

## Mekanik, kimyasal ve hibrit yüzey aşındırma işlemlerinin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey enerjisine etkisi

*Effect of Mechanical, Chemical and Hybrid Surface Etching on Surface Energy of AA7075 Aluminum Alloy*

Benek HAMAMCI\*, Burcu ÖZTÜRK

Kafkas Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 3600, Kars

• Geliş tarihi / Received: 18.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 20.03.2023

### Öz

Yapıştırma bağlantı dayanımı, malzeme yüzeylerinin birbirleri ile etkileşimlerine ve numunelerin yüzey morfolojilerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. İyi bir yapışmanın elde edilmesi için yeterli yüzey koşulu gerekmektedir. Yüzey morfolojisi, pürüzlülük değerleri ve serbest yüzey enerji (SYE) değerleri bağlantı dayanımına nasıl etki ettiği ve bu değerlerin kendi arasındaki ilişkileri önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, kimyasal dağlama, kumlama ve hem kumlama hem de kimyasal dağlama ile hibrit aşındırılmış yüzeylerin, Yüzey morfolojisi, pürüzlülük değerleri, temas açısı ve SYE değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Farklı tekniklerle aşındırılan yüzeylerin farklı yüzey morfolojileri oluşmuştur. Farklı yüzey morfolojilerine sahip numunelerin yüzeyine farklı sıvılar kullanılarak temas açısı değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca Aşındırılan AA7075 numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D profilometre ile analiz edilmiş, yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Farklı tekniklerle aşındırılan yüzeylerin farklı yüzey morfolojileri oluşmuştur. Yüzeylerin, SYE ve temas açısı değerleri ise yüzeyin ne kadar ıslatılabilir olduğu hakkında bize bilgi verir. Bu sebepten AA7075 yüzeylerinin yüzey pürüzlülük ve SYE değerleri kıyaslanmış ve yüzeylerin mekanik, termodinamik ilişkileri çalışmada ortaya konulmuştur. SYE hesaplamalarında OWRK ve Zisman metodu kullanılmış ve iki yöntemden elde edilen değerlerin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. En yüksek SYE değerleri kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH olan hibrit aşındırılan yüzeylerde elde edilmiştir. Her bir yüzey işleminde yüzey pürüzlülük değerleri farklı değerler almıştır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülük değerleri ve SYE arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** OWRK, SYE, Temas açısı, Yüzey aşındırma, Zisman metodu

### Abstract

Adhesion it is known that the bond strength varies depending on the interaction of the material surfaces with each other and the surface morphology of the samples. Sufficient surface conditions are required to achieve good adhesion. It is important how the surface morphology, roughness values and free surface energy (SFE) values affect the bond strength and the relationships between these values. The aim of this study was to investigate the relationship between surface morphology, roughness values, contact angle and SFE values of hybrid etched surfaces with chemical etching, sandblasting and both sandblasting and chemical etching. Different surface morphologies were formed of the surfaces etched with different techniques. Contact angle values were determined by using different liquids on the surface of the samples with different surface morphologies. In addition, the surface morphology of the etched AA7075 samples was analyzed by scanning electron microscope (SEM) and 3D profilometer, and surface roughness values were determined. Different surface morphologies of the etched surfaces were formed by different techniques. The SFE values of the surfaces give us information about how wettable the surface is. For this reason, the surface roughness and SFE values of AA7075 surfaces were compared and the mechanical and thermodynamic relations of the surfaces were revealed in the study. OWRK and Zisman methods were used in the calculations of SFE and it was seen that the values obtained from the two methods were consistent with each other. The highest SFE values were obtained on hybrid etched surfaces with sandblasting+0.5M NaOH and sandblasting+1M NaOH. Surface roughness values took different values in each surface treatment. As a result, it is seen that there is no direct relationship between surface roughness values and SFE.

**Keywords:** OWRK, SYE, Contact angle, Surface etching, Zisman method

\* Benek HAMAMCI; benekhamamci@kafkas.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

AA7075 alaşım askeri ve uçak sanayinde, makine parçalarında, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda, otomotiv sanayi ve nükleer uygulamalarda çok tercih edilen bir malzemedir (Akpinar & Akpinar, 2019; Aydin vd., 2015). Hafifliğin önemli olduğu alanlarda tercih edilen AA7075 alaşım, bağlantı gerektiren işlemlerde ürün hafifliğini daha da fazla sağlamak için yapıştırma bağlantıları tercih edilip kullanılabilir (Fu vd., 2010; Mansourian-Tabaei vd., 2014). Örneğin yapıştırma, kaplama veya baskı sırasında iyi ıslatılabilirlik ve buna bağlı olarak yüksek bir SFE gereklidir (Kim vd., 2003; Martínez-Landeros vd., 2019). Yapıştırma bağlantılarından önce malzeme yüzeylerine farklı yüzey modifikasyon uygulanır. Çünkü yapıştırma dayanımı etkileyen en önemli parametrelerden biri yapıştırılacak yüzeye uygulanan yüzey işlemleridir ve bu konuda birçok çalışma mevcuttur. Bu işlemlerin her biri yüzeyleri farklı şekilde etkiler ve yüzeyin farklı yüzey topografik yapısının oluşmasına sebep olur (Kwon & Lee, 2000). Başka bir deyişle muameleler, yüzeyin termodinamik değişikliklerine yol açar ve yüzey topografya değişikliğine sebep olur (Dikici, 2019; Fathi Azarbayjani vd., 2009; Narbon vd., 2019a). Bu sebepten aşındırılan yüzeyin, kristalografik yapısının da incelenmesi önemlidir. SYE, malzeme yüzeyindeki atomların denge durumu ile güçlü bir şekilde ilişkili malzeme karakteristiğidir (Han vd., 2019; Rudawska & Jacniacka, 2018). SYE katı bir yüzeyin farklı sıvılarla nasıl etkileşimde olduğu hakkında bize bilgi vermektedir. Sıvı ve katı arasındaki ilişki yüzeye damlatılan sıvının yüzeyle oluşturduğu açı yani temas açısı ile belirlenebilir. Temas açısı katı yüzeyinin sıvı teması ile ne kadar ıslatılabilirliği hakkında bilgi de verebilmektedir. Temas açısı küçük ve büyük olması SYE'yi direkt etkilemektedir. Katı yüzey topografyasının farklılığı SYE'yi etkilediği bilinmektedir ve (Annamalai vd., 2016; What Is Surface Energy?, t.y.). Yüzey aşındırma işlemleri farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Örneğin kimyasal aşındırma işlemleri, asidik ve bazik çözeltiler ile metal alaşımlarının mekanik olarak zayıf yüzey sınır tabakalarının kaldırılması şeklindedir (Hu vd., 2019; Narbon vd., 2019a; Purabgola vd., 2020). Mekanik yüzey aşındırma işleminde, zımparalama, kumlama, lazer, plazma vb. uygulamalar kullanılarak yapılmaktadır (Fotakis vd., 2007; Sun vd., 2015; Wan vd., 2018; Zhu vd., 2019). Ayrıca yüzeye uygulanan hem mekanik hem de kimyasal aşındırma yapılan çalışmalarda mevcuttur (Dikici, 2019).

Yapıştırılacak parçaların yüzeylerine uygulanan aşındırma yöntemlerinin bağlantı mukavemetini arttırdığı bilinmektedir (Han vd., 2019; Hu vd., 2019; Narbon vd., 2019a). Fakat hangi aşındırma yönteminin yapıştırma dayanımını daha çok arttırdığı önemli bir konudur ve tercih edilme sebebidir. Aşındırma sonrası aynı yüzey pürüzlülük değerine sahip ya da benzer topografik oluşum gösteren yüzeyler oluşabilir. Bu sebepten yüzeylerin SYE değerlerini bilmek ve bu sayede yüzey ıslatılabilirlikleri hakkında bilgi edinmek ve bu sayede en doğru yüzey aşındırma yöntemlerinden birini seçmek daha doğru olacaktır.

Bu çalışmada, AA7075 alaşım yüzeylerine mekanik, kimyasal ve hibrit olmak üzere üç farklı aşındırma yapılmıştır. Malzemeler mekanik aşındırma olarak kumlama, kimyasal aşındırma olarak ise hem HCl ile hem de NaOH çözeltisi ile dağlanmıştır. Hibrit aşındırma olarak da önce kumlama yapılmış daha sonra numuneler kimyasal aşındırmaya tabi tutulmuştur. Farklı aşındırma işlemine tabi tutulan yüzeylerin temas açısı ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş, OWRK ve Zisman metodu kullanılarak SYE değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada amaç, yüzey pürüzlülük ve SYE arasında ilişkileri belirlenmek ve yüzeylerin ıslatılabilirlikleri hakkında bilgi edinmektir. Literatürde AA7075 numune yüzeylerine aşındırma işlemleri uygulanan farklı çalışmalar mevcuttur fakat asidik ve bazik çözelti ile dağlama, mekanik ve hibrit yöntem ve bunların kıyaslamalarının yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. AA7075'in aşındırılan yüzeylerinin SYE, temas açısı değerleri ve ıslatılabilirlik özellikleri incelenmiştir ve hangi yönteminin uygulamalar için tercih edilebilir olduğu ve bağlantı dayanımını arttırabileceği öngörüsünde bulunulmuştur. Bu açıdan literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Malzeme

##### 2.1.1. Material

Çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 1' de verilen AA7075 alaşım plaka halinde Seykoç firmasından temin edilmiştir. AA7075 25x25mm ölçülerinde kesilmiştir.

**Tablo 1.** AA7075 kimyasal bileşimi (Alaşım - 7075 - Seykoç Alüminyum, t.y.)  
**Table 1.** Chemical composition of AA7075 (Alaşım - 7075 - Seykoç Alüminyum, t.y.)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,4	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	0,2	0,15	Kalan

## 2.2. Yüzey hazırlama işlemleri

### 2.2. Surface preparation processes

Çalışmada AA7075 yüzeyleri mekanik, kimyasal ve hibrit yüzey aşındırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Mekanik aşındırma olarak kumlama yapılmıştır. Kumlamada kullanılan alümina 5µm boyutundadır. Kimyasal aşındırma, farklı molaritelere sahip NaOH ve HCl çözeltileri ile yapılmıştır. Hibrit aşındırmada ise önce kumlama daha sonra kimyasal aşındırma işlemleri yapılarak yüzeyler elde edilmiştir. Kimyasal aşındırma işlemleri için numuneler ultrasonik banyoda %99,6 saflıktaki asetonda 45 dakika boyunca bekletilerek üzerindeki yağ, kir ve tozdan arındırılmıştır. Daha sonra numuneler, asetondan ayrıştırılması için deiyonize su ile yıkanmış ve yüzeyler kurutulmuştur. Kurutulan alüminyum alaşım numuneleri 0,5M ve 1M NaOH ile 0,5M ve 1M HCl çözeltilerinde ultrasonik banyoda 55°C de 10'ar dakika bekletilerek yüzeyinde aşındırma işlemi yapılmıştır. Numuneler aşındırma işleminden hemen sonra reaksiyonu durdurmak için deiyonize suya daldırılarak 10 dakika bekletilmiştir. Aşındırma işlemlerinden sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan kir ve tozdan arındırmak için ultrasonik banyoda asetonda 10'ar dakika bekletilmiştir. Numuneler asetondan ayrıştırılması için tekrar deiyonize su ile yıkanmış ve yumuşak bir fırça ile fırçalanmıştır. Asetondan tamamen ayrıştırılması için oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kumlama işleminden sonra da yüzeyde oluşan kir ve yağdan arındırmak için yüzey saf aseton ile temizlenmiş ve daha sonra asetondan tamamen arındırılmak için ise yüzey deiyonize su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Hibrit işlem ise kumlama yapılan yüzeye kimyasal aşındırma yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tekrar yüzeyleri temizlemek amacıyla asetonda bekletilmiş daha sonra deiyonize su ile yıkanmıştır. AA7075 işlemsiz numune yüzeyi ve farklı aşındırılan 9 farklı numune yüzeyi üzerine yapılan muameleler Tablo 2' de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yüzey işlemleri  
**Table 2.** Surface treatments

Yüzey Aşındırma Şekli	Aşındırma işlemleri
İşlemsiz Yüzey	-
Kimyasal Aşındırma	0,5M NaOH
	1M NaOH
	0,5M HCl
Mekanik Aşındırma	1M HCl
	Kumlama
	Kumlama+0,5M NaOH
Kimyasal ve Mekanik Aşındırma	Kumlama+1M NaOH
	Kumlama+0,5M HCl
	Kumlama+1M HCl

## 2.3. Yüzey 3D profilometre ve SEM görüntüleri

### 2.3. Surface 3D profilometer and SEM images

Farklı yüzey topografisi elde edilmiş tüm numunelerin görüntüleri ve yüzey pürüzlülüğü Atatürk Üniversitesi DAYTAM Merkezi'nde bulunan Kla Tencor Stylus Profiler P7 cihazı ile nispeten geniş yüzey alanında analiz yapabilen ve yüzeyin üç boyutlu olarak hızlı ve temassız haritalanmasını sağlayan bir optik profilometre ile elde edilmiştir. Numunelerin yüzey görüntüleri ise Zeiss Sigma 300 olan SEM cihazı ile elde edilmiştir.

## 2.4. Temas açısı ölçümleri

### 2.4. Contact angle measurements

Katı yüzeye bir sıvı damlatıldığında açı oluşur. Bu açının büyüklüğü katı yüzey ile sıvı arasındaki kohezyon ve adezyon kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlıdır. Oluşan bu açı temas açısıdır. Temas açısı, temas edilen katının cinsine ve yüzeye damlatılan sıvının cinsine bağlı olarak değişmektedir. Katı yüzey ve sıvı arasında elde edilen

temas açısı yüzeyin ıslatılabilirlik derecesini ifade eder (Boz & Kurt, 2007; Rudawska & Jacniacka, 2018). Farklı işlemlere tabi tutulan yüzeyler temas açılarına göre tanımlanan hidrofilik veya hidrofobik yüzey yapısına sahip olabilmektedir ve bunun sebebi de yüzey topolojilerinin farklılıklarındandır (Rudawska & Jacniacka, 2009).

Çalışmada yüzey aşındırma işlemleri sonunda elde edilen numune yüzeylerinin temas açısı ölçümü iki farklı polar sıvı olan deiyonize su ve gliserol, apolar sıvı olan benzen kullanılarak yapılmıştır. Temas açısı ölçümleri için kullanılan deiyonize su, gliserol ve benzenin yüzey gerilimi ve bileşenleri Tablo 3’ te verilmektedir. Temas açısı, SYE değerleri hesaplanırken kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Test sıvılarının özellikleri  
*Table 3. Properties of test liquids*

Sıvı	Kutup etkisi	Yüzey Enerjisi (mJ/m <sup>2</sup> )			Yoğunluk (g/m <sup>3</sup> )	Viskozite (mPa-s)
		$\gamma_1$	$\gamma_1^p$	$\gamma_1^d$		
Deiyonize su	polar	72,8	51,0	21,8	1	1
Gliserol	polar	63,4	37	26,4	1,26	1,412
Benzen	apolar	28,9	0	28,9	0,876	0,625

## 2.5. Serbest yüzey enerji

### 2.5. Free surface energy

SYE, malzemelerin yüzey katmanındaki atomların denge durumunu tanımlayan termodinamik büyüklüklerden biridir. İki ortamın faz sınırında bulunan moleküller arası etkileşimlerindeki spesifik dengesizlik durumunu yansıtır. SYE, geri dönüşümlü bir izotermal işlemde dengede iki fazı ayırırken yeni bir yüzey birimi oluşturmak için gerekli olan işittir. Temas açısı kullanılarak SYE' yi hesaplama yöntemlerinin temeli, Young eşitliğine dayanmaktadır. Katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazın temas noktasındaki yüzey gerilimlerini temsil eden kuvvetlerin dengesi durumundan türetilmiştir (Rudawska & Jacniacka, 2009).

Sıvıların SYE' sini belirlemek için çok sayıda yöntem vardır. Fakat katıların sıvılar gibi SYE' sini belirlemek için doğrudan bir yöntem yoktur. Bu sebepten sıvı-katı SYE yöntemleri kullanılarak dolaylı katı SYE hesaplanabilmektedir. En çok kullanılan SYE hesaplama yöntemleri Fowkes, OWRK ve Wu yöntemleridir (Dikici, 2019; What Is Surface Energy?, t.y.). Ayrıca Zisman yöntemi, Neumann yöntemi ve giderek daha popüler hale gelen Van Oss-Chaudhury-Good yöntemleri ile de katı SYE hesaplanabilmektedir (Dikici, 2019).

Bu çalışmada, katı SYE değerleri OWRK ve Zisman yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. OWRK yönteminde, yüzey katmanlarında bulunan iki maddenin molekülleri arasındaki etkileşimlerinden yararlanılarak SYE hesaplanmaktadır. OWRK yöntemi her bir madde içindeki moleküller arası etkileşimlerin geometrik ortalamasına eşit olduğunu iddia eden Berthelot hipotezine dayanarak, dispersive ve polar SYE' lerin hesaplanmasıyla elde edilmektedir (Annamalai vd., 2016; Güleç vd., 2006).

Serbest yüzey enerjisi denklem 1 ve 2 ile hesaplanabilir. Denklem 1’ de katı serbest yüzey enerjisi katı dispersive ve katı polar serbest yüzey enerjisinin toplanması ile bulunur.

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (1)$$

Burada  $\gamma_s^d$ ,  $\gamma_s^p$  katının dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_s^p$ ,  $\gamma_s^d$  polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_s$ , ise katının serbest yüzey enerjisini mJ/m<sup>2</sup> cinsinden ifade etmektedir.

Denklem 2, katı sıvı arası oluşan temas açısı kullanılarak katı SYE’yi hesaplayabilmek için denklem 1’den türetilmiştir. Burada, yüzeye damlatılan sıvı ile katı yüzey arasında ölçülen  $\theta$  temas açısını,  $\gamma_1$  sıvının serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_1^d$  sıvının dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_1^p$  sıvının polar serbest yüzey enerjisini mJ/m<sup>2</sup> cinsinden ifade etmektedir.

$$\gamma_1(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^d\gamma_1^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p\gamma_1^p} \quad (2)$$



Katı SYE hesaplanırken iki farklı sıvı için temas açısı değerleri ile iki OWRK denklemi elde edilir ve bu şekilde iki bilinmeyenli denklem çözülebilir hale gelir ve katının  $\gamma_s$  serbest yüzey enerjisi bulunabilir.

Çalışmada SYE hesaplamada kullanılan bir diğer yöntem ise Zisman metodudur. Zisman metodunda temas açısının kosinüs değeri ile temas açısı ölçümünde kullanılan sıvıların yüzey serbest enerjisi karşılaştırılarak nokta elde edilir. Temas açısının sıfır yani  $\cos(0)$  değerinin 1 olduğu konum için yüzey serbest enerjisi ekstrapole edilir. Elde edilen noktalar kullanılarak doğru çizilir ve kosinüs değerinin 1 olduğu yüzey gerilimi değeri grafikten okunur ve katının yüzey serbest enerji olarak kabul edilmiştir. Bu değer kritik yüzey gerilimi olarak adlandırılır ve Zisman'a göre kritik yüzey gerilimi ile yüzey serbest enerjisi aynı değerdir (Fathi Azarbayjani vd., 2009).

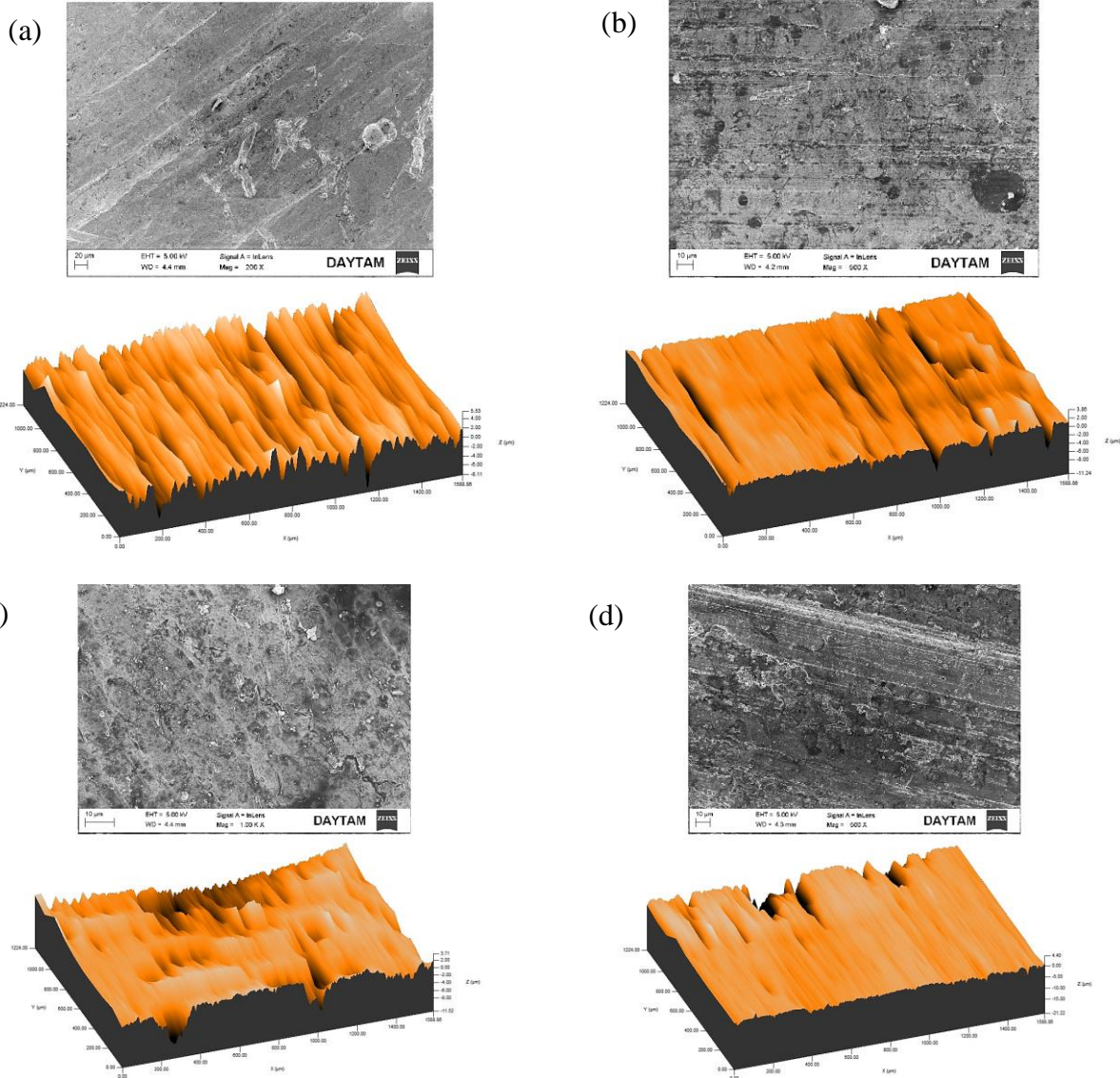
### 3.Bulgular

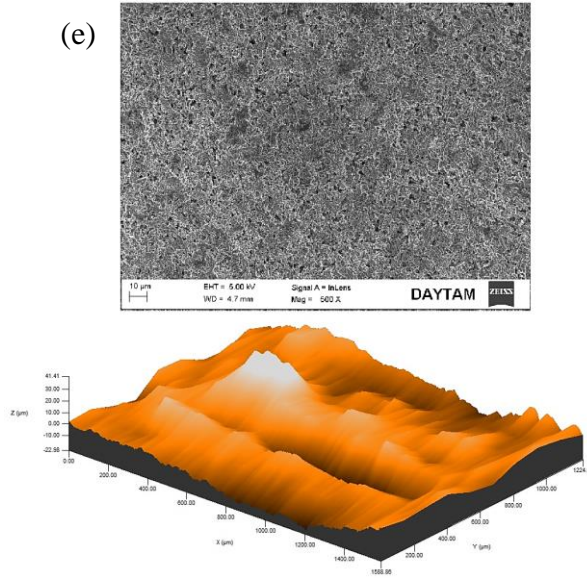
#### 3.Results

#### 3.1.Topografik analiz

##### 3.1.Topographic analysis

AA7075 alaşımının mekanik aşındırma, kimyasal dağlama ve hibrit aşındırma işlemleri ile hazırlanan yüzeylerinin yüzey morfolojilerine ait SEM ve 3D profilometre görüntüleri Şekil 1ve şekil 2 'de verilmiştir.





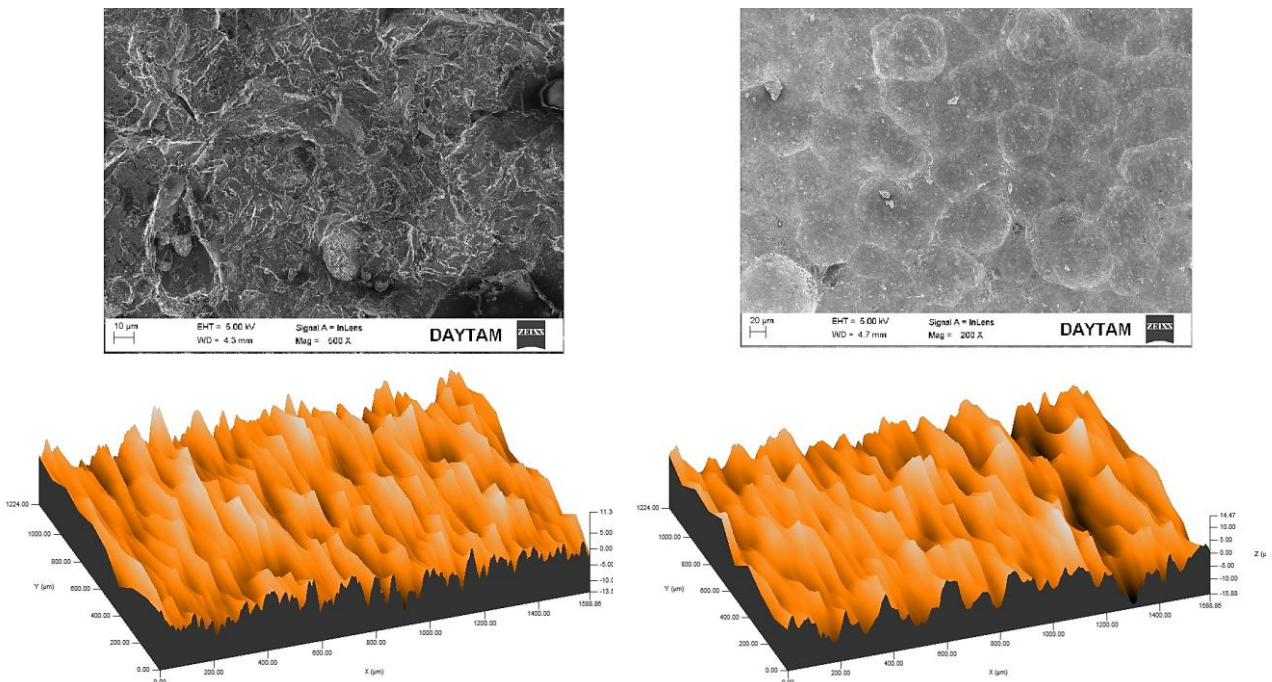
**Şekil 1.** İşlemsiz ve kimyasal aşındırılan numune yüzeylerinin SEM ve 3D profilometre görüntüleri (a)İşlemsiz, (b)0,5M NaOH, (c)1M NaOH, (d)0,5M HCl, (e)1M HCl

**Figure 1.** SEM and 3D profilometer images of untreated and chemically etched sample surfaces (a)Untreated, (b)0,5M NaOH, (c)1M NaOH, (d)0,5M HCl, (e)1M HCl

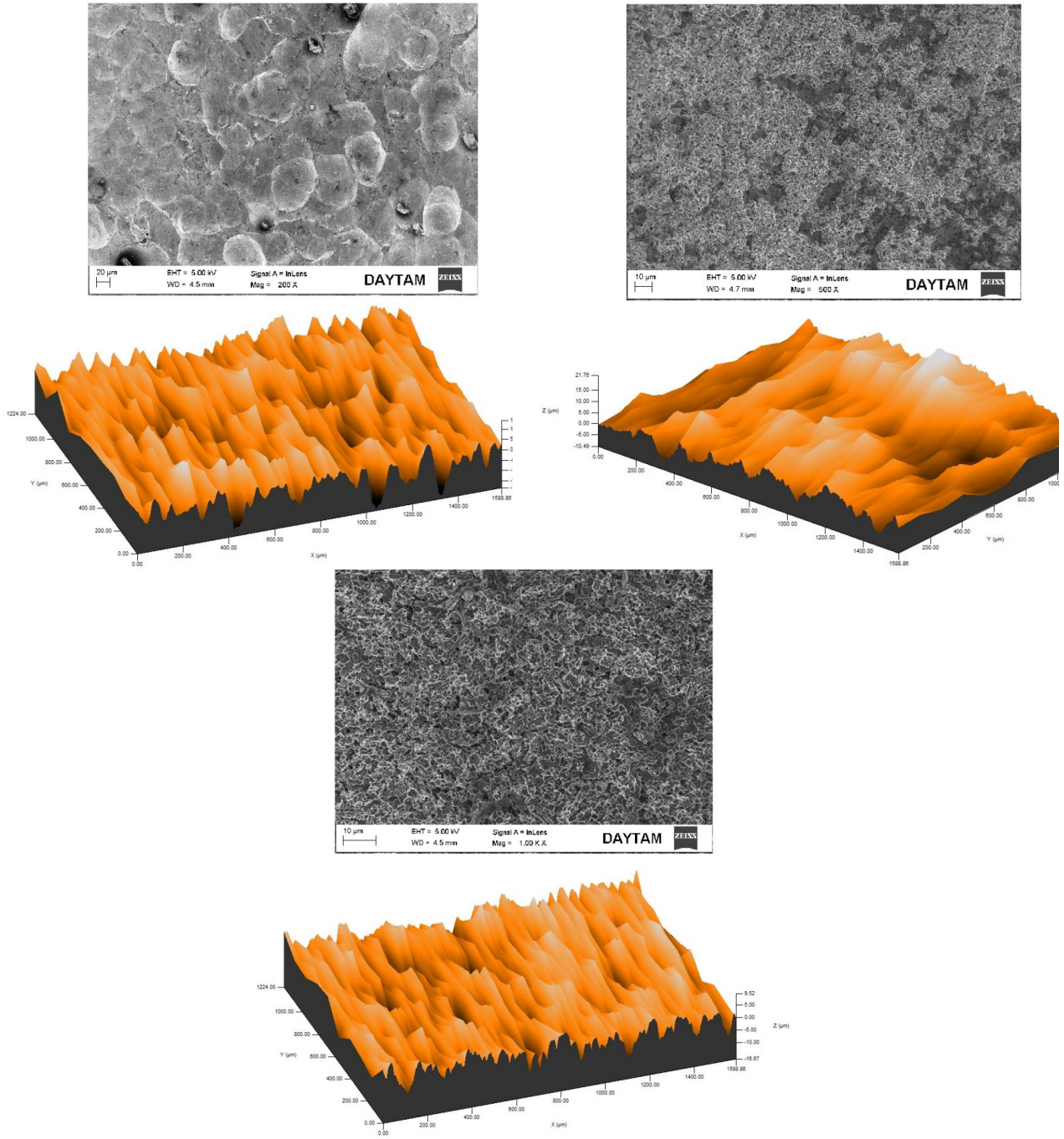
Şekil 1(a)'da aşındırılma işlemi yapılmamış AA7075 yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyin paralel bir vadi yapısına sahip izler olduğu görülmektedir. Numunedeki yatay çiziklerin ve vadi yapısındaki izlerin, taşıma, depolama, nakliye ve sürtünmeden kaynaklı meydana geldiği düşünülmektedir.

Şekil 1(b)'de 0,5M NaOH çözeltisi ile aşındırılan alaşım yüzeyinde aşındırılmamış alaşım yüzeyindeki benzer paralel vadi yapısına sahip olduğu ve ek olarak düzensiz bir topografya sergilediği görülmektedir. NaOH konsantrasyonunun 1M'ye yükseltilmesi ve buna bağlı olarak reaksiyon hızını artmasına ve ince çatlaklı bir yüzey topografya oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 1 (c)).

Şekil 1(d)' de 0,5M HCl çözelti ile elde edilen numune yüzeyi görülmektedir. Yüzeyde çukurcukların ve intermetalik parçacıkların yüzeylerde olduğu tespit edilmiştir. HCl çözelti konsantrasyonunun 1M'te ye artmasıyla numune yüzeylerinde daha yoğun ve derin çukurcuklar oluştuğu görülmektedir (Şekil 1(e)).







**Şekil 2.** Mekanik ve hibrit aşındırılan numune yüzelerinin SEM ve 3D profilometre görüntüleri (a)Kumlama, (b)Kumlama+0,5M NaOH, (c)Kumlama+1M NaOH, (d)Kumlama+0,5M HCl, (e)Kumlama+1M HCl

**Figure 2.** SEM and 3D profilometer images of mechanical and hybrid etched specimen surfaces (a)Sandblasting, (b)Sandblasting+0,5M NaOH, (c)Sandblasting+1M NaOH, (d)Sandblasting+0,5M HCl, (e) Sandblasting+1M HCl

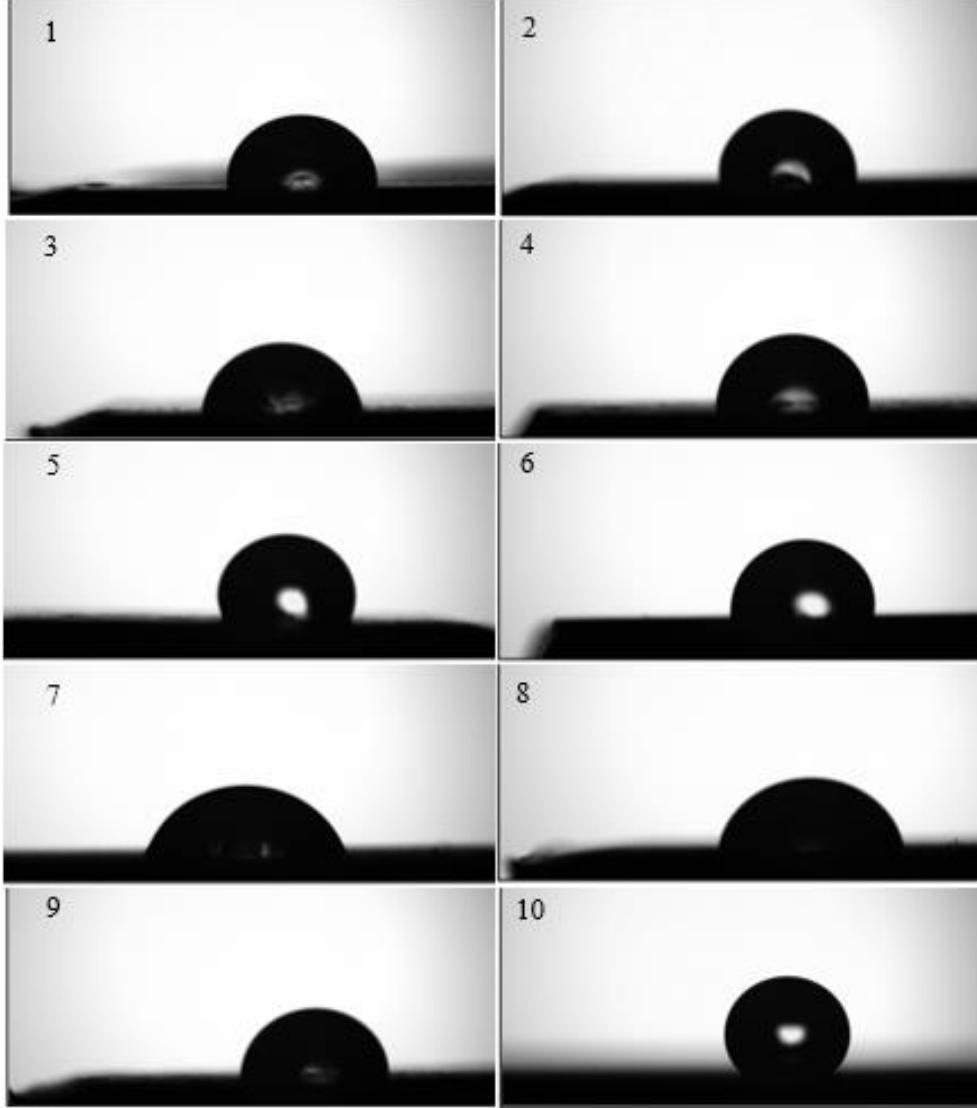
Şekil 2(a)'da numune yüzeyine kumlama yapılmıştır. Yüzeyde mikro çukurların olduğu dalgalı bir yapı oluşmuştur. Kumlamalı yüzelerde köşeli girinti ve porlar mevcuttur. Kumlamalı yüzeye yapılan NaOH dağlamalar ile köşeli girinti ve porlar kavisli yapılara dönüşmüş ve konsantrasyonun artmasıyla kavisli yapılar küçülmüş ve kavisli yapılarda artış olduğu Şekil 2(b-c) görülmüştür. Şekil 2(d-e)'de kumlama üzerine HCl asit ile dağlama işlemi yapılmış numune yüzelerinde mikro por çaplarının küçüldüğü ve köşeli por formlarının olduğu gözlemlenmiştir. HCl konsantrasyonun artmasıyla bu yapıların yoğunlaştığı ve belirginleştiği tespit edilmiştir. Tüm yüzey görüntülerine bakıldığında hibrit aşındırılan yüzeyler, kimyasal aşındırılan yüzeylere göre daha çukur, tepelere sahip, oyuklu bir yapıdadır. Ayrıca hibrit aşındırılan yüzeylerde

ise HCl asit kullanılarak elde edilen yüzeyler diğer tüm yüzeylere göre yüzey alanı artmış, daha fazla aşındırılmış olduğu görülmektedir (Şekil 2(d,e)).

### 3.2. Temas açısı

#### 3.2. Contact angle

Kimyasal, mekanik ve hibrit aşındırılmış yüzeylerin temas açılarının şekil 3-5' de verilmiştir. Temas açısı ölçümleri polar sıvı olan deiyonize su, gliserol ile ve apolar sıvı olan benzen kullanılarak yapılmıştır. Temas açısı, üç tekrar yapılarak ve değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir.

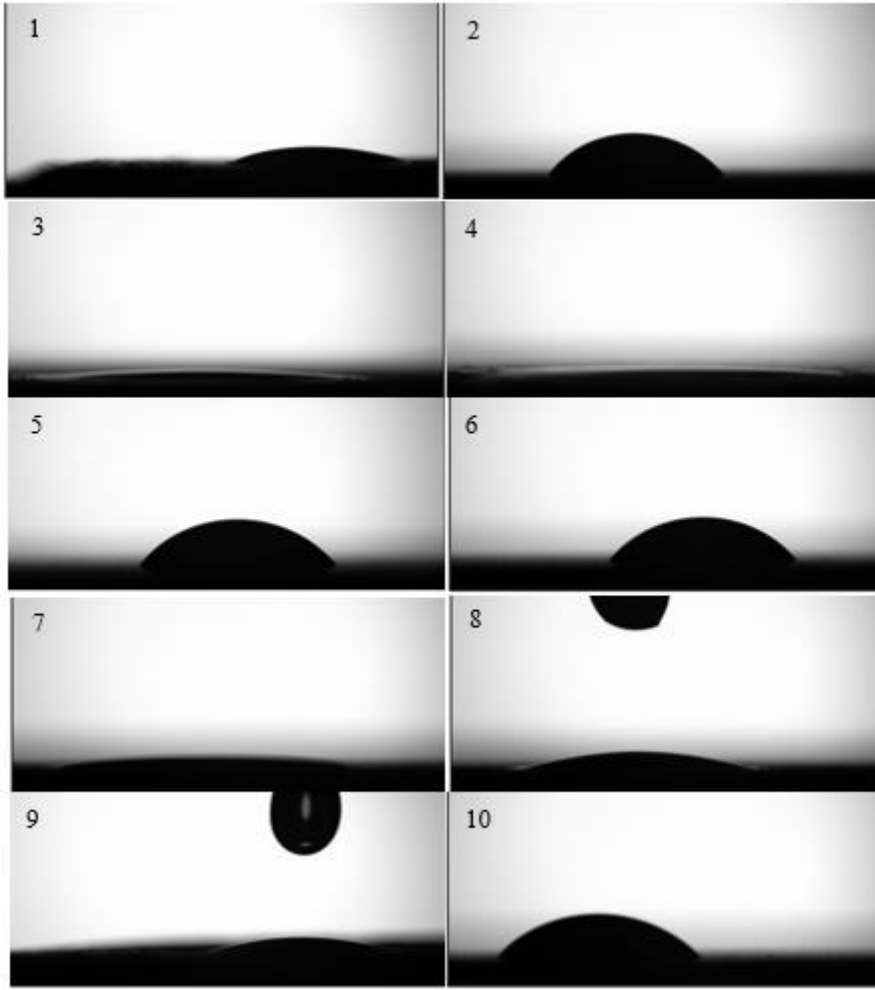


**Şekil 3.** Temas açısı görüntüleri (deiyonize su) (1)İşlemsiz, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Kumlama, (7)Kumlama+0,5MNaOH, (8)Kumlama+1M NaOH, (9)Kumlama+0,5M HCl, (10)Kumlama+1M HCl

**Figure 3.** Contact angle images (deionized water) (1)Untreated, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Sandblast, (7)Sandblast+0,5MNaOH, (8)Sandblast+1M NaOH, (9)Sandblasting+0,5M HCl, (10)Sandblasting+1MHCl

Deiyonize su ile elde edilen temas açısı değerleri  $78^{\circ}$  ile  $125^{\circ}$  derece aralığındadır. En düşük dereceye sahip temas açısı değerleri hibrit aşındırma yöntemlerinden olan kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH uygulanan yüzeylerde elde edilmiştir. Bu en yüksek ıslatılabilirliğe sahip yüzeyler demektir. Temas açısı değeri en yüksek olan yüzey kumlama+1M HCl ve kumlama ile aşındırılan yüzeydir. Bu iki yüzeyin ıslatılabilirliği çok düşüktür.





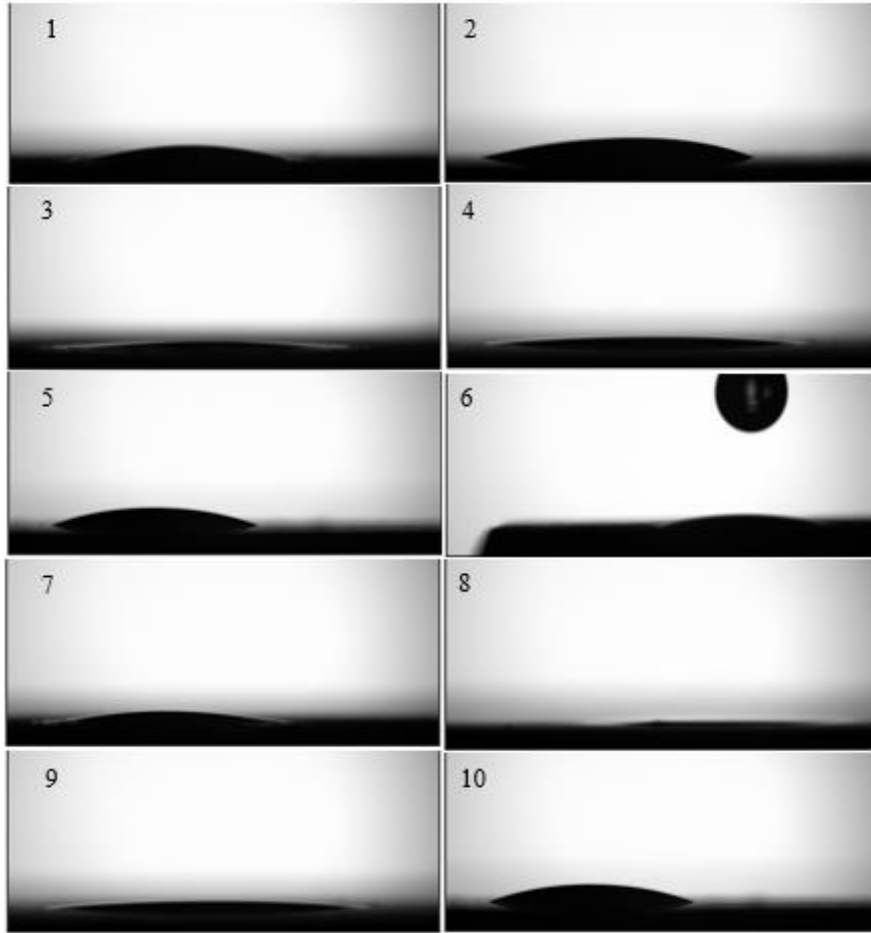
**Şekil 4.** Temas açısı görüntüleri (gliserol) (1)İşlemsiz, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Kumlama, (7)Kumlama+0,5MNaOH, (8)Kumlama+1M NaOH, (9)Kumlama+0,5M HCl, (10) Kumlama+1M HCl

**Figure 4.** Contact angle images (glycerol) (1)Untreated, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Sandblast, (7)Sandblast+0,5MNaOH, (8)Sandblast+ 1M NaOH, (9)Sandblast+0,5M HCl, (10)Sandblast+1M HCl

Gliserol kullanılarak elde edilen temas açısı değerleri  $11^{\circ}$  ile  $72^{\circ}$  aralığındadır. Yine deiyonize su ile yapılan ölçümlerdeki gibi temas açısı en düşük olan yüzeyler kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH' ler de elde edilmiştir. Bu yüzeylerde sıvı yayılımı en yüksektir. En yüksek temas açısına sahip yüzey ise kumlama yapılmış yüzeyde elde edilmiştir. Kumlama ile elde edilen yüzey, temas açısının en büyük olan yani gliserolün yüzeye yayılımı en düşük olan yüzeydir.

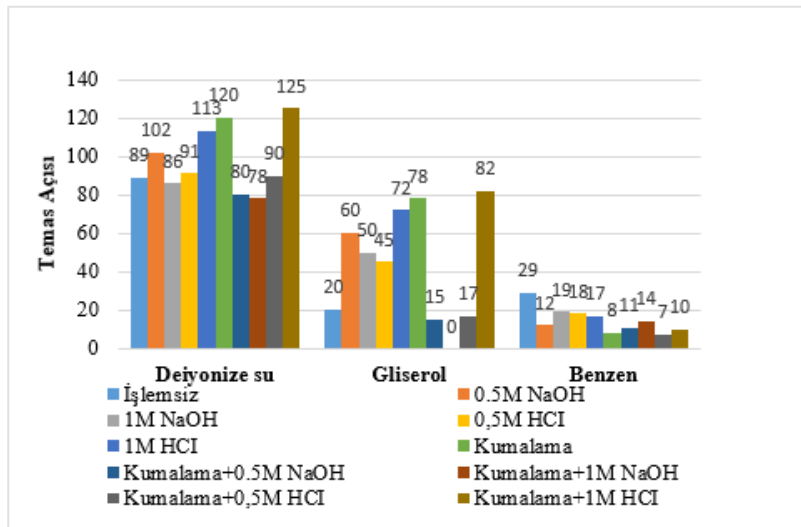
Benzen ile ölçülen temas açısı değerleri, diğer sıvıların ölçülen değerlere göre daha düşüktür. Sıvıların yüzey enerjisine göre temas açısı değerleri değişmektedir. Benzenin Tablo 3'te de yüzey enerjisi diğer sıvılara göre daha düşüktür. Bu sebepten en düşük temas açısı değerleri benzende elde edilmiştir. Şekil 5(8)'den de görülmektedir ki kumlama+1M HCl ile dağlanan yüzeye benzen tamamen yayılmış, yüzeye sıvı tamamen nüfuz etmiştir. Kumlama+0,5M HCl aşındırma yapılmış yüzeyde de temas açısı değeri çok düşüktür. Bu yüzeyde sıvı nerde ise tamamen nüfuz etmiştir. 1M HCl ve kumlama+1M HCl aşındırma yapılan yüzeylerde temas açısı değeri diğer yüzeylere göre daha yüksek değer almıştır. Ayrıca aşınmanın az olduğu yüzeylerin (Şekil 3-5), temas açılarının daha büyük olduğu görülmektedir (Şekil 1, 2) (Narbon vd., 2019b).

Deiyonize su, gliserol ve benzen kullanılarak elde edilen AA7075 temas açısı değerleri toplu olarak Şekil 6'da vermiştir.



**Şekil 5.** Temas açısı görüntüleri (benzen) (1) İşlemsiz, (2) Kumlama, (3) 0,5M NaOH, (4) 1M NaOH, (5) 0,5M HCl, (6) 1M HCl, (7) Kumlama+0,5M NaOH, (8) Kumlama+1M NaOH, (9) Kumlama+0,5M HCl, (10) Kumlama+1M HCl

**Figure 5.** Contact angle images (benzene) (1) Untreated, (2) Sandblast, (3) 0,5M NaOH, (4) 1M NaOH, (5) 0,5M HCl, (6) 1M HCl, (7) Sandblast+0,5M NaOH, (8) Sandblast+1M NaOH, (9) Sandblast+0,5M HCl, (10) Sandblast+1M HCl



**Şekil 6.** Tüm yüzeylerin temas açısı değerleri (deiyonize su, gliserol, benzen)

**Figure 6.** Contact angle values of all surfaces (deionized water, glycerol, benzene)

Temas açısı değerlerinin, yüzey morfolojisinden direkt etkilenmiştir. Islatılabilirliği en yüksek yüzeyler, temas açısı değeri en düşük olan yüzeylerdir. Tam tersi ıslatılabilirliği en kötü olan yüzeyler ise temas açısı değeri en fazla olan yüzeylerdir. Islatılabilirliği en iyi olan yüzeyler, kumlama +0,5M HCl ve kumlama +1M HCl yüzey hibrit aşındırma uygulanan yüzeylerdir. Islatılabilirliği en kötü yüzeler ise kumlama, 1M HCl asit ile aşındırılmış yüzeylerdir.

### 3.3. Serbest yüzey enerjisi ve yüzey pürüzlülük değerleri

#### 3.3. Free surface energy and surface roughness values

Owens Wendt Rabel and Kaelble (OWRK) modeli temas açısı kullanılarak yüzey serbest enerjisi hesaplama yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu modelde, iki farklı sıvının temas açısı değerleri kullanılır.

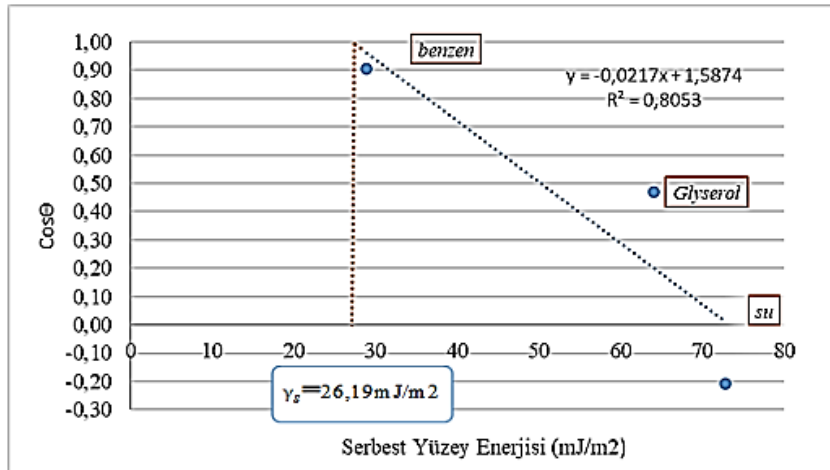
Denklem deiyonize su ve benzen için yazılacak olursa

$$\gamma_w(1 + \cos \theta_w) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_w^p} \quad (3)$$

$$\gamma_b(1 + \cos \theta_b) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_b^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_b^p} \quad (4)$$

Burada  $\gamma_w$  deiyonize su serbest yüzey enerjisi,  $\theta_w$  deiyonize su temas açısını,  $\gamma_w^d$  deiyonize su dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_w^p$  deiyonize su polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_b$  benzen serbest yüzey enerjisi,  $\theta_b$  benzen temas açısını,  $\gamma_b^d$  benzen polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_b^p$  benzen polar serbest yüzey enerjisini ifade etmektedir.

Bu denklemlerde, sıvıların polar ve dispersive değerleri ile aşındırılan yüzeylerin temas açısı değerleri yerine konulur. Denklem 3 ve 4'ten elde edilen iki denklem yardımı ile  $\gamma_w^d$  sıvı polar serbest yüzey enerji,  $\gamma_s^p$  katı polar serbest yüzey enerjisi değerleri elde edilir ve bu değerler denklem 1'de yerine konularak katının serbest yüzey enerjisi  $\gamma_s$  bulunur. Zisman yönteminde ise şekil 6'da verilen yüzey temas açısı değerlerinin kosinüsleri alınarak sıvıların serbest yüzey enerjileri ile bir grafik çizilir. Noktaların eğim çizgileri çizilir. Ve bu eğim çizgisi temas açısı  $180^\circ$  olan yani  $\cos$ 'ü 0 olan noktadan çizilen düz çizgi ile çakıştırılır. Elde edilen noktanın y bileşeni bulunur. Bulunan bu değer katının serbest yüzey enerjisidir (Şekil 7).



Şekil 7. Zisman yöntemi  
Figure 7. Zisman method

Aşındırma öncesi ve sonrası tüm numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülük değerleri 3D profilometre sonuçlarından elde edilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri olan Ra ortalama pürüzlülük, Rq kök ortalama kare pürüzlülük ve Rp maksimum tepe yüksekliği, Rv maksimum çukur yüksekliğini ifade etmektedir. Tüm yüzeylerin pürüzlülük ve SYE değerleri tablo 4'te verilmektedir.

**Tablo 4.** Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri  
**Table 4.** Surface roughness values of the samples

	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Rv ( $\mu\text{m}$ )	OWRK $\gamma_s$ ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )	Zisman $\gamma_s$ ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )
İşlemsiz Yüzey	1,891	3,228	33,605	10,441	30,34	30,27
0,5M NaOH	0,788	1,257	3,86	11,241	26,73	27,07
1M NaOH	1,240	1,893	3,593	10,813	31,92	32,13
0,5M HCl	2,580	3,993	8,118	23,867	29,32	29,85
1M HCl	6,523	9,031	41,409	22,976	24,44	25,31
Kumlama	2,791	3,531	11,338	13,588	26,19	26,91
Kumlama+0,5M NaOH	3,456	4,456	14,470	15,879	34,79	33,84
Kumlama+1M NaOH	3,664	4,655	14,162	18,575	35,88	34,48
Kumlama+0,5M HCl	4,600	5,929	21,764	10,491	29,90	29,44
Kumlama+1M HCl	2,889	3,725	9,517	16,671	25,83	27,70

Tablo 4'ten de görüldüğü gibi Ra ortalama yüzey pürüzlülük değerleri en yüksek 1M HCl asit ile kimyasal aşındırma yapılmış yüzeyde görülmektedir. En az Ra ise 0,5M NaOH çözeltisinde yüzey dağlanan numunede görülmektedir. Hiç işlem görmemiş yüzeyin Ra değeri, NaOH ile kimyasal aşındırılan yüzeylerin Ra değerlerinden büyüktür. İşlemsiz yüzeyin, Rp değeri NaOH ile aşındırılan yüzeylerin Rp değerinden yüksektir. Buradan NaOH asidin yüksek tepeleri dağladığı bu sebepten pürüzlülük değerini küçülttüğü düşünülmektedir.

SYE değerleri hesaplamalarında yüzey temas açıları kullanıldığından temas açısı değeri değişimlerinden de etkilenirler. Temas açısı küçük olan yüzeylerin SYE' si büyük, temas açısı büyük olan yüzeyin SFE' si küçüktür. SYE değeri küçük olan yüzey ıslatılabilirliği düşük, büyük olanın ise ıslatılabilirliği yüksektir. Islatılabilirliği en yüksek olan yüzey kumlama+1M NaOH ile aşındırılan yüzeydir. Islatılabilirliği en düşük yüzey ise 1M HCl ile aşındırılan yüzeydir. OWRK ve Zisman metodu ile elde edilen SYE değerler çok yakındır. İki modelde, SYE değeri bulunmasında başarılıdır.

Yüzey pürüzlülük ve SYE değerleri birlikte incelenecek olursa, SYE değerleri birbiri ile yakın yaklaşık  $26\text{mJ}/\text{m}^2$  olan 0,5M NaOH ve kumlama ile aşındırılan yüzeylerin Ra değeri sırasıyla 0,788, 2,791 $\mu\text{m}$ 'dir. Ya da kumlama+0,5M NaOH aşındırılan yüzey ile kumlama+ 1M NaOH hibrit yöntem kullanılarak aşındırılan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri çok yakinken yaklaşık 3,5 $\mu\text{m}$  iken SYE değerleri birbirinden çok farklıdır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülük değerleri ile SYE değerleri birbiri ile bir ilişkisi yoktur anlamına gelmektedir (Narbon vd., 2019a).

#### 4. Sonuç ve tartışma

##### 4. Conclusion and discussion

Bu çalışmanın sonuç kısmında AA7075 numunesinin yüzeylerine kimyasal, mekanik ve hibrit aşındırma işlemleri uygulanmış ve oluşan yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri, yüzey topografyası, temas açısı, farklı metodlar ile hesaplanan SYE değerlerinin birbiri ile ilişkileri değerlendirilmiştir.

- Aşındırma öncesi ve sonrası ayrıca yöntemine göre de, yüzeylerin yüzey morfolojilerinde değişmektedir.
- HCl asit ve NaOH çözeltilerindeki konsantrasyon değerleri yüzeylerin temas açısı değerlerini etkilemektedir. Ayrıca kumlama ve kumlamaya ek olarak yapılan kimyasal aşındırmada da yüzey morfolojileri ile temas açısı değerlerini değiştirmiş ve yüzey morfolojisini de etkilemiştir.
- Kimyasal aşındırmada HCl, mekanik aşındırmada kumlama ve hibrit aşındırmada ise kumlama+HCl, yüzey pürüzlülüğünün değeri üzerinde de çok etkiye sahiptir.
- Kimyasal aşındırmada çözelti molaritesinin artması pürüzlülük değerlerini arttırmıştır. Hibrit aşındırmada ise çözelti molaritesinin artması ile yüzey pürüzlülük değerleri ya sabit kalmış ya da azalmıştır.
- İşlem görmemiş ve farklı işlemlere maruz bırakılmış toplam 10 adet numune yüzeylerine üç farklı sıvı kullanılarak katı sıvı temas açısı ölçülmüştür. Temas açısının yüksek olması SYE değerlerini düşürür. Buda SYE yüksek olan yüzeylerin yüzeye daha iyi nüfuz ettiği ve ıslatılabilirliği fazladır anlamına gelir. Ya da temas açısının büyük olması SYE değerlerinin düşmesine ve yüzeyin ıslatılabilirliğinin azalması anlamına gelir. Uygulamalarda ıslatılabilirliğin yüksek yani SYE' nin büyük olması yüzeye sıvının nüfuziyeti arttırdığı için dayanımını da arttıracığı anlamına gelir. Kumlama+1M NaOH aşındırılan yüzey en ıslatılabilir özelliğe sahip yüzeydir. 1M HCl ile aşındırılan yüzey ise en kötü ıslatılabilirliğe sahip yüzeydir.



- Kimyasal aşındırmada HCl ile hem de kumlama+HCl ile aşındırılan yüzeylerin molaritenin artması ile SYE değerleri düşmüştür. Fakat NaOH ile ve kumlama+NaOH ile aşındırılan yüzeylerde molaritenin artmasıyla SYE değerleri artış göstermiştir.
- Pürüzlülük değerleri ile yüzey enerjilerinin değerleri arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Benzer pürüzlülük değerlerine sahip yüzeylerin yüzey enerjileri farklılık göstermektedir.
- Farklı morfolojiye sahip yüzeyler, uygulanan işleme bağlı olarak farklı temas açışı ve SYE değerleri almışlardır.
- OWRK ve Zisman ile elde edilen serbest yüzey enerjisi değerleri birbiri ile ilişkilidir.

### Yazar katkısı

*Author contribution*

Bütün yazarlar araştırmaya eşit oranda katkıda bulunmuşlardır.

### Etik beyanı

*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.”

### Çıkar çatışması beyanı

*Conflicts of interest*

Bu çalışmadaki yazarların herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Kaynaklar

*References*

- Akpınar, S. & Akpınar, I. A. (2019). Effect of nanostructured reinforcement of adhesive on thermal cycling performance of a single-lap joint with composite adherends. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107106>
- Annamalai, M., Gopinadhan, K., Han, S. A., Saha, S., Park, H. J., Cho, E. B., Kumar, B., Patra, A., Kim, S.-W. & Venkatesan, T. (2016). Surface energy and wettability of van der waals structures. *Nanoscale*, 8(10), 5764-5770. <https://doi.org/10.1039/C5NR06705G>
- Aydın, M. D., Akpınar, S., Özel, A. & Erdoğan, S. (2015). Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 48-55. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54338/736175>
- Dikici, T. (2019). Asidik dağlama prosesinde farklı HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının titanyumun yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3), 999-1007. <https://doi.org/10.24012/dumf.450560>
- Fathi Azarbayjani, A., Jouyban, A. & Chan, S. Y. (2009). Impact of surface tension in pharmaceutical sciences. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 12(2), 218. <https://doi.org/10.18433/J32P40>
- Fotakis, C., Zorba, V., Stratakis, E., Athanassiou, A., Tzanetakakis, P., Zergioti, I., Papagoglou, D. G., Sambani, K., Filippidis, G., Farsari, M., Pouli, V., Bounos, G. & Georgiou, S. (2007). Novel aspects of materials processing by ultrafast lasers: from electronic to biological and cultural heritage applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 59, 266-272. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/59/1/056>
- Fu, J., Shi, L., Zhang, D., Zhong, Q. & Chen, Y. (2010). Effect of nanoparticles on the performance of thermally conductive epoxy adhesives. *Polymer Engineering & Science*, 50(9), 1809-1819. <https://doi.org/10.1002/pen.21705>
- Güleç, H. A., Sariog˘lu, K. & Mutlu, M. (2006). Modification of food contacting surfaces by plasma polymerisation technique. Part I: Determination of hydrophilicity, hydrophobicity and surface free energy by contact angle method. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.007>

- Han, B., Liang, S., Wang, B., Zheng, J., Xie, X., Xiao, K., Wang, X. & Huang, X. (2019). Simultaneous determination of surface energy and roughness of dense membranes by a modified contact angle method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 562, 370-376. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.11.059>
- Hu, Y., Yuan, B., Cheng, F. & Hu, X. (2019). NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107478>
- Kim, J. K., Kim, H. S. & Lee, D. G. (2003). Investigation of optimal surface treatments for carbon/epoxy composite adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(3), 329-352. <https://doi.org/10.1163/156856103762864651>
- Kwon, J. W. & Lee, D. G. (2000). The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(8), 1085-1102. <https://doi.org/10.1163/156856100743095>
- Mansourian-Tabaei, M., Jafari, S. H. & Khonakdar, H. A. (2014). Lap shear strength and thermal stability of diglycidyl ether of bisphenol a/epoxy novolac adhesives with nanoreinforcing fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6). <https://doi.org/10.1002/app.40017>
- Martínez-Landeros, V. H., Vargas-Islas, S. Y., Cruz-González, C. E., Barrera, S., Mourtazov, K. & Ramírez-Bon, R. (2019). Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.014>
- Narbon, J. J., Moreno-Díaz, C. & Arenas, J. M. (2019a). Influence of surface treatment on the surface energy of an aluminium substrate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 560, 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.010>
- Narbon, J. J., Moreno-Díaz, C. & Arenas, J. M. (2019b). Influence of surface treatment on the surface energy of an aluminium substrate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 560, 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.010>
- Purabgola, A., Rastogi, S., Sharma, G. & Kandasubramanian, B. (2020). Surface preparation for structural adhesive joints. İçinde *Structural Adhesive Joints* (ss. 1-34). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119737322.ch1>
- Rudawska, A. & Jacniacka, E. (2009). Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(4), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.09.008>
- Rudawska, A. & Jacniacka, E. (2018). Evaluating uncertainty of surface free energy measurement by the van Oss-Chaudhury-Good method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 82, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.01.006>
- Sun, Z., Shi, S., Hu, X., Guo, X., Chen, J., Chen, H. (2015). Short-aramid-fiber toughening of epoxy adhesive joint between carbon fiber composites and metal substrates with different surface morphology. *Composites Part B: Engineering*, 77, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.010>
- Wan, H., Lin, J. & Min, J. (2018). Effect of laser ablation treatment on corrosion resistance of adhesive-bonded Al alloy joints. *Surface and Coatings Technology*, 345, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.087>
- What is Surface Energy? Calculation Models and More Explained.* (t.y.). Ossila. Geliş tarihi 02 Mart 2022, gönderen <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy>
- Zhu, C., Wan, H., Min, J., Mei, Y., Lin, J., Carlson, B. E. & Maddela, S. (2019). Application of pulsed yb: fiber laser to surface treatment of Al alloys for improved adhesive bonded performance. *Optics and Lasers in Engineering*, 119, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.03.017>