mm/dak

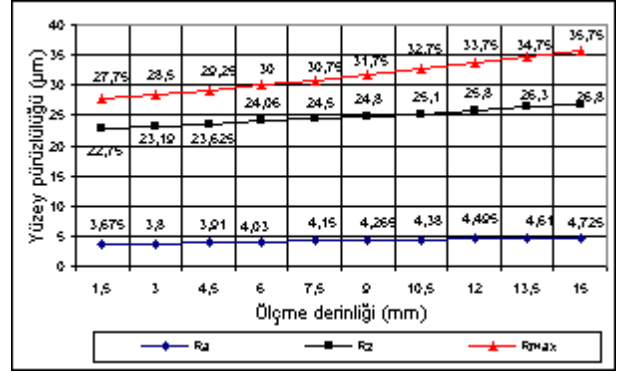


c) Kalınlık = 10mm v = 133,11 mm/dak

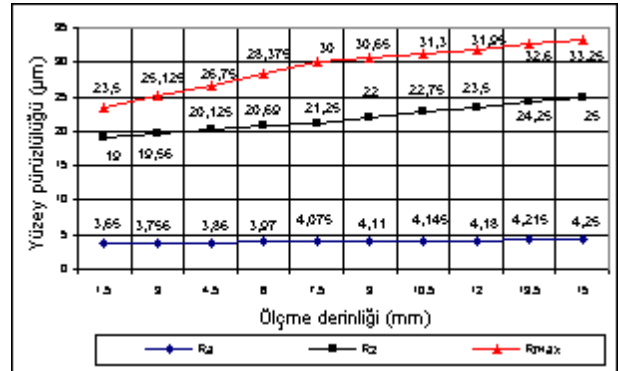


d) Kalınlık = 10 mm v = 20 mm/dak

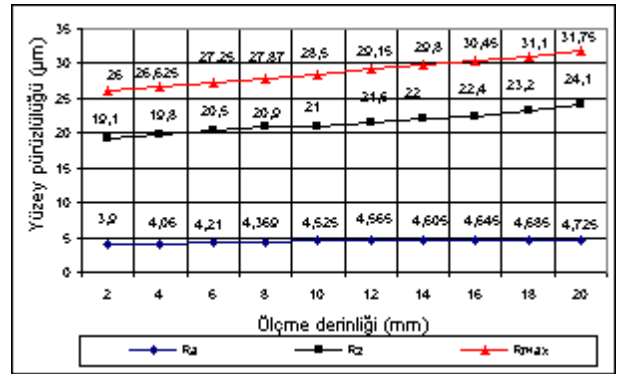
Şekil 4. %99 Ticari Saf Alüminyum malzemenin farklı yanal hızlarda kesilme hızı olarak yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişim



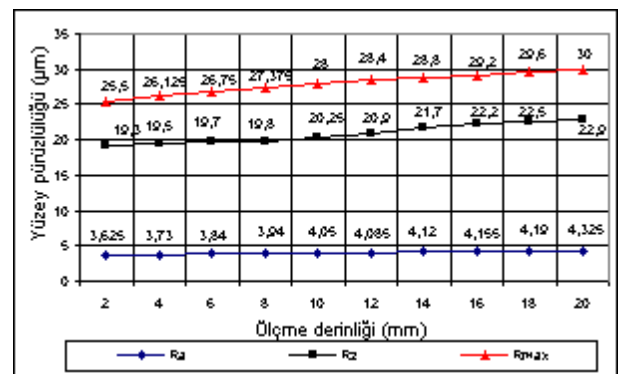
e) Kalınlık = 15 mm v = 83,5 mm/dak



f) Kalınlık = 15 mm v = 20 mm/dak



g) Kalınlık = 20 mm v = 59,98 mm/dak

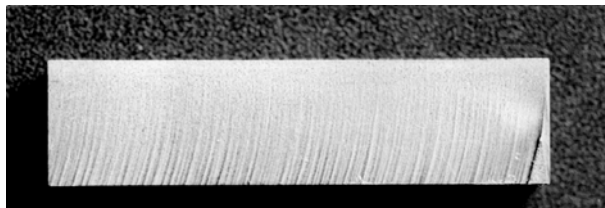


h) Kalınlık = 20 mm      v = 20 mm/dak

Grafiklerde görülen en çarpıcı sonuç, AWJ 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, her üç gösterge için de (Ra, Rz ve Rmax) en yüksek değerlere ulaşmış olmasıdır. Bu durum literatürdeki bulgularla paralellik arz etmektedir (16-29). Daha önce yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, AWJ 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 (30). Bazı araştırmalarda, bu iki bölge arasında “geçiş bölgesi” olarak tanımlanan bir bölgenin varlığından söz edilmektedir (31-33).

Literatürdeki deneysel çalışmalarda “optik lazer cihazı” ile tespit edilen bu yüzey özellikleri (34-37), bu çalışmada kullanılan “temaslı ölçüm” cihazları ile doğrulanmaktadır.

Kesme derinliği boyunca hakim olan iki farklı aşınma mekanizmasının (kesme-aşınma mekanizması/deformasyon-aşınma mekanizması) oluşturduğu yüzey özellikleri farklı olmakta ve kesme aşınma mekanizmasının hakim olduğu üst bölgede daha iyi yüzey özellikleri elde edilirken, deformasyon ve diğer aşınma mekanizmalarının hakim olduğu alt bölgede, artan çizgisel izlerle birlikte malzemenin yüzey kalitesi de bozulmaktadır (38-39). Malzeme kalınlığı arttıkça, yüzeydeki dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Bu durum, 20 mm kalınlığındaki numunenin yüzeyinden alınan fotoğrafta da görülmektedir (Şekil 5). 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, AWJ ile işlemede, enerji kayıplarını karakterize eden çalışmalara bağlı olarak açıklanabilir (40-44). AWJ ile işlemede kabul edilebilir yüzey kalitesinin elde edilebilmesi AWJ işleminin kontrol edilebilirliğine bağlıdır. Kesilen yüzeydeki eğrisel ve çizgisel izler (Şekil 5), doğrudan jet hızı enerjisindeki enerji kayıplarıyla ilişkilidir (45).



Şekil 5. AWJ ile kesilmesinde elde edilen yüzeylerde oluşan çizgisel izler

Bu izler genellikle bir “parabol” ile karakterize edilebilmektedir. Literatürde kesme önu geometrisinin, matematiksel olarak parabolik bir fonksiyonla modellenmesi kullanılmıştır (45, 46). İdeal geometriden sapmaya bağlı olarak kayıp enerji, önemli ölçüde işleme derinliğindeki artışa bağlı olarak artmaktadır. Dolayısı ile malzeme kalınlığındaki artışa bağlı olarak yüzey kalitesinde bir bozulmanın görülmesi beklenen bir sonuçtur. Bu durum, aynı yanal hızda (20 mm/dak) kesilmiş numunelere ait grafiklerde açıkça görülmektedir (Şekil 4. b, d, f, h). Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), 5 mm kalınlığındaki numunelerde 4 µm civarında iken, 20 mm kalınlığındaki numunelerde 4,325 µm’ye kadar çıkmıştır. Şekil 4’deki grafiklerde gözlenen diğer önemli bir sonuç, yanal hızın yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok etkili bir parametre olmadığı yönündedir. Yanal hızın yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu literatürdeki çalışmalarda da vurgulanmaktadır (25-35). Şekil 4’deki grafikler, yanal hızın azalması ile yüzey kalitesinin bir miktar iyileştiğini göstermekle birlikte, yanal hızdaki çok büyük değişimlere karşılık elde edilen iyileşmenin çok küçük kaldığını göstermektedir. Özellikle 5 mm kalınlığındaki numune ele alındığında hızda yaklaşık % 1500’lük bir azalmaya karşılık yüzey pürüzlülüğünde elde edilen iyileşme sadece % 15’ler de kalmaktadır. 20 mm’lik numune baz alındığında ise yanal hızda yaklaşık % 300’lük bir azalmaya karşı elde edilen iyileşme % 8,5 civarındadır. Yanal hızdaki artışın işleme maliyetlerine getireceği kazanç dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğündeki bu küçük değişim ihmal edilebilir boyuttadır.

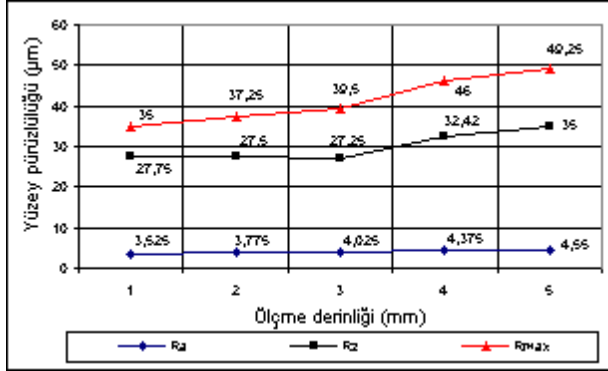
Şekil 4.a, c, e, g de ki grafikler, tezgah yazılımı tarafından malzeme özelliklerine bağlı olarak belirlenen yanal hızlarda, farklı kalınlıklar için elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinde bir tutarlılık olduğunu sergilemektedir. Bu durum, malzeme cinsi ve kalınlığına bağlı, otomatik olarak seçilen bu hızların doğruluğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki çalışmalar, AWJ ile işlenen bir yüzeyin kalitesini, alt kısımda paralel çizgiler halinde oluşan dalgalı yüzeyler tarafından belirlendiğini vurgulamaktadır (17-22, 28-47). Bu durum dikkate alındığında, ticari saf alüminyumun AWJ ile kesilmesinde elde edilebilecek ortalama yüzey pürüzlülük değerinin (Ra) 4,725 µm ~ 4,9 µm civarında olacağını göstermektedir. Yanal hızın 20 mm/dak’a düşmesiyle bu değerler kalınlığa bağlı olarak 4,025 µm ~ 4,325 µm’ye kadar düşmektedir.

Dört farklı kalınlıktaki Al 6061 alüminyum alaşımı malzemede, bu malzeme için ilgili kalınlığa bağlı olarak tavsiye edilen yanal hızlarda ve 20 mm/dak’lık ortak yanal hızda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6’da ki grafiklerde bir arada gösterilmiştir. Ticari saf alüminyumda gözlemlendiği gibi Al 6061 alüminyum alaşımı malzemede de, jet hızının ilk temas ettiği yüzeyden itibaren derinlik (ölçme derinliği) arttıkça yüzey pürüzlülüğünde bir artış göze çarpmaktadır. Bu du-

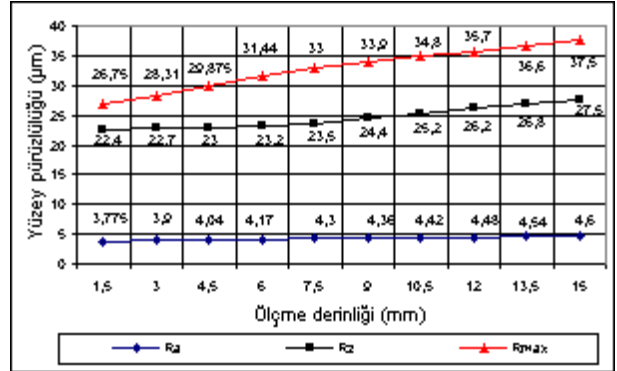
rum daha önce açıklandığı gibi, beklenmekte tarzda olup, literatürle paralellik arz etmektedir. Enerji kayıpları sebebi ile değişen kesme önü geometrisi, yüzey pürüzlülüğünü belirleyen eğrisel-çizgisel izlerin temel sebebidir. Kesilen yüzeylerin alt bölgesindeki pürüzlülük, üst tarafa göre daha fazla olup kaliteyi belirleyen bölgedir.

d) Kalınlık= 10 mm v = 20 mm/dak

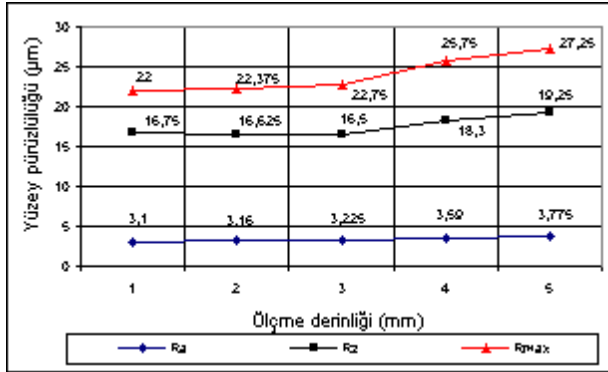
Şekil 6. Al-6061 Alüminyum Alaşımı malzemenin farklı yanıl hızları ve mesafesine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişim



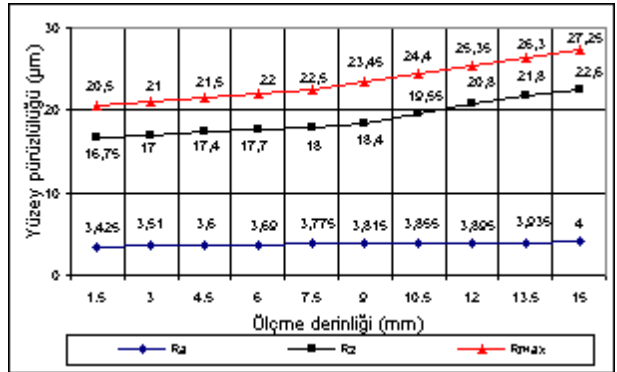
a) Kalınlık = 5 mm v = 280 mm/dak



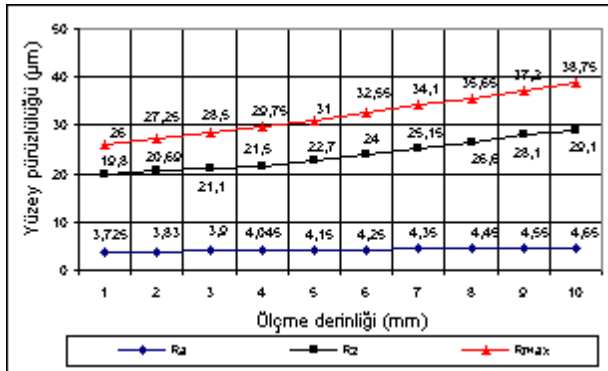
e) Kalınlık = 15 mm v = 70 mm/dak



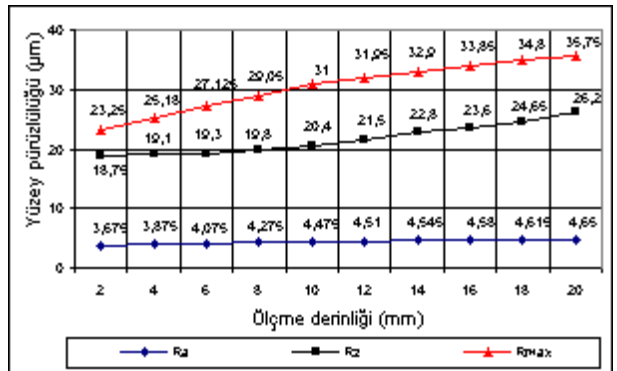
b) Kalınlık = 5 mm v = 20 mm/dak



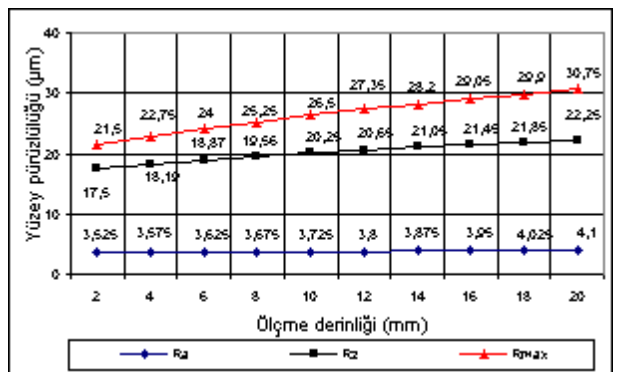
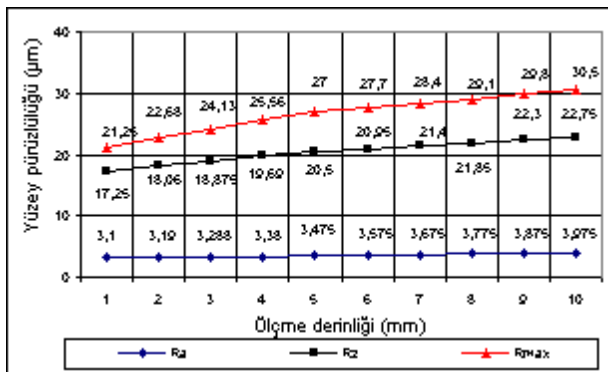
f) Kalınlık = 15 mm v = 20 mm/dak



c) Kalınlık = 10 mm v = 110 mm/dak



g) Kalınlık = 20 mm v = 40 mm/dak





h) Kalınlık = 20 mm      v = 20 mm/dak

Ticari saf alüminyum ile Al 6061 alüminyum alaşımı karşılaştırıldığında, özellikle alaşım elementlerinin etkisi dikkate alınarak, tavsiye edilen hızlarda bir düşme olduğu dikkat çekmektedir. Bu düşüş, her iki malzeme grubu arasında, 5 mm kalınlığındaki numunelerin kesilmesi için çok az iken (% 5 civarında), 20 mm kalınlığındaki numunelerde çok daha fazla (% 33 civarında) olmaktadır. Tezgah yazılımı tarafından tavsiye edilen bu veriler baz alındığında, kesilen malzeme kalınlığının önemli bir parametre olduğu bir kez daha ön plana çıkmaktadır.

Malzeme kalınlığındaki artışa bağlı olarak, yanal hız tavsiye edilen değerlere düşürülmesine rağmen, yüzey pürüzlülüğünde kalınlıktaki artışa bağlı olarak az da olsa bir kötüleşme olduğu gözlenmektedir. Bu kötüleşmenin çok önemli boyutlarda olmaması (5 mm kalınlık için Ra = 4,55 µm iken 20 mm kalınlık için Ra = 4,65 µm civarında) yanal hızın kalınlığa bağlı olarak ciddi anlamda azaltılmış olmasına bağlanabilir. Çünkü, 5 mm kalınlık için 280 mm/dak olarak seçilen yanal hız, 10 mm için % 150, 15 mm için % 300 ve 20 mm için ise % 600 civarında düşürülmüştür. Bunun anlamı, kalınlıktaki % 100'lük bir artışa karşılık yanal hızda tavsiye edilen düşüş % 150'lere, kalınlık daha da arttıkça % 200'lere çıkmaktadır. İlk bakışta çok yüksek gibi görülen bu hızdaki azalma, pürüzlülük değerleri baz alındığında tutarlı sonuçlar sergilemektedir. Şekil 6.a, c, e, g incelendiğinde Ra, Rz ve Rmax değerlerinin farklı kalınlıklar için birbirine çok yakın seviyede kalmış olması, tavsiye edilen bu hızların geçerliliğinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

Ticari saf Alüminyuma göre, Al 6061 Alüminyum Alaşımı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünde, az da olsa bir iyileşme göze çarpmaktadır. Malzemelerin alt bölgesindeki pürüzlülüğün yüzey kalitesini belirlediği dikkate alınacak olursa, Al 6061 Alüminyum Alaşımı malzemelerde ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 4,55 µm ~ 4,65 µm civarındadır. Ticari saf Alüminyum için bu değer 4,73 µm ~ 4,9 µm civarındadır. Bu iyileşme, klasik talaş kaldırma yöntemleri için de benzer eğilim söz konusu olduğundan alaşım elementlerinin yüzey kalitesi, üzerindeki olumlu etkisine atfedilebilir.

Yanal hızın 20 mm/dak'a düşmesiyle bu değerler kalınlığa bağlı olarak 3,78 µm ~ 4,1 µm kadar düşmektedir (Şekil 4. b, d, f, h).

20 mm/dak'lık ortak yanal hız esas alındığında, her kalınlık için, hızdaki ciddi düşüşe bağlı olarak yüzey kalitesinde bir iyileşme olduğu göze çarpmaktadır. Ancak bu iyileşme hızdan verilen tavsiye

göre çok düşük boyutlarda kalmaktadır. Bu anlamda yanal hızın, aynı kesme derinliği için yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok etkili bir parametre olmadığı ve yüzey pürüzlülüğü için malzeme kalınlığı ile yanal hız arasında doğru ilişkinin kurulması gerektiği söylenebilir.

## 9. SONUÇLAR

Güncel bir teknoloji ürünü olan AWJ ile kesme yönteminin kapsamlı bir değerlendirmesini amaçlayan bu araştırmada, özellikle makine imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan endüstriyel mühendislik malzemelerinden % 99 ticari saf alüminyuma ve Al - 6061 alüminyum alaşımı malzeme ve farklı kalınlıkları üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Denenen malzemelerin ve farklı kalınlıkların tamamında benzer özellikler elde edilmiştir.
- Kesilen numuneler değerlendirildiğinde, malzeme kalınlığındaki artışa bağlı olarak, yüzeyde eğrisel-çizgisel izler halinde oluşan dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Kesilen yüzeylerde, jet hüzmelerinin 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 AWJ ile kesilmiş bir yüzeyin kalitesi, alt kısımda oluşan bu çizgili ve dalgalı yüzey özelliklerine göre belirlenmelidir.
- Literatürdeki çalışmalarda, optik ölçme cihazlarıyla belirlenen bu yüzey özellikleri, bu çalışmada endüstriyel olarak yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde yaygın kullanılan temaslı ölçme yapan cihazlarla da doğrulanmıştır.
- Malzeme ve kalınlığa bağlı olarak, tezgah yazılımı tarafından önerilen yanal hızlar dikkate alınarak yapılan kesme işlemlerinin sonuçlarını gösteren grafikler dikkate alındığında, artan kalınlık değerleri için elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerindeki tutarlılık, seçilen hızların geçerliliğini göstermektedir. Bu durum oldukça yeni teknoloji ürünü sayılabilecek AWJ ile kesmede, işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmaların, bu tür kesim tezgahı üretimi yapan imalatçılar tarafından dikkate alındığını göstermektedir.
- Elde edilen bulgular sonucunda, AWJ ile kesilen bu malzemelerde ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri, % 99 ticari saf alüminyum için 4,725 µm ~ 4,9 µm ve Al - 6061

alüminyum alaşımı için  $4,55 \mu\text{m} \sim 4,65 \mu\text{m}$  civarındadır.

- Tavsiye edilen hızlarda ve 20 mm/dak'lık ortak hızda kesilen numunelerin yüzey özellikleri değerlendirildiğinde işleme parametrelerinden yanıl hızın, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarını destekler niteliktedir.

## 10. KAYNAKLAR

1. A. Akkurt, "Çeşitli malzemelerin Aşındırıcı Su Jeti İle Kesilmesinde Yüzey Özellikleri, Sertlik ve Mikro yapı Değişimlerinin Farklı Kesme Yöntemleriyle Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2002).
2. Hunziker, W., "Water-jet cutting", Bqstroic Lazer AG. CH-3362 Niederönz, Switzerland, (1990).
3. Jeff, D., "Waterjet cutting systems", Ingersoll-Rand Company (1999).
4. Haylock, R., "Waterjet cutting – A Technology Afloat On a Sea of Potential Manufacturing Engineering", Journal of Eng. Materials and Technology Vol. 99, pp 37-41, (1987).
5. Steinhauser, T. J., "Abrasive water jets on the cutting edge of technology", Flow Systems, USA, (1989).
6. Hashish, M., "Optimization factors in abrasive-waterjet machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 113. pp132-139, (1991).
7. Hashish, M., "Abrasive-waterjet machining", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111. pp 154-162, U.S.A, (1989).
8. Öjmertz, C., "A Study on abrasive waterjet milling, department of production engineering", Thessis for Degree of Doctor of Philosophy; March- Sweden., (1997).
9. Richard, F., "Waterjet machining in relationship to design engineering for manufacturability", Hydro - Abrasive Machining, , California, U.S.A, (1992).
10. 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: Rajukar K P (ed) 1996 Proc. 25 th North American Manuf. Engrs , Dearborn , pp 21-26, (1996).
11. Morris, C. J., "A laboratory study of high pressure waterjet assisted cutting", National Coal Board, U. K, (1987).
12. Jet Edge , "Ultra high pressure intensifier pumps", A Division of TC / American Monorail, Inc. U.S.A, (2001).
13. "Water jet cutting", Applications and Technical Details, Krause, (2000).
14. Warnecke, H. J., And Schlatter, M., "Treatment of materials with high pressure waterjets", E330, Vol. 60. pp 189-201, Stuttgart, GERMANY, (1984).
15. Keskin, İ., "Malzeme el kitabı", Onarsan İnşaat Sanayiii ve Ticaret A.Ş. Genişletilmiş II. Baskı, Ankara, (1991).
16. Nakamura, H., Nazaraki, T., Yanagihara, S., "Cutting technique and system for biological shield", Nuclear Technol. 86:168-178, (1989).
17. 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).
18. 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,
19. Hashish, M., "Prediction models for AWJ machining operations", 7th American Water Jet Conference, pp. 205-216, Seattle, USA., (1993).
20. Tan, D. K. M., "A model for the surface finish in abrasive waterjet cutting", Proceedings of 8th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp. 31-38, England, (1986).
21. Hashish, M., "Steel cutting with abrasive water jets", Proceedings of 6th International Symposium on Jet Cutting Technology, University of Surrey, UK. (1982).
22. Guo, N. S., Louis, H., Meier, G., et al. "Recycling capability of abrasive water jet cutting" In: Lichtarowicz A(1992) Jet Cutting Technol., Kluwer Acad, Publ., Dordrecht, pp 503-523, (1992).
23. Kovacevic, R., "Surface texture in abrasive waterjet cutting", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 10, No:1, pp. 32-40, (1991).
24. Liu, B. L., Shang, Y., Yao, H., et al. "The recent pre-majet advance in cutting and derusting technology". In: Lichtarowicz A (ed) 1992 Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp 451-460, (1992).
25. Chao, J., Geskin, E., "Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces", 7th AWJ Conferece, USA, (1993).
26. Chen, W. L., Geskin, E. S., "Measurements of the velocity of abrasive water jet by the use of lazer transit anemometer". In: Saunders D(ed) 1991 jet Cutting Techno, Elsevier Sci. Publ London , pp 23, (1991).
27. Muruges, L., Srinivasan, S., Scattergood, R. O., "Models and materials properties for erosion of ceramics", Journal of Mater: pp. 55-61, (1991).
28. Engel, S.L., Labus, T.J., "Industrial applications and comparison of laser and abrasive waterjet technologies", Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications. 2nd Ed., ISBN 1-880342-01-4, Publ. by the WJTA, St. Louis, MO, USA, (1993).
29. 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).
30. Akkurt, A., Şeker, U., Ercan, F., "Aşındırıcılı su jeti (AWJ) ile işlemede enerji kaybı olayının deneysel tahmini, karakterizasyonu ve modellenmesi-yapılan çalışmaların değerlendirilmesi", G.Ü. Tek. Eğt. Fak. Journal of Polytechnic, Cilt 5, Sayı 2, pp 137-147, Ankara, Türkiye, (2002).

31. Hunt, C. D., Kim, T. J., Reuber, M., "Surface finish optimization for abrasive water jet cutting", 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, The BHRA Proceedings, Japan, (1988).
32. Akkurt, A., Şeker, U., Ercan, F., "Aşındırıcılı su jetiyle kesmede elde edilen yüzey özellikleri-yapılan çalışmaların değerlendirilmesi", G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Journal of Polytechnic, Cilt 5 Sayı 4, pp 299-309 Ankara, Türkiye, 2002
33. Burnahm, C.D., Kim. T. J., "Statistical characterization of surface finish produced by abrasive waterjet", The 5th American Water jet Symposium, Proceedings Toronto, Canada, (1989).
34. Blickwedel, 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).
35. Engel, S.L., Labus, T.J., "Industrial applications and comparison of laser and abrasive waterjet technologies", Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications. 2nd Ed., ISBN 1-880342-01-4, Publ. by the WJTA, St. Louis, MO, USA (1993).
36. Chao, J., Geskin, E., Chung, Y., "Investigations of the dynamics of the surface topography formation during abrasive water jet machining", Proc. of 11th Int. Conf. On Jet Cutting Tech., (1992).
37. Fukunishi, Y., Kobayashi, R., Uchida, K., "Numerical simulation of striation on water jet cutting surface", Proc. of 8th American Water Jet Conference, pp. 157-169, Houston,USA., (1995).
38. Çetinkaya, C., "Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir Malzemelerin SiC Aşındırıcı Karşısındaki Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Politeknik Dergisi Cilt 6 Sayı 4, syf. 661-669, 2003.
39. Çetinkaya, C., "Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir Malzemelerin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Politeknik Dergisi, Cilt 6, Sayı 3, sf. 559-567, 2003.
40. Bahadur, S., Badruddin, R., "Erodent particle characteristics and the effect of particle size and shape on erosion", Wear 158: pp. 189-208, (1990).
41. Hashish, M., "A modeling study of jet cutting surface finish", PED–Vol. 58, pp.151-167, (1992).
42. Arola, D., Ramulu, M., "Mechanism of material removal in abrasive water jet machining of common aerospace materials," Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, pp. 43-64, Water Jet Technology Association, St. Louis., (1993).
43. Zhou, G., Geskin, E. S., Chung, Y.C., "Investigation of the topography of waterjet generated surfaces", PED–Vol.62,pp. 191-202, (1991).
44. Raju, S. P., Ramulu, M., "Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive water jet cutting", ASME, Manufacturing Science and Engineering, pp. 339-351, New York, USA, (1994).
45. 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).
46. Momber, A., Kovacevic, R., "Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting", ASME, Manufacturing Science and Engineering, 361-366, USA, (1994).
47. Hashish, M., "Characteristics of surfaces machined with abrasive water jet", Journal of Eng. Mat. And Tech., Vol. 113, pp.354-362, (1991).
48. Hashish, M., "The effect of beam angle in abrasive water jet machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 51-56, (1993).
49. Kovacevic, R., Mohan, D.I., Zhang, Y.M., "Cutting force dynamics as a tool for surface profile monitoring in AWJ", Journal of Engineering for Industry, Vol.117, pp. 34-47, (1995).