

## Ti-6Al-4V Alaşımının Katı Parçacık Erozyon Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

<sup>1</sup>Ali İhsan Budur, <sup>\*2</sup>Hasan Gedikli

<sup>1</sup>Arsin Meslek Yüksekokulu, Gaz ve Tesilat Teknolojisi Programı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye  
<sup>\*2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

### Özet

Bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının katı parçacık çarpması altındaki erozyon davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar iki aşamada yürütülmüştür. Malzemenin erozyon performansları ilk aşamada parçacık çarpma hızı 100 m/s için 20, 30, 45, 60, 90° çarpma açılarında belirlenmişken, ikinci aşamada 90° parçacık çarpma açısında ve 100, 127, 170, 210, 250 m/s parçacık çarpma hızlarında belirlenmiştir. Deneyler sonucunda Ti-6Al-4V alaşımında 20° parçacık çarpma açısından maksimum erozyon miktarı elde edilmişken, minimum erozyon miktarı 90° de elde edilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlar, test sonuçları ile oldukça uyumlu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katı parçacık erozyonu, Ti-6Al-4V alaşımı, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

### Abstract

*In this study, solid particle erosion behavior of Ti-6Al-4V alloy, widely used in aerospace industry, been investigated experimentally and numerically. Experimental studies have been carried out in two steps. In the first step, erosion performance of the material was determined at different impact angles of 20, 30, 45, 60, 90 for impact velocity of 100 m/s while, in the second step, it was determined at impact velocities of 100, 127, 210 and 250 m/s for impact angle of 90°. As a result of the experiments, maximum erosion loss for the titanium alloy was obtained at the angle of 20° while the minimum erosion loss was obtained at the impact angle of 90°. The numerical results by using CFD (Computational Fluid Dynamics) method were obtained quite similar to the test results.*

**Keywords:** Solid particle erosion, Ti-6Al-4V alloy, Computational fluid dynamics (CFD)

## 1. Giriş

Katı parçacık erozyonu çarpan parçacıkların hızı, çarpma açısı, hedef malzeme özelliklerine bağlı bir hasar türü olup bir çok parametreyi bir arada içermektedir [1]. Bu parametrelerden en önemlilerinden biri çarpma açısıdır. Çarpma açısı, aşındırıcı parçacıkların hedef malzeme yüzeyine çarptıkları anda, parçacıklar ile hedef yüzey arasında oluşan açı olarak tanımlanmaktadır [2]. Yapılan çalışmalar, her malzemenin, maksimum erozyona uğradıkları bir kritik çarpma açılarının olduğunu göstermektedir. Finnie, sünek ve gevrek malzemelerde, çarpma açısı değişiminin katı parçacık erozyonuna etkisini incelemek için yaptığı deneyler neticesinde sünek malzemelerde maksimum erozyon miktarının  $15-30^\circ$  arasında, gevrek malzemelerde ise  $90^\circ$  de gerçekleştiğini tespit etmiştir [3]. Yerramareddy ve Bahadur [4], Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyine 120 grit silikon karbür aşındırıcı parçacıkları, 55 m/s hız ile çarptırmışlardır. Testler sonucunda, titanyum alaşımında maksimum erozyon miktarının  $30^\circ$  de olduğunu tespit etmişlerdir. Zhou ve Bahadır[5] Ti-6Al-4V alaşımını  $25-800^\circ\text{C}$  arasında yedi farklı sıcaklığa hava ortamında ısıtarak ulaştırmış ve bu sıcaklık değerlerinde erozyon testlerini yapmışlardır. Bu testlerde 120 grit silikon karbür parçacıklarını, 55- 110 m/s parçacık çarpma hızları aralığındaki değişik parçacık çarpma açılarında ( $10-90^\circ$ ) hedef malzeme yüzeyine çarptırmışlardır. Yapılan testler sonucunda, Ti-6Al-4V alaşımında maksimum erozyon miktarının  $30^\circ$  olduğunu ve sıcaklığın artmasıyla birlikte bu açı değerindeki erozyon miktarının düzgün olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte  $90^\circ$  de özellikle  $650 - 800^\circ\text{C}$  arasında yapılan testlerde erozyon miktarında aşırı bir artış gözlemlemişlerdir. Ally[6], Al6061, Ti-6Al-4V ve 316 paslanmaz çelik malzemelerinin erozyon davranışlarını birbirleriyle kıyaslamak amacıyla  $50\ \mu\text{m}$  boyutunda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aşındırıcı parçacıklarını değişik parçacık çarpma açılarında ( $30, 45, 60$  ve  $90^\circ$ ) çarptırarak yaptığı testler neticesinde en fazla erozyonun 316 paslanmaz çelikte en az aşınmanın da Al6061 alüminyum alaşımında olduğunu tespit etmiştir. Avcu[7], değişik basınç değerlerinde (1.5, 3 ve 4 bar) ve değişik parçacık çarpma açısı ( $30, 60$  ve  $90^\circ$ ) değerlerinde Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde yaptığı testlerde erozyon davranışı için özgün bir görüntü analiz yöntemi geliştirmiştir.

Katı parçacık erozyonu çalışmalarında, 1990'lı yıllardan itibaren sayısal yöntemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Katı parçacık erozyonunun sayısal olarak modellenmesinde birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalarda katı parçacık erozyonuna etki eden parametreler sistematik olarak incelenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği de katı parçacık erozyonunun sayısal modellemesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntem yardımıyla, bir akış ortamında karmaşık geometriye sahip parçalarda oluşan katı parçacık erozyonu hesaplanabilmektedir. Shin[8], ticari ANSYS-Fluent paket programı kullanarak değişik çalışma şartları için bir helikopter palinin yüzeyindeki erozyonu belirlemek için iki ve üç boyutlu sayısal analizler yapmıştır. Araştırmacı analizlerde, k- $\omega$  SST türbülans modeli kullanmış ve analiz sonuçlarının test sonuçlarıyla yüksek derecede uyum içerisinde olduğunu tespit etmiştir.

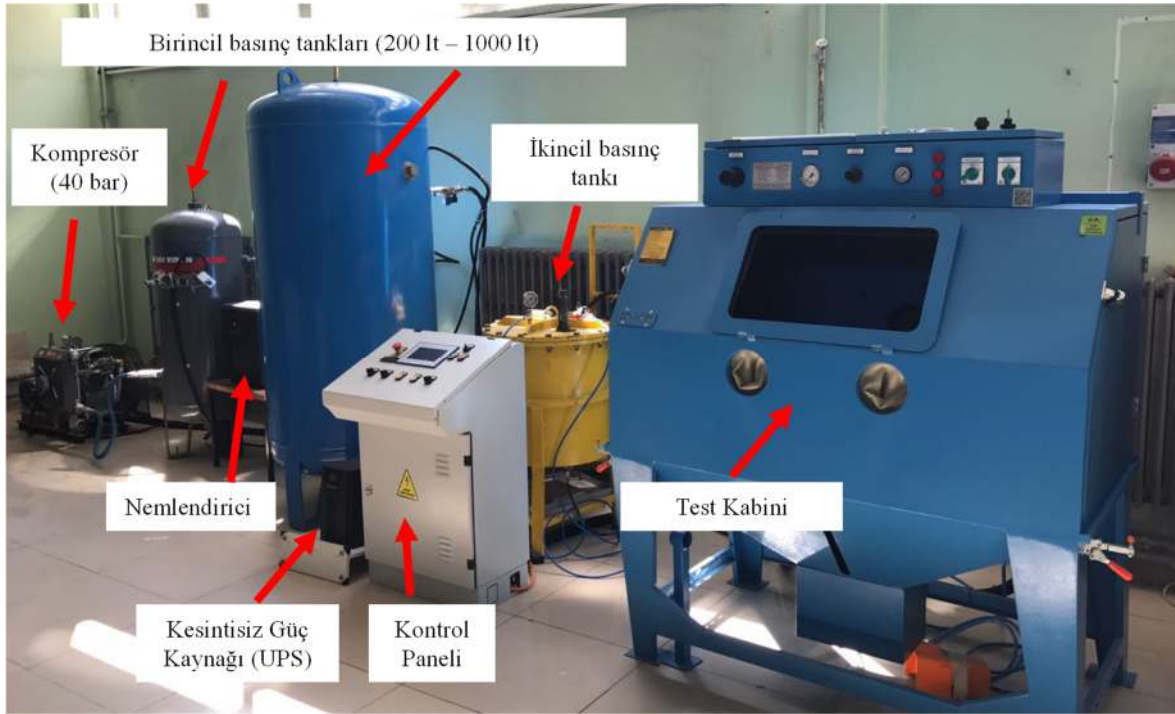
Bu çalışma kapsamında, havacılık sektöründe yoğun bir kullanım alanına sahip bir titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımının katı parçacık erozyonu davranışı erozyon testleri ve sayısal olarak incelenmiştir. Böylece Ti-6Al-4V malzemesinin literatürde mevcut olmayan yüksek hızlarda ki erozyon performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Erozyon testleri iki aşamada gerçekleştirilmiş olup birinci aşamada; Ti-6Al-4V alaşımının katı parçacık erozyonu davranışının parçacık çarpma açısına göre değişimi incelenmiştir. Bunun için sabit bir parçacık çarpma hızında ( $100\ \text{m/s}$ ) ve değişik çarpma açılarında ( $20, 30, 45, 60, 90^\circ$ ) erozyon testleri yapılmıştır. İkinci

aşamadaki erozyon testleri ise sabit 90° çarpma açısında ve değişik parçacık çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210 ve 250 m/s) gerçekleştirilmiştir. Böylece bu malzemenin farklı çarpma hızı ve çarpma açılarındaki erozyon performansı belirlenmiştir. Çalışmanın sayısal kısmında erozyon davranışı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla belirlenmiştir. Bunun için ANSYS-Fluent ticari paket programı kullanılmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

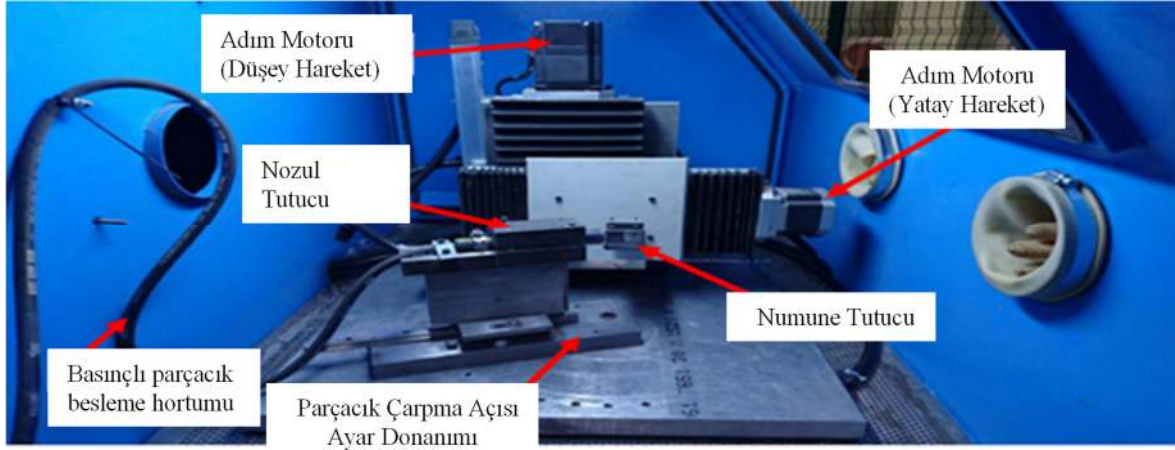
### 2.1. Erozyon Testleri

Katı parçacık erozyonu testlerinin yapıldığı test düzeneği Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Düzenekte katı parçacıkların hızı 50 m/s den 300 m/s hıza kadar ayarlanabilmektedir. Bunun için bir hava-parçacık karışım tankı ve 3.125 mm iç çaplı yakınsak-ıraksak nozul kullanılmıştır. Ayrıca nemlendirici cihazı ile basınçlı havanın nemi alınmaktadır. Bu tankın içerisinde de bir adet hassas dozajlama düzeneği bulunmakta olup, düzenek yardımıyla 0.2 g/dk hassasiyet ile sisteme parçacıklar gönderilmektedir.



Şekil 1. Katı parçacık erozyon testleri için kullanılan düzeneği

Şekil 2’de detaylı olarak test kabininin iç kısmı gösterilmiştir. Test kabinde çarpma açısı ve nozul mesafesi ayarlanabilmektedir.

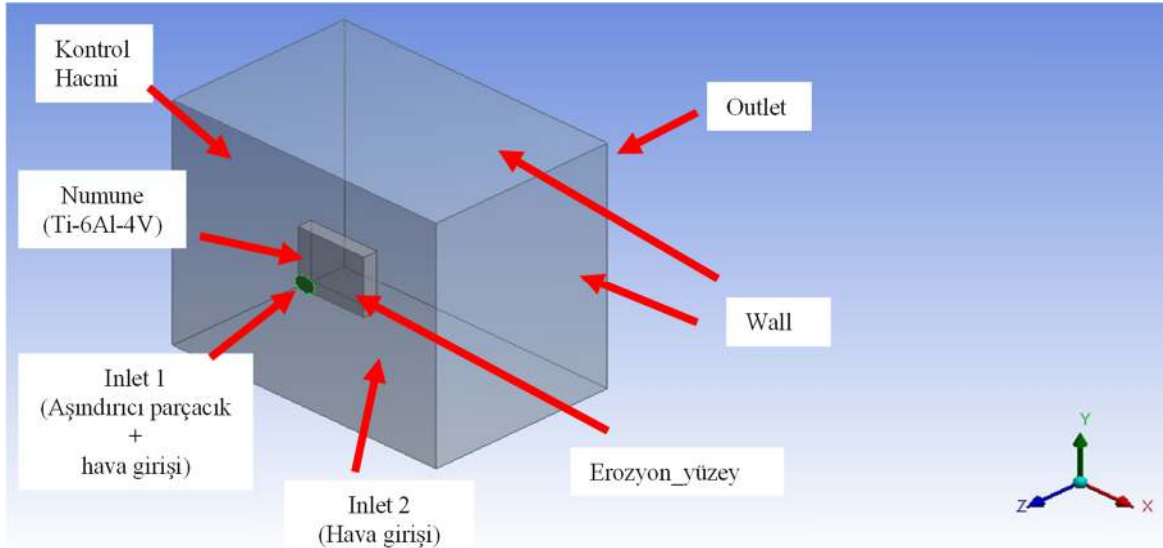


Şekil 2. Test düzeneği kabini içi

Testlerde Ti-6Al-4V alaşımının erozyon davranışı test edilmiştir. Bu alaşım yüksek mukavemet özelliği sahip olup havacılık, denizcilik ve medikal sanayisinde yaygın olarak tercih edilmektedir[9].

## 2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi İle Modelleme

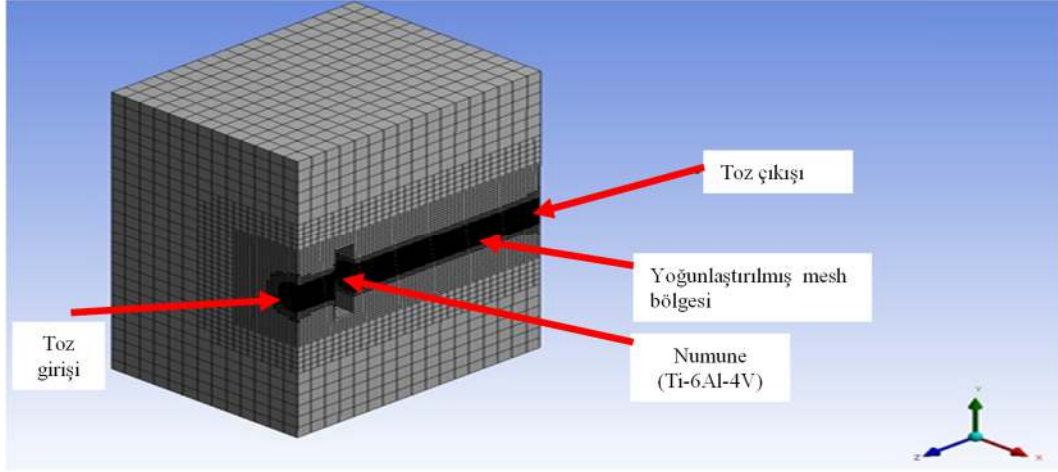
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akış ortamında karmaşık geometriye sahip parçalarda erozyon miktarının hesaplanmasında son yıllarda güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. ANSYS-Fluent yazılımı kullanılarak oluşturulan model Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Ti-6Al-4V alaşım malzemesi için oluşturulan sayısal erozyon modeli

Programda aşındırıcı parçacıkların ortama giriş yaptığı nozul ucu Inlet1, havanın ortama giriş kısmı ise Inlet2 olarak tanımlanmıştır. Havanın ortamdan çıkış yaptığı arka kısım Outlet, kontrol

hacminin alt, üst ve yan kısımlarının hepsi Wall olarak tanımlanmıştır. Diğer çarpma açılarındaki erozyon testlerinde ise numune X düzleminde döndürülerek yeni modeller oluşturulmuştur. Modelde akış ortamı ve numune için yaklaşık 500784 adet hexagon elemanlarla ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu modelde aşınma kalkanı yüzeylerine yakın yerlerde yoğunlaştırılmış ağ yapısı kullanılmıştır. Model için oluşturulmuş ağ yapısı Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Ti-6Al-4V alaşım malzemesi için oluşturulan ağ örgüsü

Akışkanlar dinamiği yaklaşımıyla gerçekleştirilen analizlerde en iyi yakınsama veren model  $k-\omega$  türbülans modeli seçilmiştir. Erozyon modellerinde DNV (2007) firmasına tarafından geliştirilen ve Denklem 1’de verilen erozyon eşitliği kullanılmıştır [10].

$$E_R = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{m_i \times K \times V_i^n \times F(\alpha)}{A_i} \quad (1)$$

Bu denklemde;

$E_R$  : Erozyon hız yoğunluğu (  $kg / m^2s$  )

$m_i$  : Hedef yüzeye çarpan parçacığın kütleli debisi (  $kg / s$  )

$V_i$  : Hedef yüzeye çarpan parçacığın hızı (  $m/s$  )

$K$  : Hedef yüzey ve parçacık malzemesine bağlı malzeme sabiti

$n$  : Hedef yüzey ve parçacık malzemesine bağlı hız üssü sabiti

$A_i$  : Parçacıkların çarptığı hedef yüzeydeki elemanın alanı

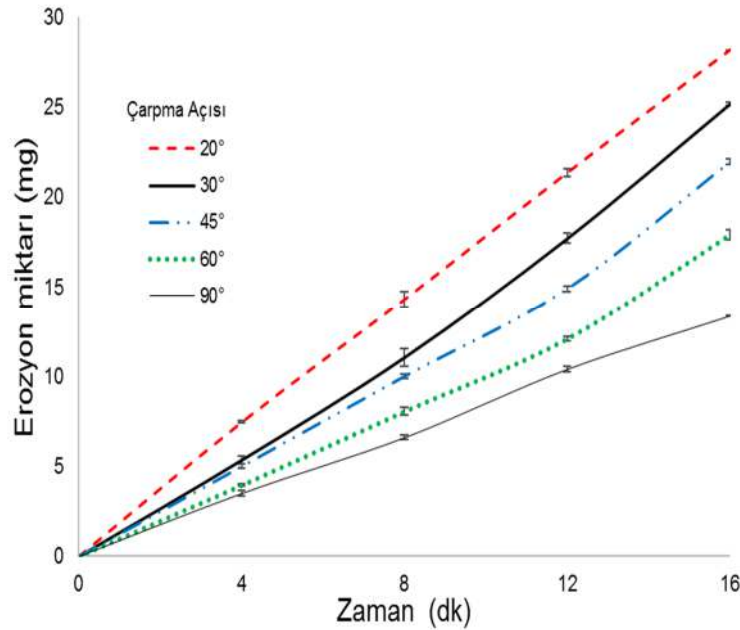
$F(\alpha)$  : Parçacık çarpma açısına bağlı fonksiyon sabiti

olarak tanımlanmakta olup,  $K$  ve  $n$  malzeme sabitleri yapılan erozyon testleri sonucu elde edilmektedir. Ti-6Al-4V malzemesi için  $K$  ve  $n$  katsayıları sırasıyla  $1.72962E-8$  ve  $2.3$  olarak elde edilmiştir [11].

Parçacıkları kontrol hacmine Inlet1’de giriş yapmakta ve Outlet kısmından çıkış yapmaktadır. Inlet kısmına ANSYS-Fluent programında, parçacık girişi için Injection tanımı yapılmıştır. Bu injection tanımlaması yapılırken, ortama giren parçacıkların çapı  $50 \mu m$ , hızları ise  $100 m/s$  olarak ayarlanmıştır. Ayrıca bu parçacıkların kontrol hacmine giriş debisi de  $2.5 gr/dk$  olacak şekilde tanımlanmıştır.

### 3. Bulgular

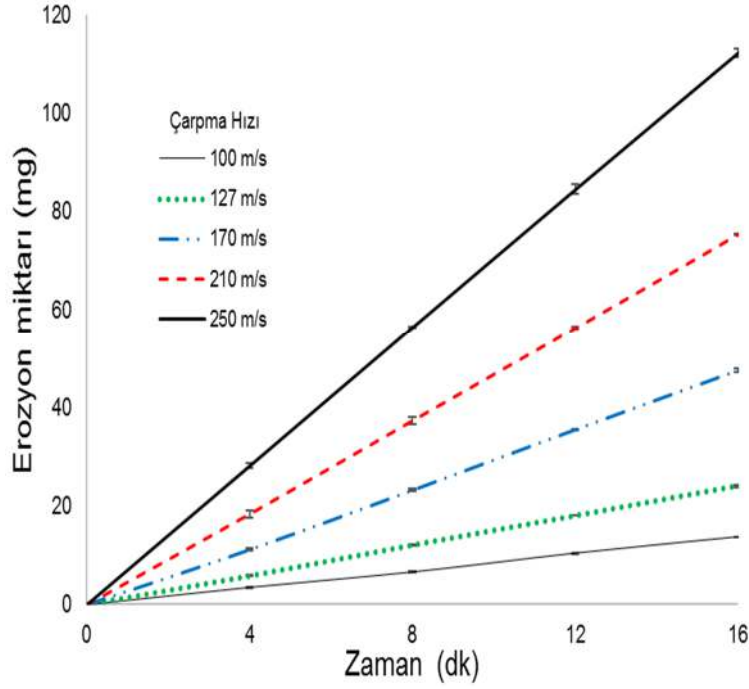
Ti-6Al-4V alaşımındaki erozyon davranışının parçacık çarpma açısı ve parçacık çarpma hızına göre değişim grafikleri Şekil 5 – 8’de sunulmuştur. Şekil 5’de Ti-6Al-4V alaşımında 100 m/s sabit parçacık çarpma hızındaki değişik parçacık çarpma açılarında oluşan erozyon miktarının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere en düşük erozyon miktarı 90°’lik parçacık çarpma açısında elde edilmiştir. Bu açı değerinde ilk 4. dakika sonunda en düşük erozyon miktarı 3.50 mg olarak belirlenmiştir. Erozyon miktarları 8, 12 ve 16. dakika sonunda ise sırasıyla 6.60, 10.40 ve 13.37 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları, her açı değeri için doğrusal olarak artmıştır.



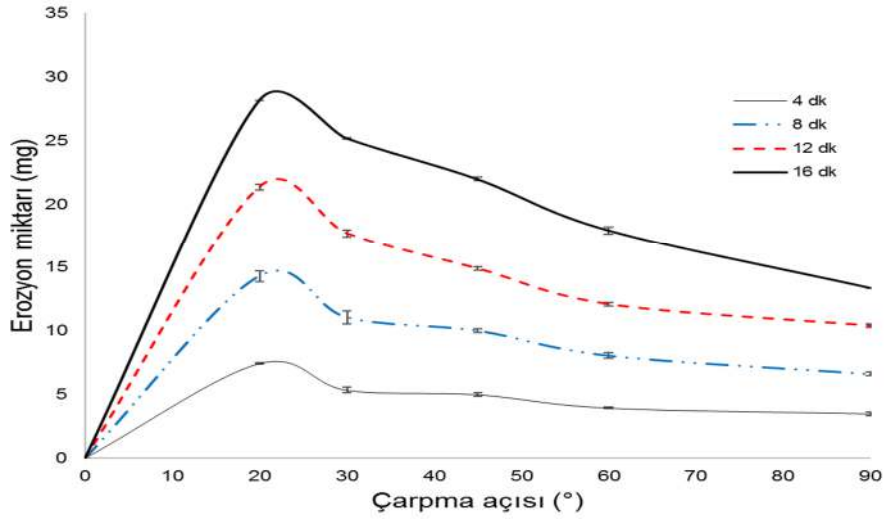
Şekil 5. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinde 100 m/s parçacık hızı altında değişik parçacık çarpma açılarında yapılan testler sonucu oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

Şekil 6’da ise Ti-6Al-4V alaşımında 90° parçacık çarpma açısında elde edilen erozyon değerlerinin parçacık çarpma hızına göre değişimleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde görülmekte olup, çarpma hızı arttıkça erozyon miktarı artmaktadır. Erozyon miktarları aynı malzeme için; 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 edilmişken, 127 m/s hız değerinde sırasıyla 5.80, 12.05, 18.00 ve 24.05 mg olarak elde edilmiştir. 170 m/s hızda yapılan testlerde 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 testler 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 testlerde, maksimum erozyon

miktarları elde edilmiştir. Bu değerlerde 4, 8, 12 ve 16. dakika sonunda sırasıyla 28.15, 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinde 90° çarpma açısı altında değişik parçacık çarpma hızlarında yapılan testler sonucu oluşan kütleli erozyon miktarlarının zamana göre değişimi

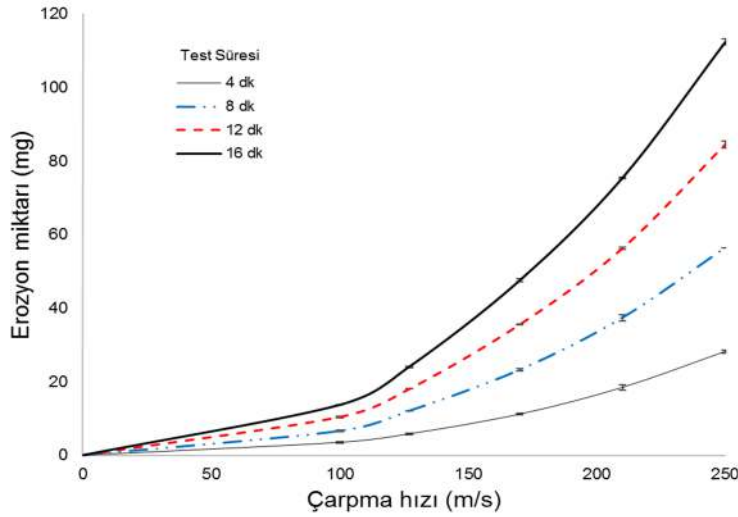


Şekil 7. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinde 100 m/s parçacık çarpma hızında oluşan kütleli erozyon miktarlarının parçacık çarpma açısına göre deneysel değişimi

Şekil 7’de Ti-6Al-4V alaşımında oluşan kütleli erozyon miktarının parçacık çarpma açısına göre değişim grafiği verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonundaki farklı parçacık çarpma açıları (20,

30, 45, 60 ve 90°) oluşan erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 90°'deki çarpma açısında 3.50 mg olarak elde edilmiştir. Erozyon miktarları çarpma açısı 60°, 45° ve 30° için sırasıyla 3.95 mg, 5.00 mg ve 5.35 mg değerlerine yükselip, çarpma açısı 20° de ise erozyon miktarı 7.45 mg değerinde maksimum değerine ulaşmıştır.

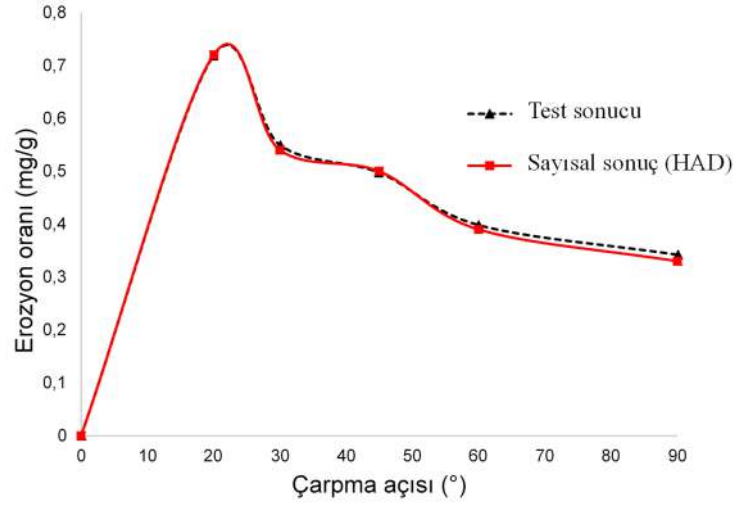
Şekil 8'de Ti-6Al-4V alaşımında meydana gelen kütleli erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Grafikte her 4 dakika sonunda farklı parçacık çarpma hızlarında (100, 127, 170, 210, 250 m/s) yapılan testlerde erozyon miktarları ayrı ayrı gösterilmektedir. Grafikteki 4. dakikadaki erozyon miktarları incelendiğinde; en düşük erozyon miktarı 100 m/s hız değerinde 3.50 mg olarak ölçülmüştür. Hız değeri arttıkça erozyon miktarı da artmakta olup sırasıyla 127, 170, 210 ve 250 m/s hız değerlerinde, 5.80, 11.15, 18.40 ve 28.15 mg değerine ulaşmıştır. Test süresi arttıkça erozyon miktarı da doğrusal artmaktadır. Bu malzeme için 250 m/s çarpma hızında yapılan testlerde 8, 12 ve 16. dakikalarda ki erozyon miktarları da sırasıyla 56.35, 84.50 ve 112.30 mg olarak ölçülmüştür. Erozyon miktarı her bir zaman değeri için çarpma hızına göre doğrusal olmayan bir şekilde artmıştır.



**Şekil 8.** Ti-6Al-4V alaşım malzemesinde 90° parçacık çarpma açısında oluşan kütleli erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre değişimi

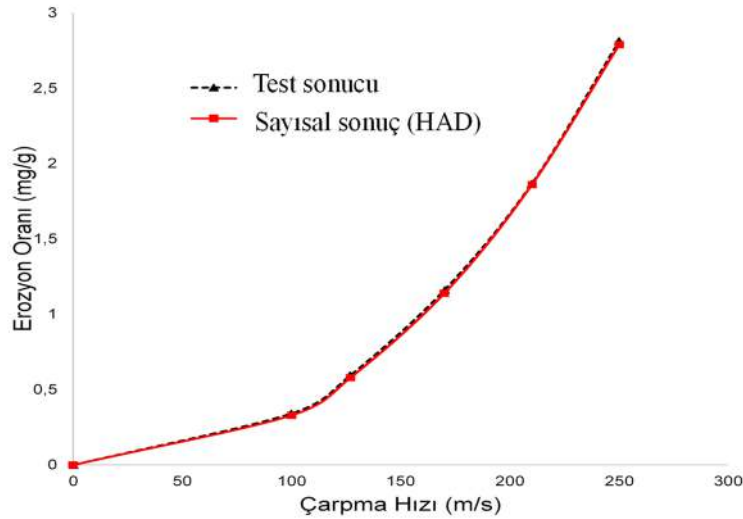
Hesaplama akışkanlar dinamiği yöntemiyle yapılan modelleme çalışmaları sonucu elde edilen erozyon oranı miktarlarının test sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 9 ve Şekil10'da verilmiştir. Şekil 9' da sayısal modelleme sonucu elde edilen erozyon miktarlarının parçacık çarpma açısına göre değişiminin test verileriyle karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden görüldüğü erozyon oranının çarpma açısına göre değişimi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar test sonuçlarıyla çok uyumludur.





Şekil 9. Ti-6Al-4V titanyum alaşım malzemesi için erozyon miktarının parçacık çarpma açısına göre değişiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

Şekil 10'da erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre değişimlerinin test ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi test sonucu ile sayısal modelleme sonucunda elde edilen veriler iyi bir şekilde örtüşmektedir.



Şekil 10. Ti-6Al-4V alaşım malzemesi için erozyon miktarının parçacık çarpma hızına göre değişim sonuçlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

#### 4. Tartışma

Bu çalışmada kapsamında Ti-6Al-4V alaşımının katı parçacık erozyon davranışının farklı parçacık çarpma açıları ve parçacık çarpma hızlarında değişimi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Ti-6Al-4V alaşımında maksimum erozyon miktarı, 20°'deki çarpma açısında oluşmuştur.
- Erozyon miktarı zamana göre doğrusal artmıştır.
- Erozyon miktarı çarpma hızı artışına göre doğrusal olmayan bir şekilde ve önemli derecede artmaktadır.
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak katı parçacık erozyon davranışı başarılı bir şekilde modellenenmektedir.

## 5.Kaynaklar

- [1] Finnie, I., Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 1960, 3: 87–103.
- [2] Nsoesie, S., Experimental Investigation and Analytical Modeling of Solid-Particle Erosion Behavior of Stellite Alloys, Master Thesis, Carleton University, Canada. 2013.
- [3] Finnie, I., The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proc. 3<sup>rd</sup> U.S. National Congress of Applied Mechanics, 1958, 527-532.
- [4] Yerramareddy S., ve Bahadur S., Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, *Wear*, 1990, 142, 253-263.
- [5] Zhou J., ve Bahadur S., Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, *Wear*, 1995, 186, 332-339.
- [6] Ally, S., Abrasive Jet Micro-Machining Of Metals, Master Thesis, Ryerson University, Canada, 2010.
- [7] Avcu, E., Titanyum Alaşımının Partikül Erozyonu İle Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.
- [8] Shin, B. G., Prediction of Sand Particle Trajectories and Sand Erosion Damage On Helicopter Rotor Blades, Phd Thesis, The Pennsylvania State University, ABD, 2010.
- [9] Yıldırım, Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.
- [10] DNV, Erosive wear in piping systems, Recommend Practice, 2007, Germany.
- [11] Budur, A.İ., Katı Parçacıkların Metalik Yüzeylerde Oluşturduğu Erozyonun Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2018.