



METALİK MALZEMELERİN YÜKSEK HIZLARDAKİ EROZYON DAVRANIŞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

¹Ali İhsan BUDUR, ²Hasan GEDİKLİ

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Arsin Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

¹ali.budur@ktu.edu.tr, ²hgedikli@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 27.09.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.02.2019)

ÖZ: Bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan AA6061, Ti-6Al-4V alaşımları ile SS304 paslanmaz çeliğinin yüksek hızlardaki erozyon davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Erozyon deneylerinin bir kısmı 90° sabit çarpma açısı için 100, 127, 170, 210, 250 m/s çarpma hızlarında gerçekleştirilmişken diğer kısmı 100 m/s sabit çarpma hızı için farklı çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda numunelerdeki kütleli erozyon oranları; zamana, hıza ve açıya göre elde edilmiştir. İlave olarak malzemelerdeki hacimsel erozyon oranları hesaplanmış ve malzemelerde oluşan krater derinlikleri ölçülmüştür. Çalışmalar neticesinde en iyi erozyon performansı kütleli kayıplar bakımından AA6061 alaşımında ve en kötü erozyon performansı SS304 paslanmaz çeliğinde görülmüştür. Hacimsel erozyon performansı ise en kötü AA6061 alaşımında belirlenmiş ve bu sonuç optik profilometre cihazı ile yapılan ölçümlerde de desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı parçacık erozyonu, Yüksek hız, Ti-6Al-4V, SS 304, AA6061

Experimentally Investigation of Solid Particle Erosion of Metallic Materials at High Speed

ABSTRACT: In this study, the erosion behaviors of AA6061, Ti-6Al-4V alloys and SS304 stainless steel, which are used commonly in the aviation industry, have been experimentally investigated at high speeds. A part of the erosion experiments were carried out at impact velocities of 100, 127, 170, 210, 250 m/s at a constant impact angle of 90°, the others carried out at different impact angles (20, 30, 45, 60, 90°) at a constant velocity of 100 m/s. As a result of the experiments, the mass erosion rates in the samples were measured and obtained the changes to time, velocity and angle. Also, the volumetric erosion rates in materials were calculated and the crater depths in the materials were measured. As a result of studies, the best erosion performance was obtained at AA6061 alloy and the worst at SS304 stainless steel. The worst volumetric erosion performance was obtained at AA6061 alloy and that supported in the measurements with optical profilometer.

Key Words: Solid particle erosion, High speed, Ti-6Al-4V, SS304, AA6061

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık endüstrisinde hafiflikleri nedeniyle alüminyum ve titanyum alaşımları yaygın olarak kullanılan metalik malzemelerdir (Güler, 2003). Alüminyum alaşımları; mukavemetleri, şekillendirilebilmeleri, kaynak yapılabilimleri ve korozyon dirençlerinin yüksek olmasından dolayı hava araçlarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu alaşım türü, uçak iniş takımlarında, yağ pompalarında, borularda ve kaynaklı parçalarda kullanılmaktadır (Zincir, 1975). Ti-6Al-4V alaşımı yüksek korozyon dayanımına sahiptirler ve yüksek çalışma sıcaklıklarında iyi mukavemet göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında, disklerinde ve

uçak çatılarında tercih edilen bir alaşım türüdür (Avcu, 2013). Paslanmaz çelikler ise kaynak kabiliyetleri ve yüksek korozyon dayanımlarının nedeniyle havacılıkta uçak motor parçalarında ve iniş takımlarında kullanılmaktadırlar (Akdoğan, 2003).

Katı parçacık erozyonu önemli bir hasar türü olup, sıvı veya gaz ortamındaki küçük katı parçacıkların bir yüzeye tekrarlı çarpmaları sonucu oluşturdukları aşınma olarak tanımlanmaktadır (Shimizu ve diğ., 2001). Katı parçacık erozyonu, pnömatik taşıma sistemleri, boru hatları, petrol ve gaz kuyuları, gaz türbin kanatçıkları, helikopter palleri ile tozlu ortamlarda çalışan makina parçalarda yaygın olarak görülmekte olup, parçaların performansları ve çalışma ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır (Finnie 1960, Hutching, 1976, Rana 1989, Parsi, 2015). Katı parçacık erozyonu; hedef yüzeyin malzeme özellikleri ile yüzeye çarpan parçacıkların çarpma açısı, çarpma hızı, şekli ve boyutu gibi pek çok parametreye bağlıdır (Oka 2005, Bousser 2014). Çarpma açısı, katı parçacık erozyonunu etkileyen önemli parametrelerden biri olup, aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyine çarptıkları noktada, yüzeyin teğeti ile parçacığın çarpma çizgisi arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır (Nsoesie, 2013). Yapılan çalışmalar sünek ve gevrek malzemelerde maksimum erozyon miktarının farklı parçacık çarpma açıları arasında gerçekleştiğini göstermektedir. Finnie (1958), yaptığı bir çalışmada sünek ve gevrek malzemelerin katı parçacık erozyonu davranışının parçacık çarpma açısına göre değişimi incelemiştir. Bu çalışma sonucunda sünek malzemelerde maksimum erozyon miktarının 15–30° arasında, gevrek malzemelerde ise 90° de gerçekleştiğini belirlemiştir.

Katı parçacık erozyonuna etki eden diğer önemli bir parametre ise aşındırıcı parçacıkların çarpma hızıdır. Hedef malzeme yüzeyine çarpan katı parçacıkların yüzeyde erozyon hasarı oluşturabilmesi için hızlarının kritik bir seviyede olması gerekmektedir. Emilani ve Brown (1984), Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyine 210 µm boyutlarında küresel katı parçacıkları püskürterek yaptıkları erozyon deneylerinde, 20-30° parçacık çarpma açısında maksimum erozyon miktarının 61 m/s parçacık çarpma hızında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Morrison ve Scattergood (1986), 304 paslanmaz çelik malzemenin erozyon davranışını incelemek üzere yaptıkları çalışmalarında 37-270 µm boyutlarında alümina aşındırıcı parçacıkları kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda 100 m/s parçacık çarpma hızında yapılan deneylerde erozyon oranlarını 0.4 ile 1.0 mg/g arasında elde etmişlerdir. Yerramareddy ve Bahadur (1990), silikon karbür parçacıklarını kullanarak Ti-6Al-4V malzemesin erozyon davranışını araştırdılar. Erozyon deneyleri sonucunda, titanyum alaşımı için maksimum erozyon miktarını 30° çarpma açısında elde etmişlerdir. Zhou ve Bahadır (1995), Ti-6Al-4V malzemesinin 25-800 °C sıcaklık aralığındaki erozyon davranışlarının incelemiştir. Araştırmacılar deneylerinde 120 grit silikon karbür parçacıklarını hedef malzeme yüzeyine farklı çarpma hızı (55- 110 m/s) ve çarpma açıları (10- 90°) göndermişlerdir. Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V malzemesi için maksimum erozyon miktarını 30° parçacık çarpma açısında yapılan deneylerde elde etmişlerdir. Ayrıca erozyon miktarının sıcaklığın artmasıyla arttığını ve özellikle 90° çarpma açısında 650 – 800 °C arasında erozyon miktarının aşırı arttığını gözlemlemişlerdir. Oka ve arkadaşları (Oka ve diğ., 2005) sünek metallerde 325 µm boyutunda silica kumu ile yaptığı deneylerde, erozyon oranının maksimum 20° - 35° arasında olduğunu belirlemiştir. Ally (2010), AA 6061, Ti-6Al-4V ve 316 paslanmaz çelik malzemelerinin aşınma davranışlarını birbirleriyle kıyaslamak amacıyla yaptıkları erozyon deneylerinde, 50 µm boyutunda Al₂O₃ aşındırıcı parçacıklarını 106 m/s sabit çarpma hızında ve değişik parçacık çarpma açıları (30, 45, 60 ve 90°) hedef yüzeye göndermiştir. Deneyler sonucunda küresel erozyon miktarının, en fazla 316 paslanmaz çelikte en az ise AA6061 alüminyum alaşımında olduğunu tespit etmiştir. Yıldırım (2013) yaptığı bir çalışmada, hedef malzeme yüzeyine çarpan parçacıkların hızlarının kritik bir değerin altında olması halinde plastik deformasyona yol açmadığı, bu değerin üstündeki hız değerlerinde ise yüzeyde plastik deformasyonlar yol açtığını gözlemlemiştir. Avcu (2013), Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyinde değişik basınç (1.5, 3 ve 4 bar) ve değişik çarpma açıları (30, 60 ve 90°) yaptığı erozyon deneylerinde, çarpan parçacıkların hızlarının çok yüksek olması durumunda malzeme yüzeyinde yerel erimelere neden olduğunu tespit etmiştir.

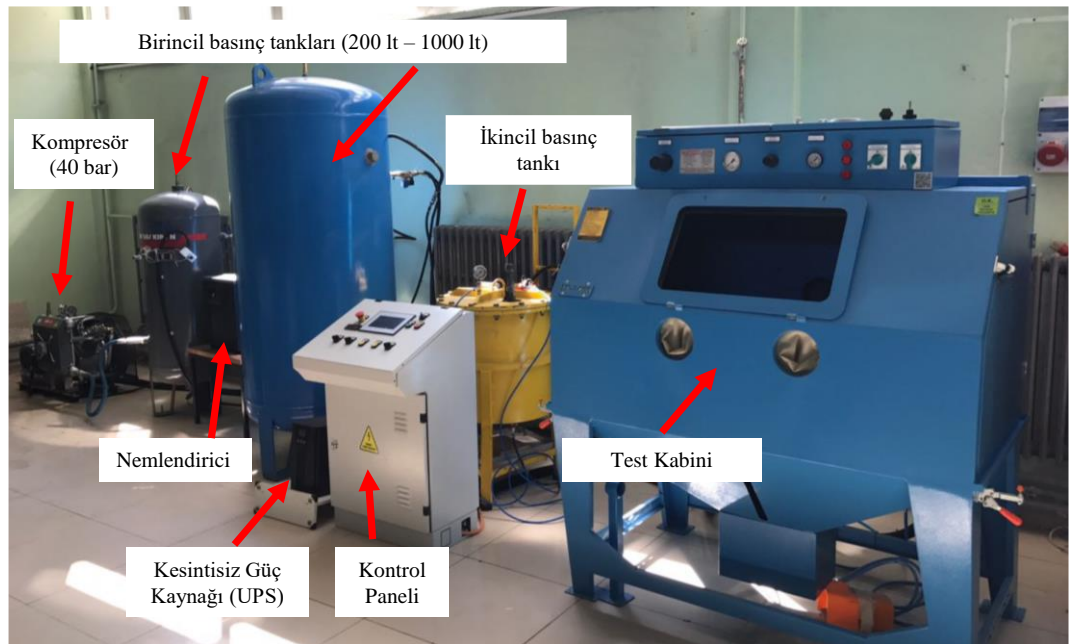
Bu çalışmada; AA 6061, SS 304, Ti-6Al-4V alaşımlarının, literatürden farklı olarak yüksek çarpma hızlarındaki katı parçacık erozyon davranışları incelenmiştir. Deneylerin bir bölümü 90° sabit parçacık çarpma açısı için 100, 127, 170, 210, 250 m/s çarpma hızlarında gerçekleştirilmişken, diğer bölümü ise sabit

çarpma hızı 100 m/s için farklı parçacık çarpma açılarında (20, 30, 45, 60, 90°) gerçekleştirilmiştir. Erozyon deneyleri sonucunda malzemelerin kütsel ve hacimsel erozyon performansları belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Deney Düzeneği (Test Setup)

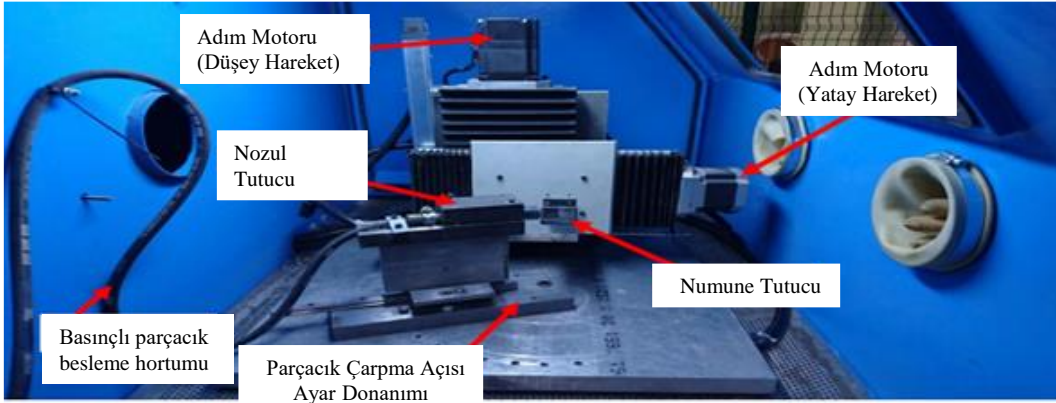
AA6061, Ti-6Al-4V ve SS304 metalik malzemelerinin erozyon deneyleri, Şekil 1’de gösterilen erozyon deney düzeneği ile yapılmıştır. Bu deney düzeneği ile ASTM-G76 (ASTM, 2004), ASTM-F1864 (ASTM, 2010) ve MIL-STD-3033 (MIL-STD, 2010) standartlarına uygun erozyon deneyleri, ilgili standartlarda belirtilen lüle ve toz tipi kullanılarak yapılabilmektedir. Deney düzeneğinde bulunan 40 bar basınç kapasiteli kompresör yardımıyla basınçlı hava ortamında hızlandırılmış katı parçacıkları numune yüzeyine gönderilmektedir. Sistemde bulunan bir nem alma cihazı yardımıyla deney esnasında kullanılan basınçlı havanın nemi alınmaktadır. İkincil basınç tankı içinde bulunan hassas dozajlama cihazı ile deney esnasında numune yüzeyine gönderilecek aşındırıcı parçacık miktarı ayarlanabilmektedir. Bu cihaz 0.2 g/dk hassasiyete kadar aşındırıcı parçacık miktarını ayarlayabilmektedir. Deneyler esnasında bir çok deney parametresinin (deney süresi, deney basıncı, katı parçacık besleme miktarı, numune tabla hızı) takibi ve kontrolü, sistemde mevcut olan kontrol paneli ile yapılmaktadır.



Şekil 1. Erozyon deney düzeneği

Figure 1. Erosion test setup

İkincil basınç tankında basınçlandırılan aşındırıcı parçacıklar, Şekil 2’de detaylı olarak verilen deney sistemi kabinine gönderilmektedir. Burada katı parçacıklar, 3.125 mm iç çaplı yakınsak-ırsaksak lüle ile numuneye püskürtülmektedir. Parçacık çarpma açısı, açılı şablonları kullanılarak 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80 ve 90° olarak ayarlanabilmektedir.

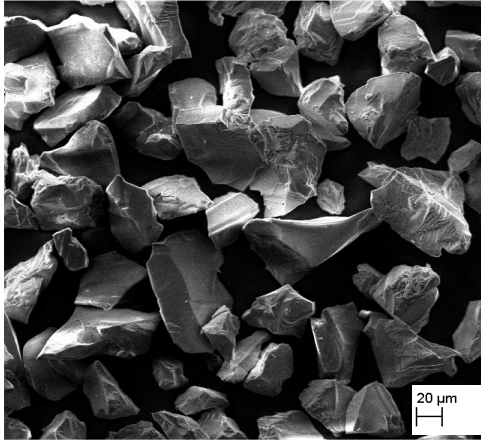


Şekil 2. Erozyon deney sisteminin kabin içi

Figure 2. Erosion test setup cabin interior

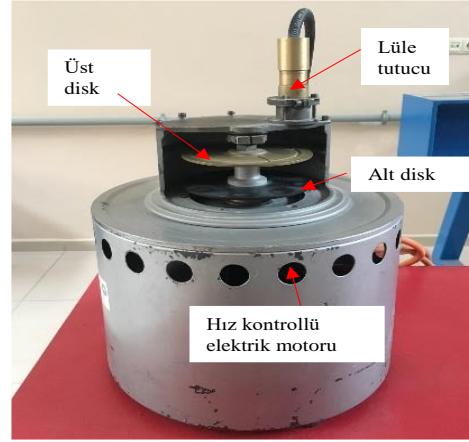
Aşındırıcı Parçacık ve Hız Ölçümü (Abrasive Particle and Speed Measurement)

Erozyon deneyleri, Şekil 3’de SEM görüntüsü verilmiş olan 52 mikron boyutlarında alümina (Al_2O_3) parçacıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katı parçacıkların hız- basınç kalibrasyon eğrileri, Şekil 4’de gösterilen “Çift Disk Ölçüm Düzeneği” kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ruff ve Ives, 1975). Kalibrasyon çalışmaları, deneylerde kullanılacak olan besleme miktarı (2,5 gr/dk) için yapılmıştır.



Şekil 3. Alümina parçacıklarının SEM görüntüsü

Figure 3. SEM image of alumina particles



Şekil 4. Çift disk ölçüm düzeneği

Figure 4. Double disk measurement device

Krater Derinliklerinin Ölçülmesi (Crater Depth Measurement)

Erozyon deneylerine tabii tutulan numunelerinin yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri, Şekil 5’de verilen üç boyutlu temassız lazer optik profilometre cihazı ile ölçülmüştür.

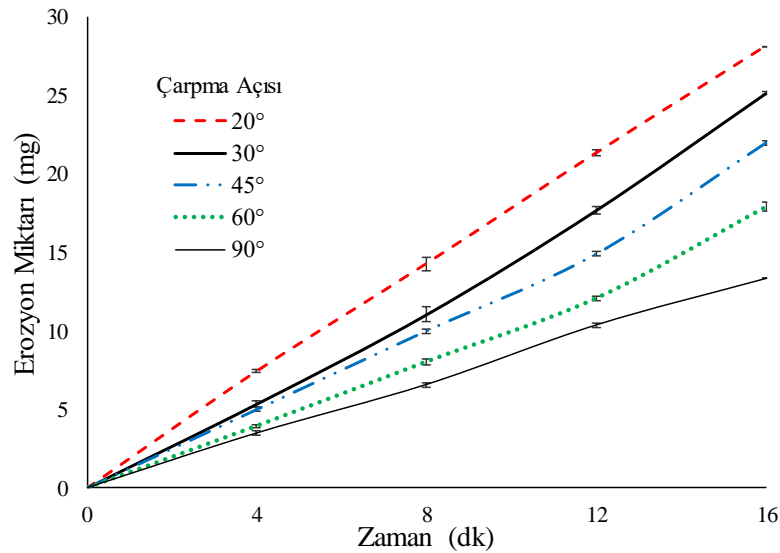


Şekil 5. Temassız lazer optik profilometre
Figure 5. Non-contact laser optical profilometer

BULGULAR (RESULTS)

Erozyon Miktarının Zamana Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Time)

AA6061, Ti-6Al-4V ve SS304 metalik malzemelerinin erozyon miktarının zamana göre değişimleri Şekil 6 – 11’ de verilmiştir. Şekil 6’da Ti-6Al-4V alaşımında 100 m/s sabit parçacık çarpma hızındaki değişik parçacık çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere en düşük erozyon miktarı 90° parçacık çarpma açısında elde edilmiştir. İlk 4. dakikada erozyon miktarı; 3.50 mg iken 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 6.60, 10.40 ve 13.37 mg olarak elde edilmiştir.

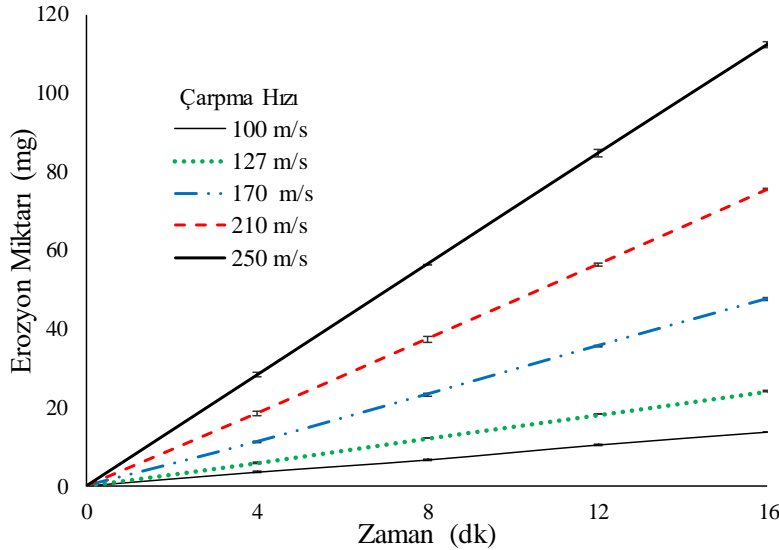


Şekil 6. Ti-6Al-4V malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütleles erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 6. Mass erosion variation vs. time for Ti-6Al-4V material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles

Şekil 7’de Ti-6Al-4V alaşımının 90° parçacık çarpma açısı değerinde, farklı parçacık çarpma hızındaki erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde elde edilmişken, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Örneğin Ti-6Al-4V alaşımındaki erozyon miktarı; 100 m/s çarpma hızında 4., 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 3.50, 6.60, 10.40 ve 13.70 mg olarak elde edilmiştir. 127 m/s hız değerindeki erozyon hasarları ise 4., 8., 12. ve

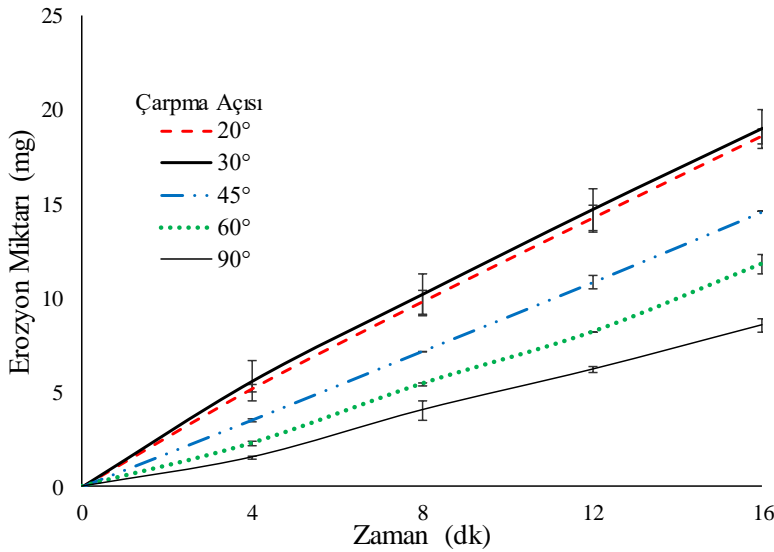
16. dakika sonunda sırasıyla 5.80, 12.05, 18.00 ve 24.05 mg olarak elde edilmiştir. 170 m/s hızında yapılan deneylerde ise 4. dakika sonunda 11.15 mg erozyon miktarı ölçülmüştür. Bu erozyon miktarı diğer dakikalarda beklendiği gibi zamanlar doğrusal olarak artmıştır. 210 m/s' lik parçacık çarpma hızındaki deneyler için ise aynı dakikalar sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 18.40, 37.35, 56.25 ve 75.40 mg erozyon değerleri elde edilmiştir. Son olarak 250 m/s parçacık çarpma hızında yapılan deneylerde ise maksimum erozyon miktarı elde edilmiş olup 4., 8., 12. ve 16. dakika sonunda sırasıyla 28.15, 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Ti-6Al-4V malzemesi için 90° çarpma açısı ve farklı parçacık çarpma hızlarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi

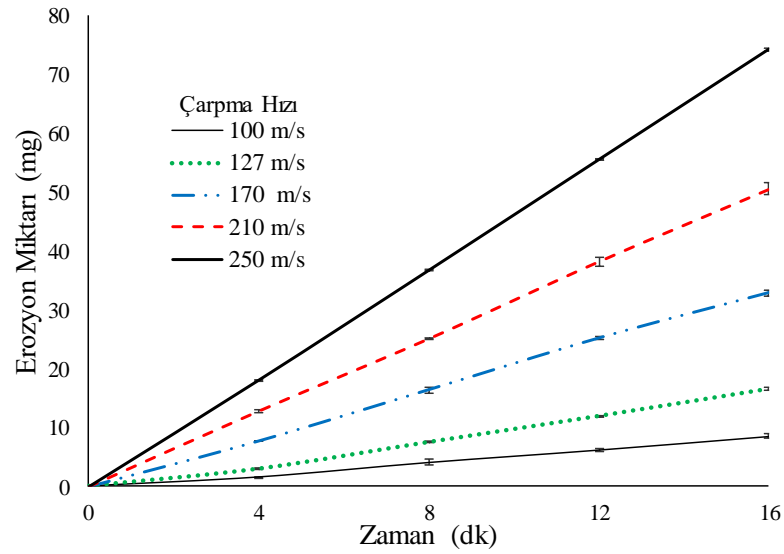
Figure 7. Mass erosion variation vs. time for Ti-6Al-4V material at impact angle of 90 and different particle impact velocities

Şekil 8 ve Şekil 9'da ise AA6061 alaşımındaki değişik parçacık çarpma açısı ve hızlarında meydana gelen kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimleri verilmiştir. AA6061 malzemesi için zamana göre elde edilen erozyon miktarı, Ti-6Al-4V alaşımına benzer şekilde doğrusal olarak artmıştır.



Şekil 8. AA6061 malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi

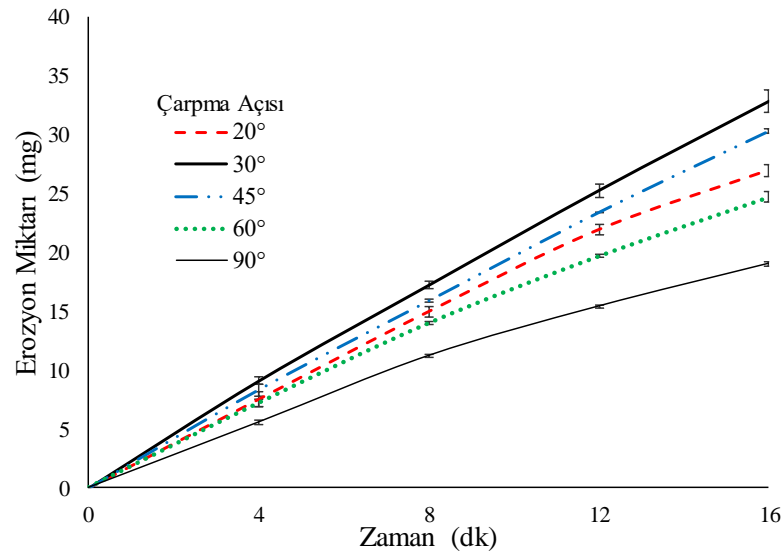
Figure 8. Mass erosion variation vs. time for AA6061 material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles



Şekil 9. AA6061 malzemesi için 90° çarpma açısı ve farklı parçacık çarpma hızlarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi

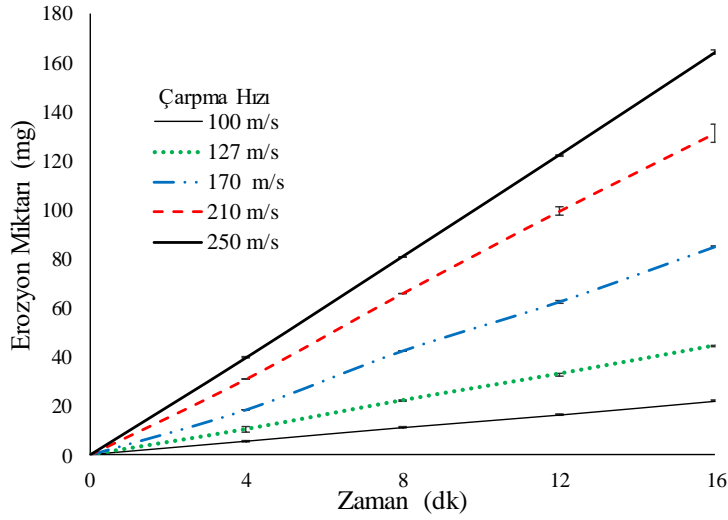
Figure 9. Mass erosion variation vs. time for AA6061 material at impact angle of 90° and different particle impact velocities

Şekil 10 ve Şekil 11'de ise SS304 malzemesindeki değişik parçacık çarpma açısı ve hızlarında meydana gelen kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimleri verilmiştir. Grafiklerden kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimleri diğer malzemelere olduğu gibi hemen hemen doğrusal artmıştır.



Şekil 10. SS304 malzemesi için 100 m/s parçacık çarpma hızı ve farklı çarpma açılarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 10. Mass erosion variation vs. time for SS304 material at particle impact velocity of 100 m/s and different impact angles

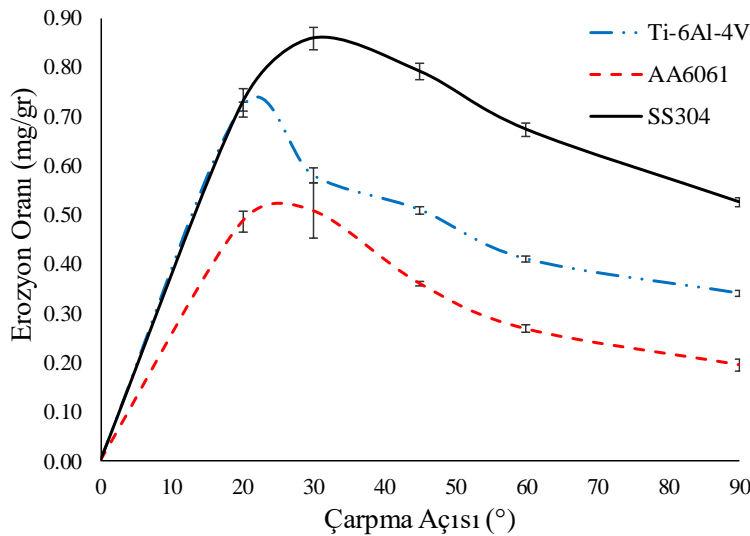


Şekil 11. SS304 malzemesi için 90° çarpma açısı ve farklı parçacık çarpma hızlarındaki kütleli erozyon miktarının zamana göre değişimi

Figure 11. Mass erosion variation vs. time for SS304 material at impact angle of 90 and different particle impact velocities

Erozyon Miktarının Çarpma Açısına Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Impact Angle)

Erozyon miktarının parçacık çarpma açısına göre değişimleri Şekil 12 ve Şekil 13’ de verilmiştir. Şekil 12’ de, 100 m/s parçacık çarpma hızında yapılan deneyler sonucunda elde edilen kütleli erozyon oranının parçacık çarpma açısına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, kütleli erozyon oranı en fazla SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmiştir. Bu malzemede maksimum erozyon oranı 30° çarpma açısında görülürken minimum ise 90° parçacık çarpma açısında görülmüştür. Ti-6Al-4V alaşımında, SS304 paslanmaz çeliğine oranla daha az kütleli erozyon oranı görülmüştür. Bu alaşımında maksimum kütleli erozyon oranı 20° çarpma açısında, en düşük erozyon oranı ise 90° çarpma açısında elde edilmiştir. En iyi kütleli erozyon oranı performansı AA6061 alaşımında görülmüştür. Bu malzeme de diğer metalik malzemelerindekine benzer erozyon davranışı elde edilmiş olup, maksimum kütleli erozyon oranı 30° çarpma açısında, minimum kütleli erozyon oranı 90° çarpma açısında elde edilmiştir.

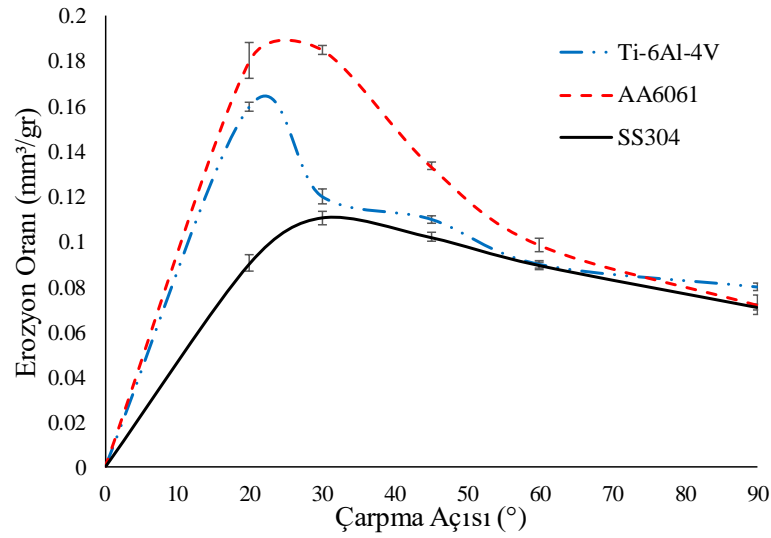


Şekil 12. SS304, AA6061, Ti-6Al-4V malzemeleri için 100 m/s parçacık çarpma hızındaki kütleli erozyon oranının çarpma açısına göre değişimleri

Figure 12. Mass erosion rate variation vs. impact angle for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact velocity of 100 m/s

Erozyon hasarında krater derinliği malzemenin delinmesinde önemli bir ölçü olmaktadır. Bu sebeple yukarıda kütleli olarak verilen erozyon oranları ayrıca hacimsel olarak ta hesaplanmıştır. Hacimsel erozyon oranları kütleli erozyon miktarının malzemenin kendi yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir.

Şekil 13’de deney numunelerine ait hacimsel erozyon oranlarının çarpma açısına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görülebileceği üzere; en iyi hacimsel erozyon oranı SS304 malzemesi için elde edilmişken, bunu Ti-6Al-4V ve AA6061 alaşımları takip etmiştir. Kütleli erozyon oranı bakımından en iyi performansı gösteren AA6061 alaşımı, hacimsel erozyon oranında en kötü durumda olmuştur. Bunun nedeni AA6061 alaşım yoğunluğunun (2700 kg/m^3) diğer SS304 (7850 kg/m^3) ve Ti-6Al-4V (4428 kg/m^3) numunelerine göre daha düşük olmasıdır.

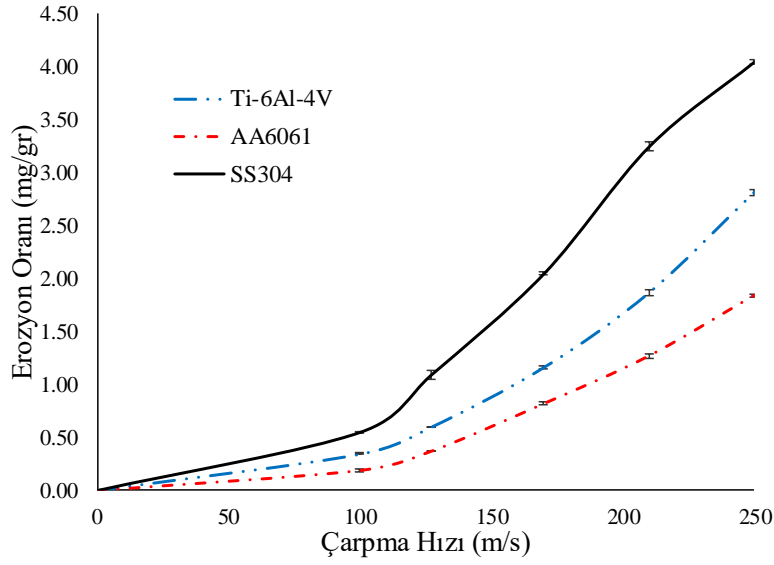


Şekil 13. SS304, AA6061, Ti-6Al-4V malzemelerinde 100 m/s parçacık çarpma hızındaki hacimsel erozyon oranının çarpma açısına göre değişimleri

Figure 13. Volumetric erosion rate variation vs. impact angle for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact velocity of 100 m/s

Erozyon Miktarının Çarpma Hızına Göre Değişimi (Change of Erosion Amount According to Impact Velocity)

Erozyon deneyleri sonunda malzemelerde meydana gelen kütleli erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre değişimleri Şekil 14’de bir arada verilmiştir. Kütleli erozyon oranı en yüksek SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmişken, en düşük AA6061 alaşımında elde edilmiştir. Erozyon oranları 120 m/s hızından sonra önemli derecede artış gösterirken kütleli erozyon oranları literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.

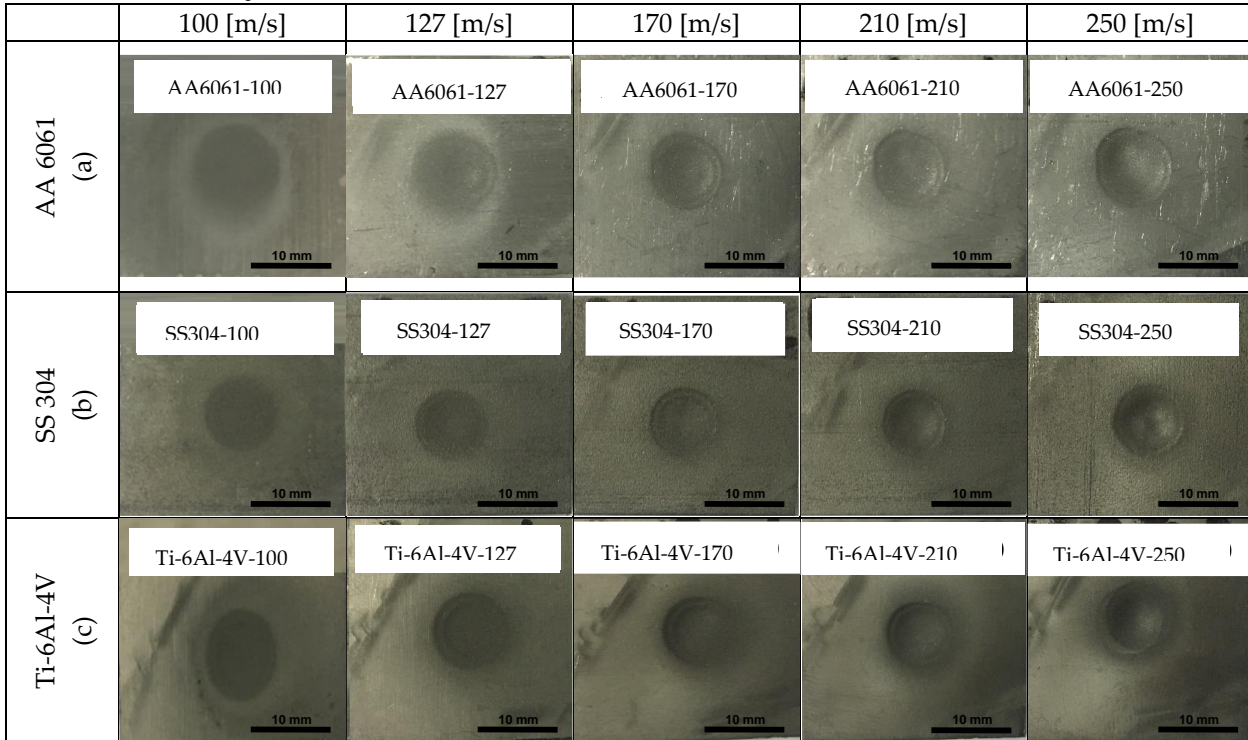


Şekil 14. SS304, AA6061, Ti-6Al-4V malzemeleri için 90° parçacık çarpma açısındaki kütleli erozyon oranının parçacık çarpma hızına göre değişimleri

Figure 14. Mass erosion rate variation vs. particle impact velocity for SS304, AA6061 and Ti-6Al-4V materials at particle impact angle of 90°

Krater Derinlikleri (Crater Depths)

Sabit 90° parçacık çarpma açısında yapılan erozyon deneyleri sonrasında, numune yüzeylerinin deforme olmuş görüntüleri Şekil 15'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere çarpma hızının artmasıyla bütün malzemeler için krater derinlikleri de artmaktadır.



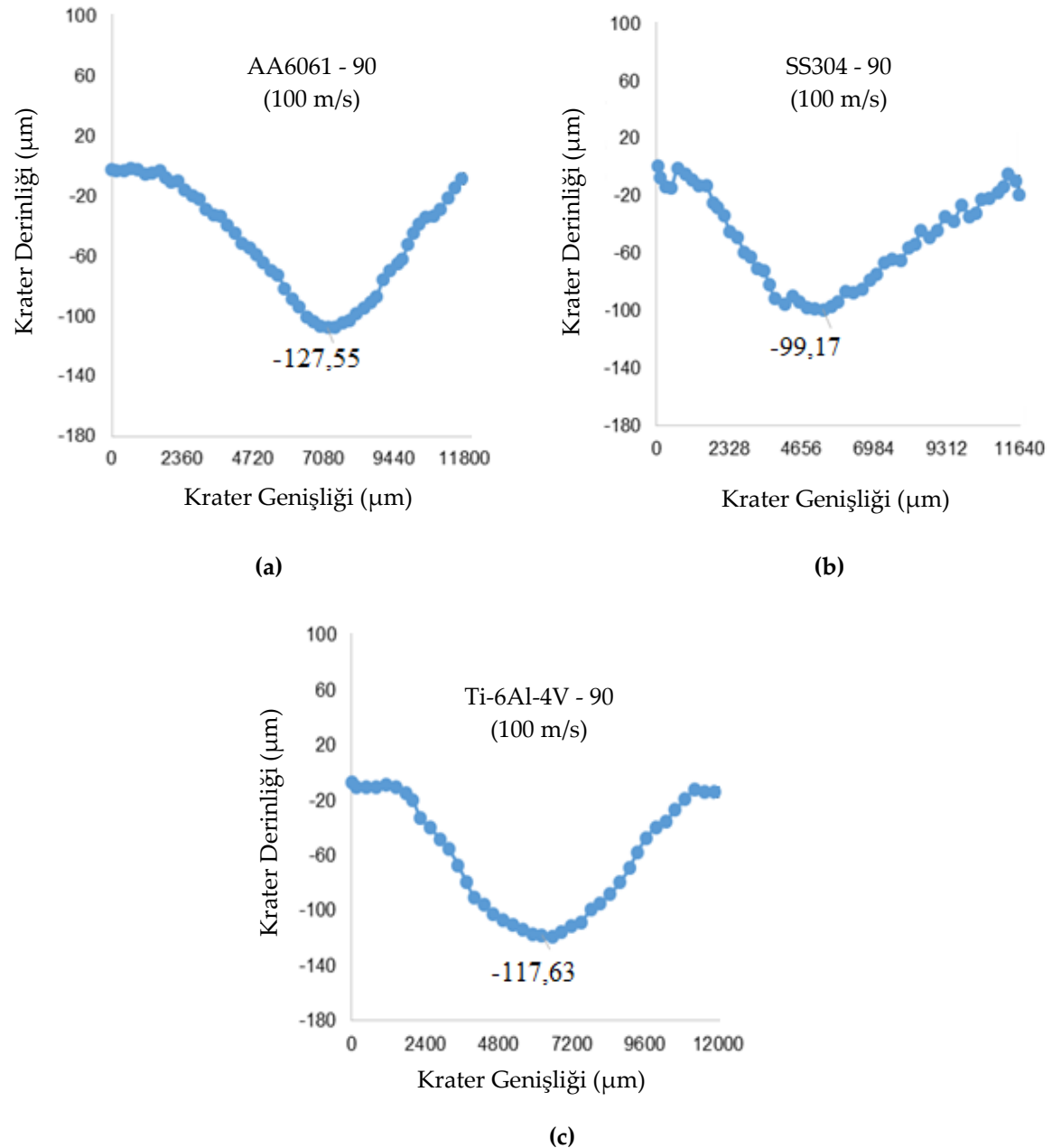
Şekil 15. 90° çarpma açısında yapılan deneylerden sonra numunelerde oluşan krater görüntüleri

AA6061, (b) SS304, (c) Ti-6Al-4V

Figure 15. Crater images on samples after experiments at 90° impact angle

(a) AA6061, (b) SS304, (c) Ti-6Al-4V

Şekil 16'da ise 90° parçacık çarpma açısında numunelerde meydana gelen krater derinliklerinin grafikleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde en düşük krater derinliği $99.17 \mu\text{m}$ değeri ile SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmişken en yüksek krater derinliği $127.55 \mu\text{m}$ ile AA6061 alaşımında elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, krater derinlikleri numunedeki hacimsel erozyon oranları ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Şekil 13'te belirtilen, en iyi erozyon davranışı SS304 çeliğinde ve en kötü erozyon davranışının AA6061 alaşımında görüldüğü sonucuyla uyumludur.

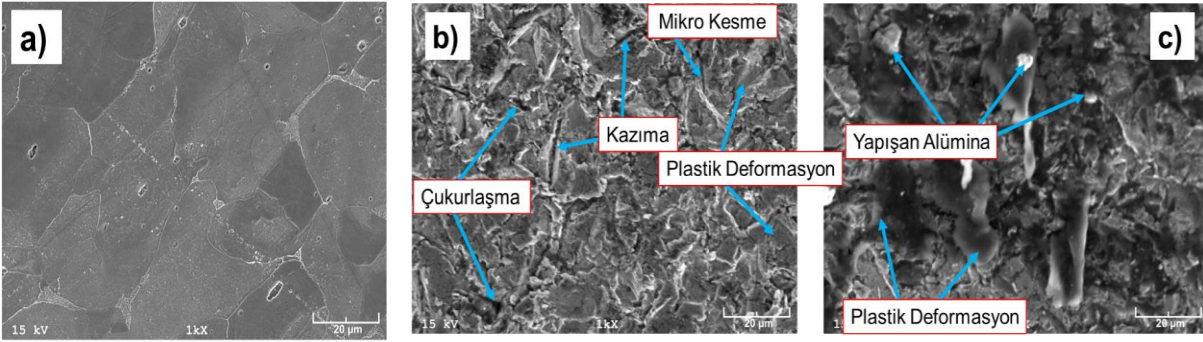


Şekil 16. 90° çarpma açısında malzemelerde oluşan krater derinlikleri

(a) AA606, (b) SS304, (c) Ti-6Al-4V

Figure 16. Crater depths of materials at 90° impact angle

(a) AA606, (b) SS304, (c) Ti-6Al-4V



Şekil 17. Ti-6Al-4V numunesinde deney sonrası elde edilen optik mikroskop görüntüleri

Figure 17. Optical micrograph images of Ti-6Al-4V sample after experiment

SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSIONS)

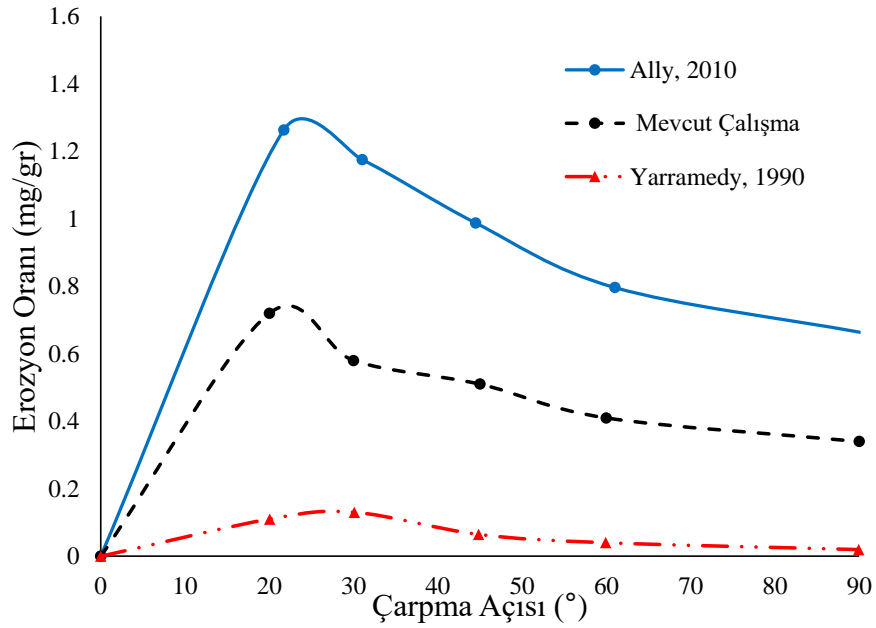
Bu çalışmada mühendislikte yaygın olarak kullanılan AA6061, SS304 ve Ti-6Al-4V metalik malzemelerinin yüksek hızlardaki katı parçacık erozyon performansları incelenmiştir.

Erozyon miktarı zamana göre her açı değeri için literatürle de uyumlu olarak doğrusal artarken, parçacık çarpma hızı ile doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır (Hadavi ve diğ., 2015, Atroshenko ve diğ., 2017).

Deney sonrası numune yüzeylerinde oluşan krater derinlikleri incelendiğinde (Şekil 16) ise hacimsel erozyon performanslarına paralel olarak en yüksek krater derinliği AA6061 alaşımında, en düşük krater derinliği ise SS304 paslanmaz çeliğinde elde edilmiştir.

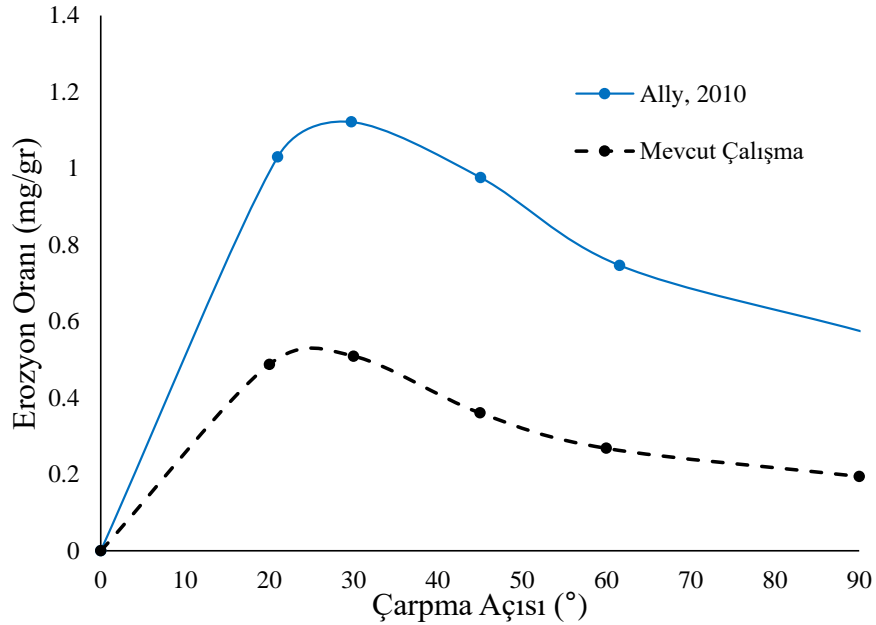
Şekil 17 de Ti-6Al-4V alaşımının 90° çarpma açısı için test sonrası optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 17b incelendiğinde Ti-6Al-4V alaşımının yüzeyinde, aşındırıcı tozların mikro kesme ve kazıma ile erozyona neden olduğu görülmektedir. Parçacıklar, numunenin bazı bölgelerinde plastik deformasyonlar ile çukurlaşmalara neden olurken bazı noktalarda numunelere yapışmaktadır (Şekil 17c). Bu da deney esnasında sünek malzemelerde görülen inkübasyon safhasının oluştuğunu göstermektedir. Bu davranış literatürdeki sünek malzemelerdeki erozyon mekanizmasıyla da uyumaktadır (Finnie,1960).

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Ally (2010) ve Yarramedy (1990)' nin yapmış oldukları deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 18' de verilmiştir. İki araştırmacı da hedef malzeme olarak Ti-6Al-4V kullanmışlardır. Ally aşındırıcı parçacık olarak 50 µm nominal boyuttaki alümina parçacıklarını hedef malzemeye (Ti-6Al-4V) 106 m/s parçacık çarpma hızı ile göndermişken, Yarramedy 125 µm boyutundaki silikon karbit kullanmış ve çarpma hızı olarak ta 55 m/s yi seçmiştir. Bizim çalışmamızda ise, Ti-6Al-4V Grade 6 alaşımı için erozyon testleri, 50 µm alümina parçacıklarınının 100 m/s parçacık çarpma hızı ile hedef yüzeye fırlatılmıştır. Her üç sonuçta çarpma açısına göre maksimum erozyon oranları 20-30° de elde edilmiş olup erozyon oranlarında sapmalar oluşmuştur. Sonuçlar arasındaki farkların nedenleri arasında; kullanılan malzemelerin farklı ısıl işleme tabi tutulması, katı parçacıkların farklı özelliklere sahip olması ve katı parçacık hızlarının yaklaşık ölçülmesi sayılabilir.



Şekil 18. Ti-6Al-4V alaşımlarının kütleli erozyon oranlarının karşılaştırılması
Figure 18. Comparison of mass erosion rate-impact angle behavior of Ti-6Al-4V alloys

Şekil 19' da ise Ally'nin aynı çalışmasındaki AA6061 alaşımında elde ettiği sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çarpma açısına göre maksimum erozyon oranları titanyum alaşımında olduğu gibi 20°- 30° arasında elde edilmiş ancak değerlerde sapmalar oluşmuştur. Bu sapmalar titanyum kısmındaki benzer ifadelerle açıklanabilir.



Şekil 19. AA6061 alaşımlarının kütleli erozyon oranlarının karşılaştırılması
Figure 19. Comparison of mass erosion rate-impact angle behavior of AA6061 alloys

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akdoğan, A., 10-12 Mayıs 2000, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Metal ve Metal Dışı Malzemeler ve Bu Malzemelerin Muayene Yöntemleri, Kayseri 3. Havacılık Sempozyumu
Ally, S., 2010, Abrasive Jet Micro-Machining Of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada,

- ASTM International, 2004, "Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets." Designation: G 76 – 04,
- ASTM International, 2010, "Standard test method for dust erosion resistance of optical and infrared transparent materials and coatings." Designation: F1864 – 05.
- Atroshenko, S.A., Evstifeev, A.D., Kazarinov, N.A., Petrov, Yu. V., Valiev, R.Z., 2017, Behaviour of the grade 5 titanium alloy in different structural states in conditions of high-speed erosion. *Procedia Structural Integrity*, 190-195.
- Avcu, E., 2013, Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bousser, E., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J.E., 2014, Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications, *Surface & Coatings Technology*, 257, 165-181.
- Emiliani, M., Brown, R., 1984, The effect of microstructure on the erosion of Ti-6Al-4V by spherical particles at 90° impact angles. *Wear* 97, 323-338.
- Finnie, I., 1958, The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, *Proc. 3rd U.S. National Congress of Applied Mechanics*, 527-532.
- Finnie, I., 1960, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3: 87-103.
- Güler, K. A., 2003, Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hadavi, V., Papini, M., 2015, Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials, *Wear*, 342-343, 310-321.
- Hutchings, I.M., Winter, R. E. ,1976, Field J.E. Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles, *Proc. R. Soc.*, 348 (Ser A), 379-392.
- MIL-STD-3033, 2010. "Particle/sand erosion testing of rotor blade protective materials."
- Morrison, C.T., Scattergood, R.O., Routbort, J.L., 1986, Erosion of 304 stainless steel. *Wear* 111, 1-13.
- Nsoesie, S., 2013, Experimental Investigation and Analytical Modeling of Solid-Particle Erosion Behavior of Stellite Alloys, Master Thesis, Carleton University, Canada.
- Oka, Y. I., Okamura, K., Yoshida, T., 2005, Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: part 1: effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 259, 1-6, 95-101.
- Parsi, M., Agrawal, M., Srinivasan, V., Vieira, R. E., Torres, C. F, Brenton, S., McLauryd, S. B., Shirazi, S. A., 2015, "CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 706-718.
- Rana, F., Stefanescu, D. M., 1989, Friction properties of Al 1.5PctMg/SiC particulate metal-matrix composites, *Metallurgical Transactions A*, 20, 1564-1566.
- Ruff, A.W., Ives, L.K., 1975, Measurement Of Solid Particle Velocity İn Erosive Wear, *Wear*, 35, 195-199.
- Shimizu, K., Noguchi, T., Seitoh, H., Okada, M., Matsubara, Y., 2001, FEM analysis of erosive wear, *Wear* 250, 779-784.
- Yerramareddy, S., ve Bahadur, S., 1990, Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, *Wear*, 142, 253-263.
- Yıldıran, Y., 2013, 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zhou J., Bahadur S., 1995, Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, *Wear*, 186, 332-339.
- Zincir S., 1975, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımları ve Özellikleri, Bitirme Tezi, Kimya Metalurji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, , İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul