



# Effect of Particle Velocity and Impingement Angle on Inner Surface Erosive Wear Behavior of Basalt/Epoxy Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Technique

Seyit Mehmet DEMET<sup>1,\*</sup> Harun SEPETÇİOĞLU<sup>2</sup> Mehmet BAĞCI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Mechanical Engineering, 42250, Selçuklu/KONYA

<sup>2</sup>Selçuk University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 42075, Selçuklu/KONYA

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article  
Received: 7.09.2022  
Revision: 19.10.2022  
Accepted: 31.10.2022

### Highlights

- Solid particle erosion of composite pipe
- Filament winding basalt fiber reinforced composite pipe
- Erosion efficiency

### Keywords

Erosive wear  
BFR/EP  
Erosion resistance  
ASTM G76-96  
Composite pipe

In this study, erosion wear behavior of basalt fiber reinforced composite pipe in the variability of impingement angle and impact velocity was investigated. Considering the erosion efficiency, it has been determined that the wear model is composed in the form of semi-ductile material behavior.

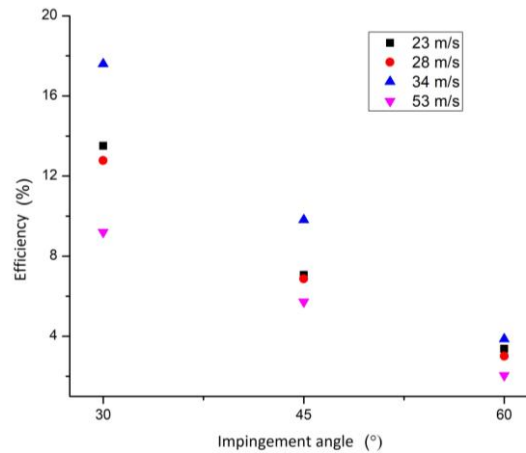


Figure A. Effect of impact velocity on erosion efficiency of BFR/EP composite pipes.

**Purpose:** In this study, it was aimed to examine the effect of impingement angle and impact velocity on erosion wear on the inner surface of the composite pipe.

**Theory and Methods:** An experimental study was carried out in the erosion wear test set, which is designed and manufactured in accordance with the ASTM G76-95 standard. Alumina was used as the abrasive particle in the tests. Abrasive particles were impacted on the test sample at four different impact velocities and three different impingement angles. As a result of the experimental study, the erosion rates were determined and the damaged areas on the inner surface of the pipe were examined.

**Results:** The erosion resistance of the composite pipes produced on the CNC filament winding machine has been examined for the first time in the literature. Particle impact velocity and impingement angle play an effective role in erosive wear. The highest erosion rate values were achieved at an impingement angle of 45° and an impact speed of 53 m/s.

**Conclusion:** As a result of the experimental study in which the axial particle flow in the pipe was simulated, it was observed that the increase in velocity decreased the erosion resistance and caused an increment in the erosive wear loss. It has been determined that the wear behavior on the inner surface of the composite pipe is compatible with the erosion wear model that occurs in semi-ductile materials.



## Effect of Particle Velocity and Impingement Angle on Inner Surface Erosive Wear Behavior of Basalt/Epoxy Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Technique

Seyit Mehmet DEMET<sup>1,\*</sup> Harun SEPETÇİOĞLU<sup>2</sup> Mehmet BAĞCI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42075, Selçuklu/KONYA

### Abstract

Composite materials find in many application areas, especially as an alternative to metal-based materials. In this experimental study, the use of Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFR/EP) composite pipes in the defense industry, maritime, infrastructure, and transmission facilities have been considered. For this purpose, Basalt Fiber Reinforcement (BFR), which also shows high chemical and thermal balance, high strength, temperature/electricity, and sound insulation properties, was preferred, and composite pipes were produced in  $[\pm 55]_4$  winding configuration on CNC filament winding machines with the addition of Epoxy (EP) matrix. Based on applications where as fluidized bed in the pipe, it is aimed to impinge the abrasive particles with different impact velocities by different impact angles in the direction of the flow in the pipe. To investigate the solid particle erosive wear behavior of the inner surface of the composite pipe  $\sim 600 \mu\text{m}$  abrasive particles with angular geometry used, which has impact velocities are 23/ 28/ 34/53 m/s, these velocities were also determined by using the double disc method. The impingement angles were determined as  $30^\circ/45^\circ/60^\circ$  at the test set complying with ASTM G76-95 standard. Experiments were repeated three times and the results were interpreted. It was concluded that the increase in the impact velocity of the particles decreases the erosion resistance on the inner surface of the pipe. It has been determined that the wear behavior on the inner surface of the composite pipe is compatible with the erosion wear model that occurs in semi-ductile materials.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 7.09.2022  
Düzeltilme: 19.10.2022  
Kabul: 31.10.2022

### Keywords

Erosive wear  
BFR/EP  
Erosion resistance  
ASTM G76-96  
Composite pipe

### Anahtar Kelimeler

Erozif aşınma  
BET/EP  
Erozyon direnci  
ASTM G76-96  
Kompozit boru

### Filament Sarım Bazalt / Epoksi Kompozit Boruların İç Yüzey Erozyon Direnci ve Çarpma Açısının Etkisi

### Öz

Kompozit malzemeler birçok alanda özellikle metal esaslı malzemelere alternatif olarak uygulama alanı bulmaktadır. Bu deneysel çalışmada Bazalt Elyaf Takviyeli Epoksi (BET/EP) kompozit boruların savunma sanayi, denizcilik, alt yapı ve aktarım tesislerinde kullanımı dikkate alınmıştır. Bu amaçla yüksek kimyevi ve ısıl denge, iyi mukavemet, sıcaklık/elektrik ve ses yalıtım özellikleri de gösteren Bazalt Elyaf Takviyesi (BET) tercih edilmiş olup Epoksi (EP) matris ilavesiyle CNC filament sarım makinelerinde  $[\pm 55]_4$  sarım konfigürasyonunda kompozit borular üretilmiştir. Boru içerisinde partiküllü akışın olduğu uygulamaların temelinde farklı hızlara sahip aşındırıcıların boru içerisindeki akış yönü doğrultusunda farklı açılarda çarpması amaçlanmıştır. Boru içi katı partikül erozyonunu araştırmak için, ASTM G76-95 standardıyla uyumlu deney setinde çift disk metodu kullanılarak belirlenen 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarındaki açısal geometriye sahip  $\sim 600 \mu\text{m}$  aşındırıcı partiküller,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  olmak üzere üç farklı çarpma açısında BET/EP kompozit boruların iç yüzeyine etki edecek şekilde tekrarlı deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar yorumlanmıştır. Partiküllerin çarpma hızındaki artışın boru iç yüzeyinde erozyon direncini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Kompozit boru iç yüzeyindeki aşınma davranışının yarı sünek malzemelerde oluşan erozyon aşınması modeli ile uyum sağladığı belirlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elyaf takviyeli kompozitler metalik malzemelere göre daha hafif, kullanılan elyaf özelliklerine göre farklı mukavemet özelliklerine sahip, farklı kullanım alanlarında daha uzun ömürlü bir performans sergilemektedir [1, 2]. Kompozit malzemelerin öne çıkan performans özellikleri sayesinde yakın dönem denizcilik, havacılık vb. sahalarda metal esaslı malzemelere göre tercih sebebi olmaktadır [3, 4]. Bu sektörlerle birlikte altyapı [5, 6] ve iletim tesislerinde kullanılan beton ve metal esaslı boruların iletim sürecinde aşınma, korozyona uğrama gibi sebeplerden dolayı bozulup hasara uğramaları bu alanlarda da kompozit malzeme kullanımını tercih sebebi yapma potansiyelindedir [7]. Kent içi su iletim ve dağıtım tesislerinde, kanalizasyon sistemlerinde, kimya sanayi için gerekli depolama ve malzeme aktarımı süreçlerinde kompozit malzemeden imal edilen borular için kullanım alanı bulunmaktadır [8-11].

Kompozit malzemelerde takviye malzemeler kompozitin özelliklerine etki etmekte ve kullanım alanına uygun özelliklere sahip bir yapı oluşturulmasına imkân vermektedir. Saha uygulamalarında yaygın olarak cam elyaf takviyeli, karbon elyaf takviyeli çalışmalar görülmektedir. Bunlarla birlikte farklı takviye malzemeleri kullanılarak üretilen kompozitler ile ilgili araştırma çalışmaları yapılmaktadır [12-14]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kompozitlerin mukavemet özellikleri, işlenebilirliği, aşınma davranışları gibi birçok özelliklerinin araştırıldığı görülmektedir ve genellikle plaka şeklinde üretilen malzemeler kullanılmaktadır [15-21].

Bu çalışmada kompozit malzemelerin boru imalat uygulamalarında da kullanıldığı dikkate alınarak erozif ortamda bulunabilecek kompozit borunun tribolojik davranışı araştırılmıştır. Takviye elemanı olarak bazalt elyaf kullanılmıştır. Bazalt elyaf yüksek kimyevi ve ısıya dayanıklı, yüksek ısı ve elektrik yalıtımı gibi önemli özelliklere sahiptir. Bazalt elyaflar hava ve su ile reaksiyona girmemektedir ve  $-230^{\circ}\text{C}$  ile  $+700^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında kullanılabilir özelliğine sahiptir. Bu özelliklerinin yanı sıra yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direncinin getirdiği tribolojik avantajları bulunmaktadır [22, 23]. Bu sebeplerden dolayı bazalt elyaf takviyeli epoksi boruların iletim hatlarında kullanılabileceği durum dikkate alınarak boru içi katı partikül akışı deneysel ortamda simüle edilerek boru iç yüzeyinde oluşabilecek aşınma hasarları araştırılmıştır.

Bu amaçla yapılan deneylerde dört farklı çarpma hızının sabit aşındırıcı partikül etkisi ve üç farklı çarpma açısındaki erozif aşınma durumu kompozit borunun iç yüzeyinde incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Deney Malzemesi (Test Material)

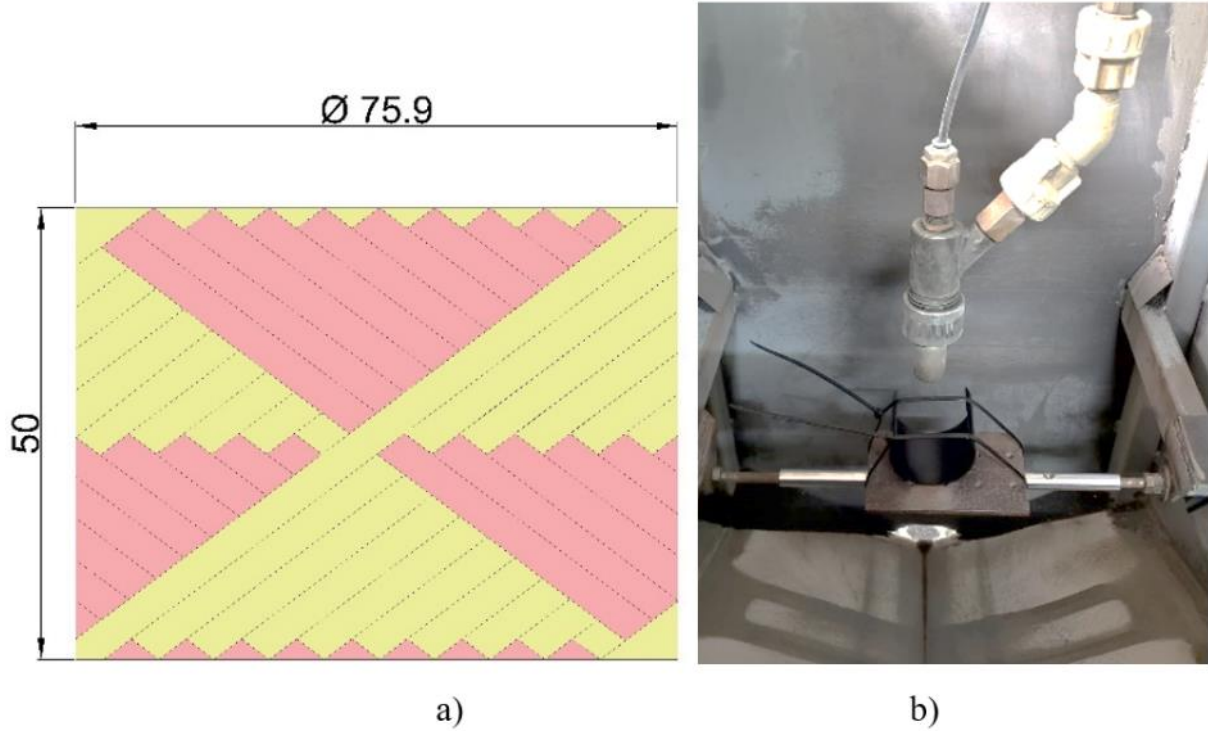
Üretilen kompozit borularda  $13\ \mu\text{m}$  ve  $1000\ \text{m}$  elyaf uzunluğu  $400\ \text{gram}$  olan monofilament bazalt lifleri kullanılmıştır. Filament sarım yöntemi kullanılarak imal edilen kompozit borularda Bisphenol-A epoksi reçine (ticari adı EPIKOTE™ 828 LVEL) ve anhidrit bazlı kürleme ajanı (ticari adı EPIKURE™ 866) tercih edilmiştir. Kullanılan elyaf ve epoksi reçineye ait mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Bazalt elyaf ve reçinenin özellikleri.

	Elastisite ModülüE, GPa	Çekme Mukavemeti $\sigma$ , MPa	Yoğunluğu $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>
<b>Bazalt Elyaf</b>	90-95	2900-3200	2.48
<b>Epoksi Reçine</b>	3.2	70-75	1.25

Filament sarım yöntemi kullanılarak bazalt elyaflar  $10\ \text{N}$  elyaf gerilimi, ortalama  $11\ \text{mm}$  bant genişliğinde ve  $[\pm 55]_4$  sarım konfigürasyonunda CNC filament sarım makinesinde üretilmiştir. Kompozit borular İzoreel kompozit yalıtım malzemeleri Ltd. (İzmir, Türkiye) şirketine ait tesiste üretilmiştir. Kompozit borular  $1.85\ \text{mm}$  et kalınlığına ve  $72.2\ \text{mm}$  dış çapa sahip  $1\ \text{m}$  uzunluğundaki mandrel üzerine helisel olarak sarılmıştır. Filament sarım işlemi tamamlandıktan sonra kompozit borular yatay döner fırında önce

120°C’de 3 saat kürlenmiş ve nihai olarak 140°C’de 3 saat kürleme (post-cure) işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan borular 50 mm uzunluğunda kesilerek deney setine uygun ölçüye getirilmiştir (Şekil 1.a). Deney numunelerinin deney setine montajı Şekil 1.b’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Deneysel numune tasarımı; a) Boruların sarım konfigürasyonu (ölçüler mm’dir), b) Deney seti konumu.

Üretilen boruların mekanik özellikleri halka çekme ve sertlik ölçümü testleri ile belirlenmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

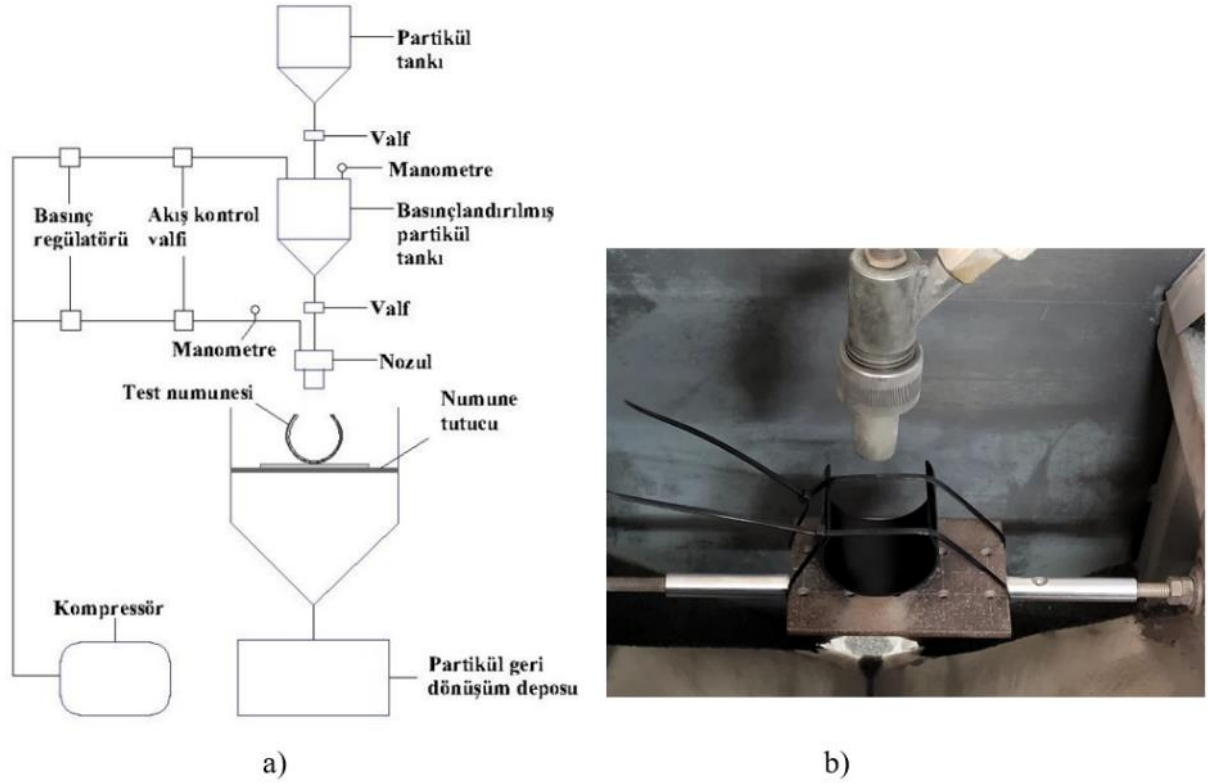
**Tablo 2.** BET/EP kompozit boruların mekanik özellikleri

Halka Çekme Testi		Sertlik Testi	
<b>Standart</b>	ASTM D2290	<b>Standart</b>	ASTM D785
<b>Test hızı (mm/dk)</b>	5	<b>Skala</b>	HRL
<b>Çekme mukavemeti (MPa)</b>	689.3±46.9	<b>Sertlik değeri</b>	115.6±4.2

## 2.2. Deney Tesisatı (Test Setup)

Erozyon aşınması testlerinde katı partikül erozyon aşınması testi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da deneyler Şekil 2’de bileşenleri ile birlikte şematik resmi verilen ve ASTM G76-95 standardına uygun olarak tasarlanıp imal edilen erozyon aşınması deney setinde yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan aşındırıcı partiküller öncelikle “Partikül tankı”na eklenmiş olup ardından “Basınçlandırılmış partikül tankı”na sevk edilip test numunesi üzerine belirlenmiş olan hız ile çarptırılmaktadır. Deney seti üzerinde bulunan “Numune tutucu” elemanın açılmal konumunda yapılan değişiklikler sayesinde de farklı açılarda test yapabilmek imkânı bulunmaktadır.



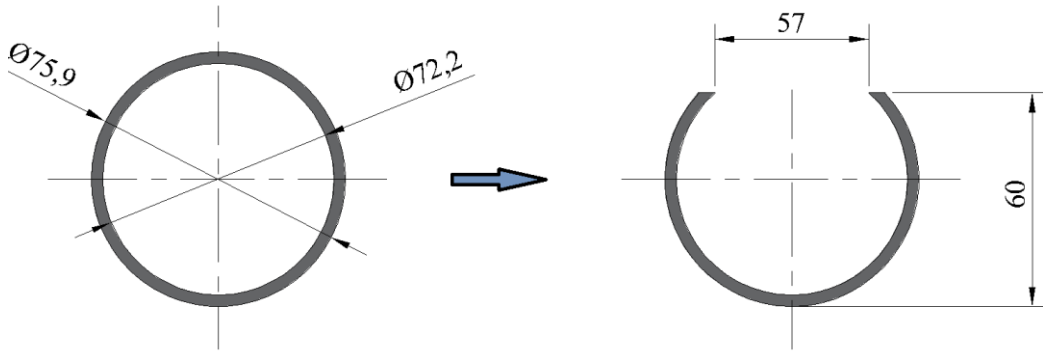
**Şekil 2.** Deney tesisi; a) Bileşenlerin detaylı şematik gösterimi, b) Kompozit borunun deney setindeki pozisyonu.

Kompozit boruların iç yüzeyindeki partikül akışına bağlı olarak eroziv aşınma etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşındırıcı partikülün farklı hız ve açılarda boru iç yüzeyinde oluşturduğu tribolojik etki incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan parametrik veriler Tablo 3’de belirtilmiştir.

**Tablo 3.** Deney parametreleri.

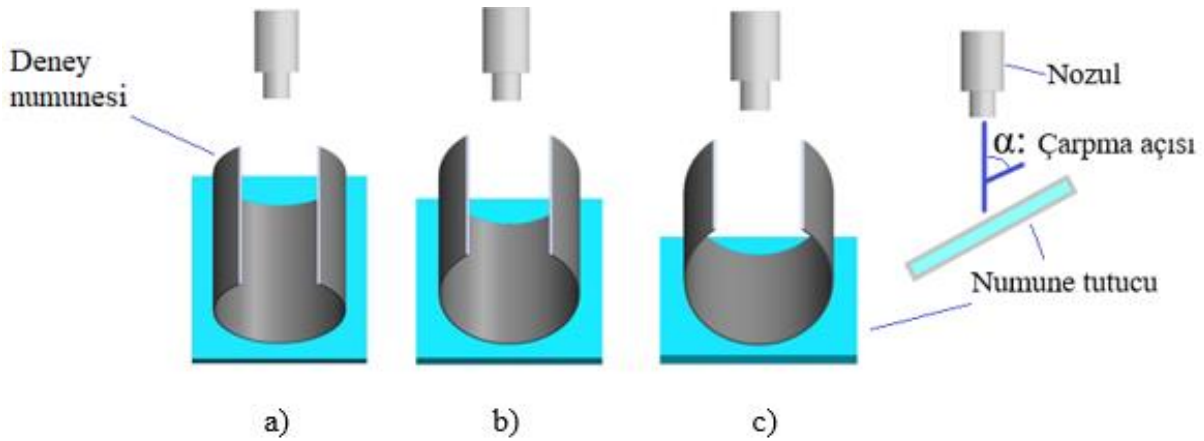
Deney parametresi	Tanımlama
Aşındırıcı	Alümina ( $Al_2O_3$ )
Aşındırıcı boyutu	600 $\mu m$
Partikül çarpma açıları	$30^\circ/45^\circ/60^\circ$
Partikül çarpma hızları	23/28/34/53 m/s
Ortam sıcaklığı	20–22 $^\circ C$
Nozul-Deney numunesi arası mesafe	10 mm
Nozul çapı	6 mm

Farklı açılarda etki ettirilen partiküllerin boru içi akışında sabit nozul mesafesini koruyabilmek için kompozit boru Şekil 3’ de gösterildiği gibi kesilip numune tutucu üzerine yerleştirilerek tüm deneyler aynı şartlar altında yapılmıştır.



Şekil 3. Kompozit borunun kesilme işlemi sonrası deney numunesi (ölçüler mm'dir).

Şekil 4'de şematik olarak gösterildiği gibi yaklaşık 600 µm ortalama boyutundaki alümina aşındırıcı partiküller 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarında ve 30°, 45° ve 60° çarpma açılarında boru içerisine etki ettirilmiştir. Deneylerde partikül hızlarının belirlenmesinde çift disk metodu kullanılarak deney setinde çarpma hızı ayarlaması basınç değişiminin hız etkisi paralelinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Deney numunelerinin numune tutucudaki açısal konumları; a) 30°, b) 45°, c) 60°.

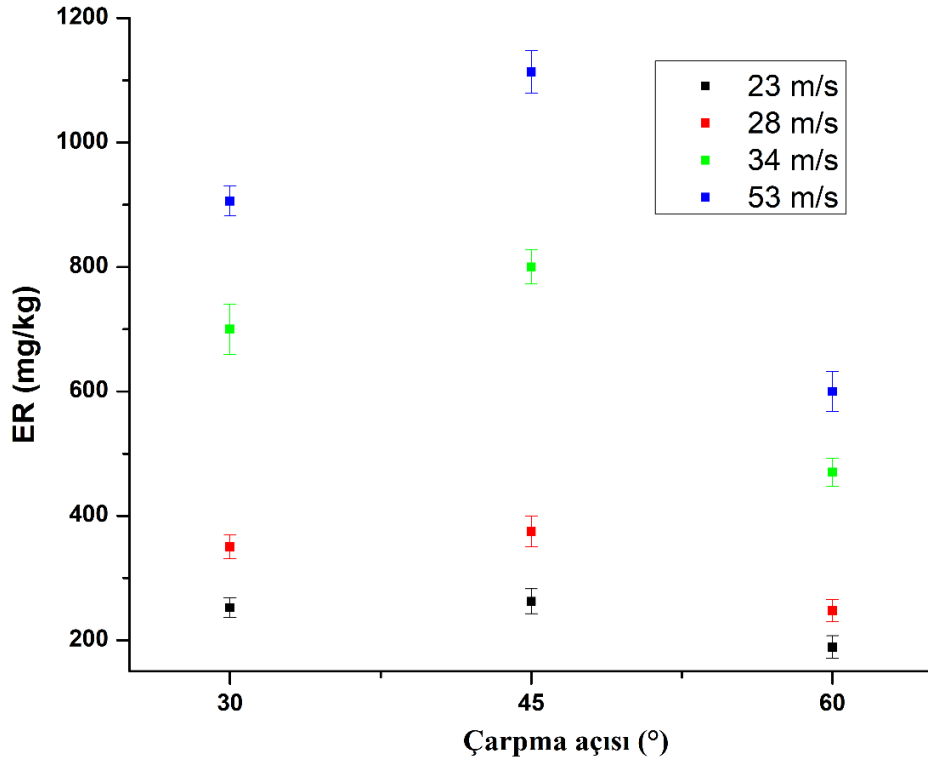
Deneyel çalışmalar sonucunda boru içi erozyon hasarını incelemek için Erozyon oranı (ER) dikkate alınmıştır. Deney numuneleri test öncesi ve test sonrası  $10^{-4}$  gr hassasiyete sahip hassas terazide tartılarak boru da oluşan ağırlık kayıpları ( $\Delta W$ , mg) belirlenmiş ve aşındırıcı miktarı ( $Q_p$ , kg) ile oranı dikkate alınarak yorumlanmıştır. Erozyon oranı aşağıdaki eşitlik (1) ile belirlenmiştir.

$$ER = \frac{\Delta W}{Q_p} \text{ (mg/kg)} \quad (1)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

BET/EP kompozit borudan hazırlanan deney numunelerinin erozyon testleri ortalama 600 µm çap değerindeki açısal geometrik forma sahip aşındırıcı partiküller ile farklı çarpma hızları ve çarpma açılarında yapılmıştır. Partikül çarpma hızları 23, 28, 34 ve 53 m/s olarak belirlenmiştir. Çarpma açıları ise 30°, 45° ve 60° olacak şekilde belirlenmiş ve kompozit boru iç yüzeyi erozif aşınmaya tabi tutulmuştur. BET/EP kompozit boruların iç yüzeylerinde çarpma hızı ve çarpma açlarına bağlı olarak aksenal doğrultuda elde edilen erozyon direncine ait karşılaştırmalı sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 5).





**Şekil 5.** BET/EP kompozit boruların hız etkisine bağlı açı-erozyon oranı değişimleri.

Şekil 5’deki grafik aşındırıcı partiküllerin çarpma açısındaki değişimine bağlı olarak çarpma hızının erozyon oranına etkisini doğrudan ortaya koymaktadır. Deney seti yetenekleri arasında tanımlanan ve çift disk metodu ile belirlenen çarpma hızlarının değişiminin etkisi deneylerde incelenmiştir. Grafiklerdeki her bir noktanın belirlenebilmesi için üç farklı deney yapılmış olup bu deneylerin değişken sonuçları hata çubukları ile grafikte sunularak çarpma açısı ile erozyon oranı değişimine ait grafikler oluşturulmuştur.

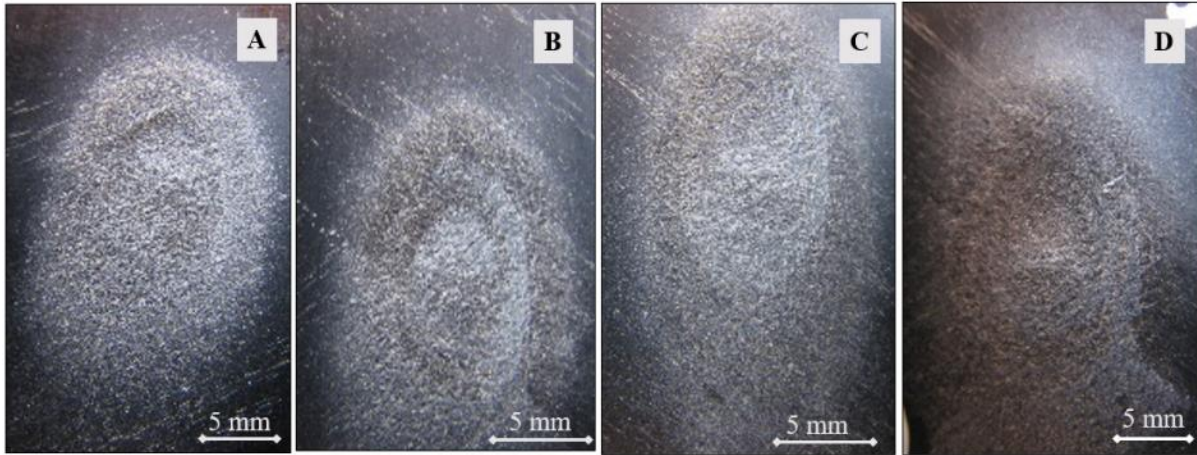
Erozif aşınma üzerine yapılan çalışmalarda deney numunelerinden elde edilen erozyon oranı çarpma açısı grafiklerinden deneylerde kullanılan malzemeler hakkında sünek, yarı sünek ve gevrek özellik sergilediği yorumu yapılmaktadır. Bu yoruma aşındırıcı partikül çarpma hızının ve açısının, aşındırıcı partikül boyutunun, sertliğinin, şeklinin, tipinin ve akış debisinin önemli etkisi bulunmaktadır [24-27].

Erozyon oranının maksimum seviyeye ulaşmasında malzeme özelliğini belirleyen 15°–30°, 45°–60° ve 90° çarpma açılarında elde edilen en üst değerler sırasıyla çarpma açısına bağlı olarak sünek, yarı sünek ve gevrek özellikte malzeme tanımını oluşturmaktadır. Bu deneysel çalışmada ise bazalt elyaf etkisi yarı sünek malzeme davranışı etkinliğine katkı sağlamıştır [28-30]. Sonuç olarak bazalt elyafın özellikle endüstriyel yaygınlığı olan cam elyaf takviyesine göre daha mukavemetli olması, erozyon direncini geliştirerek erozif aşınma dayanımına olumlu katkı sağladığı şeklinde yorumlanmıştır.

Şekil 5 detaylandırıldığında gözümüze çarpan ve saha kullanımına etki etmesi ve veri aktarımına katkı sağlaması hedeflenen temel bir çıktı da çarpma hızlarındaki değişimin erozyon oranında sağladığı etkiyi oransal değişkenlikle karşılamaması olmuştur. Yani çarpma hızındaki 23, 28, 34 ve 53 m/s değerleri deney seti üzerinde tanımlanan “Basınç regülatörü” vasıtasıyla “Akış kontrol valfleri” özelinde “Manometre” ile sonuçlanan ayarlamalar vasıtasıyla temelde 1, 1.5, 2 ve 3 bar değerleri ile ayarlanan basınçların çift disk metodunda karşılıkları belirlenmiştir. Çarpma hızındaki yaklaşık %25, %50 ve %100 oranlarında gerçekleştirilen artışlar sonunda 23 m/s hız ve 45° çarpma açısındaki deneyler referans alınarak deneylerde kullanılan 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarındaki erozyon oranlarının artışı sırasıyla %44.2, %203.9 ve %330.6 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

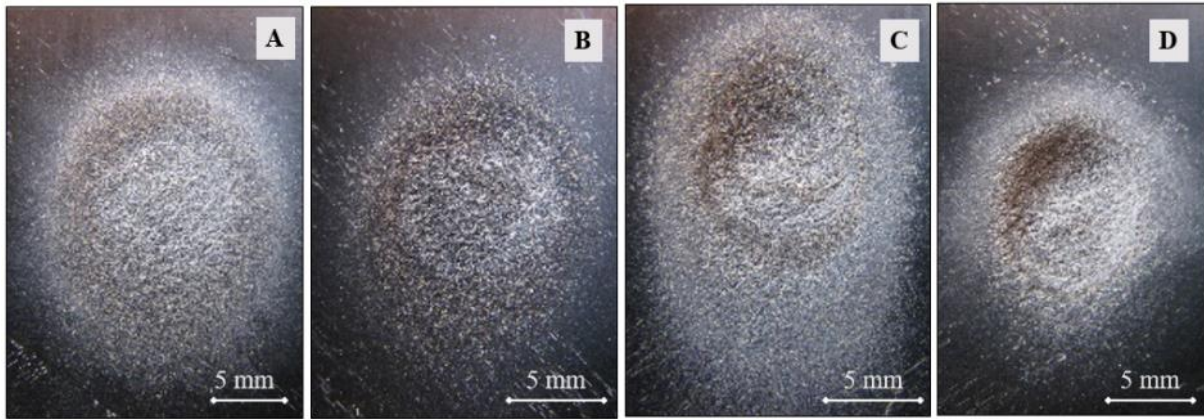
Sonuçların optik mikroskop görüntüleri ile desteklenerek yorumlanması aşamasında ise çarpma açısının farklılığının BET/EP kompozit boru deney numunelerindeki etkileri Şekil 6, 7, 8 ve 9’da detaylandırılarak farklı çarpma hızlarına ait aşındırılan bölgeler özellikle karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Şekil 6’de 30° çarpma açısı özelinde dört farklı çarpma hızına ait aşınmış yüzeylerin erozif aşınma sonucundaki yüzeysel değişimlerine ait farklılıklar değerlendirildiğinde çarpma açısının önemi yanında bu açı için hız

etkisindeki baskınlık ciddi seviyelerde gerçekleşerek yüzeyden koparılan bazalt elyaf ve epoksi kaybını gözler önüne serecek seviyede gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.



**Şekil 6.** 30° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

Şekil 7 oluşturulurken bu deneysel çalışmanın temel farkındalığını oluşturan çarpma açısına odaklanılmış olup yani 45° çarpma açısındaki 23, 28, 34, 53 m/s çarpma hızlarına ait aşınma sonucunda deformasyon etkisi gözlemlenen yüzeylerdeki koparılan deney numuneleri kıyaslamaları üzerine odaklanılmıştır. Gözle görülebilen ve stereo mikroskop görüntüleri ile elde edilen farklılıklar değerlendirildiğinde çarpma açısının malzeme davranışı üzerine etkisinin de ortaya çıkması şeklinde yorumlanmıştır. Yani literatür uyumluluğundaki seviye açısından yapılan değerlendirmede erozyon oranını artırması sonucunda yarı sünek malzeme etkisinin oluşmasına sebep olan 45° çarpma açısı önemi net olarak ortaya konulmuştur. Açısız etki yanında hız etkisi tekrar rolde artış etkisini baskın moda ortaya koyarak hız artışı eroziv aşınmayı hızlandırmakla birlikte hızlarda meydana gelen artışın oransal boyutun (23-28 m/s dönüşümü ile 34-53 m/s dönüşümü bu sonuca örnek olarak verilebilir) çok daha üzerinde yüzeylerden malzeme koparma etkisini sağladığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.

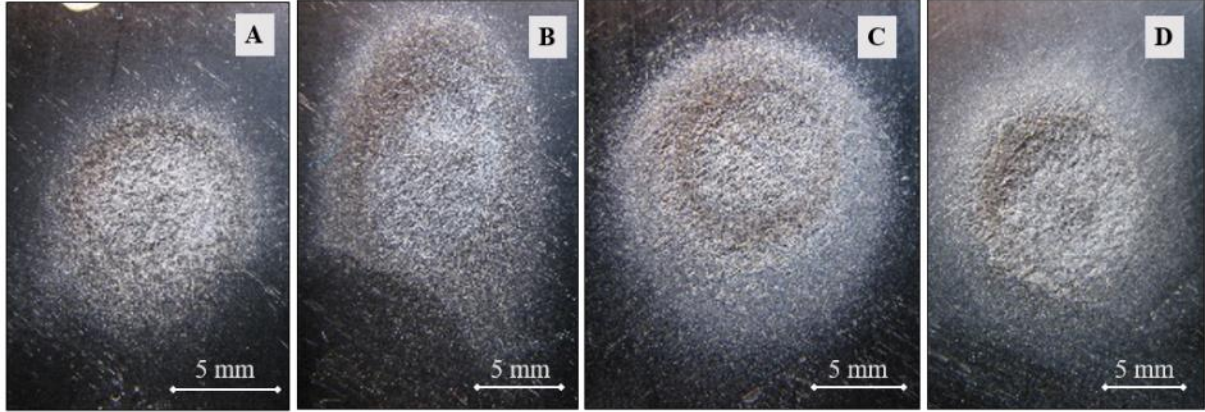


**Şekil 7.** 45° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

Özellikle aşındırıcı partikül çarpma hızındaki etkinin üzerine odaklanılan bu deneysel çalışmada üç çarpma açısından ulaşılan sonuç göstermiştir ki 45° açının 60° açığa dönüşümü sonunda ortaya çıkan etki, yarı sünek malzeme sergileme rolünün baskınlaştırılarak 60° çarpma açısında minimum erozyon oranının ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır. Bu sonuç mikroskop görüntülerine de yansımış olup yüzeyden koparılan bazalt elyafı epoksi malzemelerin koparılmasındaki azalmayla ortaya çıkmıştır. Özellikle 34 ve 53 m/s gibi 23 ve 28 m/s hız etkisine göre daha net yüzeysel koparma etkisinde bu farklılık daha belirleyici seviyelerde ortaya çıkmış olup Şekil 8 detayları da belirtilen farklılığı destekleyecek görsellere etki etmiştir. Yapılan deneylerden varılan nokta değerlendirildiğinde kompozit boru deney numunelerindeki yarı sünek malzeme

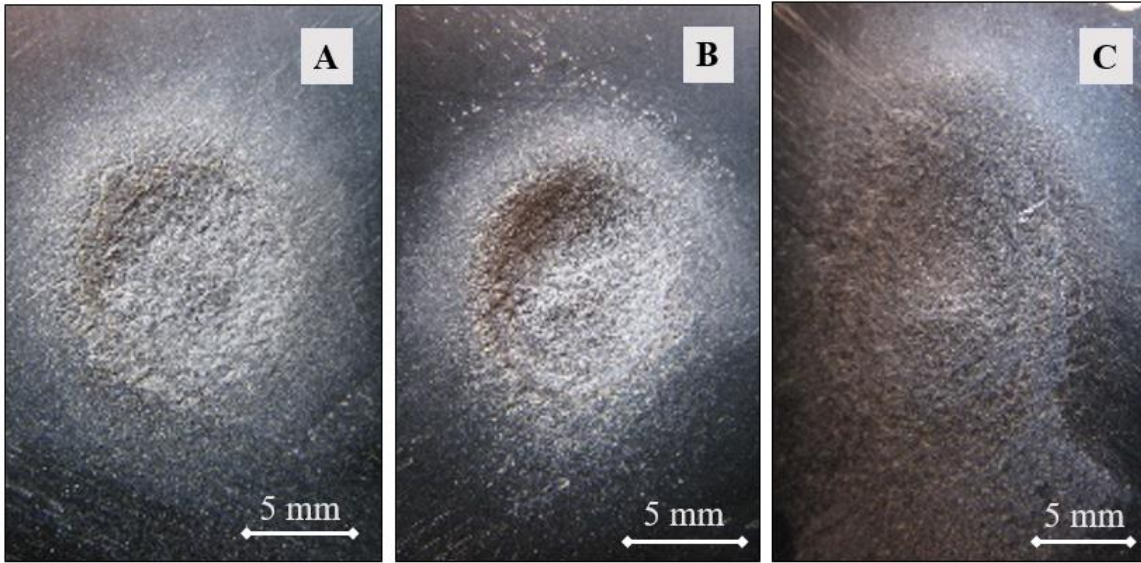


etkisi gösterme etkinliği açısız dönüşümde ispatlandığı için 90° çarpma açısında deney yapmaya doğrudan gerek duyulmamış ve deneysel süreç belirtilen açılarla sınırlanmıştır.



**Şekil 8.** 60° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

Dört farklı çarpma hızı etkisindeki erozyon oranlarının değişimlerinin verildiği Şekil 5 incelenerek en baskın farklılıkların gözlemlendiği 53 m/s aşındırıcı partikül çarpma hızına sahip deneyler sonunda en geniş aşınmış yüzey alanına sahip olan deney numunelerinin 45° çarpma açısında olduğu Şekil 9’de verilen stereo mikroskop görüntüleri ile tekrar ortaya konulmuştur. Bu etkinin ve sonucun ortaya çıkmasında 45° çarpma açısının kosinüs bileşenine bağlı olarak daha yüksek bir yüzey kazıma etkisinin oluşmasının rol oynadığı şeklinde yorumlanmıştır.



**Şekil 9.** Çarpma hızının 53 m/s olduğu farklı açılarının aşınmış yüzeyleri; a) 60°, b) 45°, c) 30°

Deneysel sonuçların grafik üzerine aktarılması yanında optik mikroskop görüntülerine ait elde edilen destekleyici tüm veriler sonucunda çarpma açısı ve partikül hızının erozyon verimliliği üzerine etkisinin boyutunun da belirlenmesi amaçlanarak aşağıdaki yol haritası izlenmiştir.

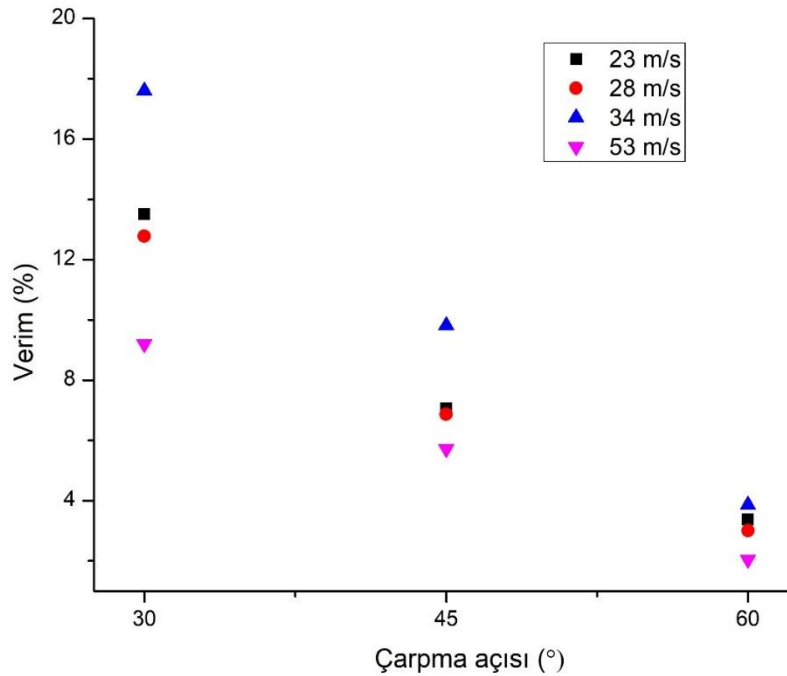
Katı partikül erozyon aşınması sonucunda aşındırılan malzemenin verimliliği malzemeye ait aşınma modelinin kırılmalı bir aşınma modeli mi yoksa sünek bir aşınma modeli olduğunu belirlemede kullanılan bir terimdir [31, 32]. Erozyon aşınmasında verim [33];

$$\eta = (2 * E * H) / (\rho * v^2 * \sin^2\alpha) \quad (2)$$

eşitliği kullanılarak belirlenmektedir. Bu eşitlikteki; E: erozyon oranı (mg/kg), H: kompozit deney numunesinin sertliği (Pa),  $\rho$ : kompozit deney numunesinin yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>), v: aşındırıcı partikülün çarpma hızı (m/s) ve  $\alpha$ : çarpma açısıdır (°).

Yüzeyden herhangi bir kırılma olmaksızın parça ayrılmasının gerçekleştiği durum için sıfır erozyon verimliliği ifadesi kullanılmakla birlikte aşındırıcı kazınmasına bağlı olarak kırılma etkisinin gözlemlendiği erozyon verimliliğinde % 0–6 aralığı sünek davranışı, % 6–40 aralığı ise yarı sünek davranış olarak tanımlanır [34].

Şekil 10'daki grafik (2) numaralı eşitlik kullanılarak oluşturulmuş olup 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarının verimlilik karşılaştırması üzerine yapılan karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda erozyon verimliliğine doğrudan ve belirleyici etkilerin 34 ve 53 m/s çarpma hızları önceliğinde gerçekleştiği belirlenerek bu sonucun çarpma hızları özelinde erozyon direncine doğrudan etkisi olarak yorumlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki numune yüzeyinden ayrılmaların, aşındırıcı partikül çarpma hızında değişimin belirleyici olduğu hızlarda gerçekleşmesi gayet anlamlı bulunarak yüksek hız etkisinde kırılmadan ziyade gömülme rolündeki baskınlıkla bağlantılı olarak verimlilik seviyesi düşük gerçekleşmiştir. 34 m/s'deki yüksek oran ise hızın nispeten daha düşük olması ile birlikte partikül etkisi yüzeye gömülmeden ziyade kırılma ve koparma rolüyle özdeşleşerek verimliliği yükseltmiştir.



Şekil 10. BET/EP kompozit boruların erozyon verimliliğine çarpma hızının etkisi.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Katı partikül erozyon aşınmasının boru iç yüzeyinde oluşturduğu etkinin çarpma hızı ve çarpma açısı değişimi özelinde sorgulandığı deneysel içeriğe sahip bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- CNC filament sarım makinesinde üretilen  $[\pm 55]_4$  yönelimli BET/EP kompozit boruların iç yüzey aşındırıcı temasına gösterdikleri direnç literatürde ilk kez boru uygulaması özelinde irdelenmiştir.
- Parametrik veri özeli değerlendirildiğinde bazalt elyaflar için 10 N elyaf gerilimi, ortalama 11 mm bant genişliği ve  $[\pm 55]_4$  sarım konfigürasyonu önceliklendirilmiştir.
- Boru içi eksenel partikül akışının simüle edildiği deneysel çalışma sonucunda hız artışının erozyon direncini azalttığı ve erozif aşınma kaybında artışa sebep olduğu görülmüştür.
- Çarpma açısındaki değişime ait veriler incelenerek literatürde de yarı sünek aşınma olarak tanımlanan forma uygun bir BET/EP kompozit boru iç yüzey erozif aşınması modeline ulaşıldığı belirlenmiştir.

- Erozyon verimliliğinde ise belirleyici etki 34 ve 53 m/s çarpma hızlarında gerçekleşmiş olup 34 m/s hızda deney numunesi yüzeyine gömülmeden ziyade kırılma ve koparma rolü baskınlaşarak verimliliği yükseltmiştir.
- Çarpma açısı ve çarpma hızının etkinliğinin aşınmış kompozit boru yüzeylerine ilişkin farklılıkları özelindeki kıyaslamada ise yarı sünek malzeme etkinliği sergileme rolü numunelerde özellikle ispatlanarak 45°'nin önemi yanında 53 m/s anlamlılığı üzerine stereo mikroskop görüntülerinin belirleyici sonuçlar ortaya koyduğu yorumları yapılmıştır. Görüntüler özellikle hız etkinliğinde ve açısal olarak bazalt elyafların epoksi matriste oluşturduğu çatlama, kırılma, gömülme ve kopma etkileri özelinde detaylıca sorgulanmış ve destekleyici aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gonabadi, H., Olia, A., Yada, A., Bull, Steve. (2022). Fatigue life prediction of composite tidal turbine blades. *Ocean Engineering*, 260, 111903.
- [2] Fenner, J.S., Daniel, I.M.(2014). Hybrid nanoreinforced carbon/epoxy composites for enhanced damage tolerance and fatigue life. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 65, 47-56.
- [3] Meng, F., Cui, Y., Pickering, S., McKechnie. (2020). From aviation to aviation: environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108362.
- [4] Mieloszyk, M., Majewska, K., Ostachowicz, W. (2021). Application of embedded fibre bragg grating sensors for structural health monitoring of complex composite structures for marine applications. *Marine Structures*, 76, 102903.
- [5] Abedi, M., Fanguero, R., Correia, A.G. (2021). A review of intrinsic self-sensing cementitious composites and prospects for their application in transport infrastructures. *Construction And Building Materials*, 310, 125139.
- [6] Chen, M., Weng, Y., Semple, K., Zhang, S., Jiang, X., Ma, J., Fei, B., Dai, C. (2021). Sustainability and innovation of bamboo winding composite pipe products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 144, 110976.
- [7] Luo, S., Wei, J., Xu, W., Chen, Y., Huang, H., Hu, J., Yu, Q. (2022). Design, preparation, and performance of a novel organic-inorganic composite coating with high adhesion and protection for concrete. *Composites Part B: Engineering*, 234, 109695.
- [8] Durmuşçelebi, F.M., Özdemir, Ö., Fırat, M. (2021). İçme suyu dağıtım sistemlerinde sızıntı yönetimi ve şebeke rehabilitasyonu için fayda maliyet analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 660-668.
- [9] Türkkkan, G.E., Atakul, F. (2020). İçme suyu şebeke hattının farklı boru tipleri için tasarımı ve maliyeti: erzurum ili horasan ilçesi örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1521-1532.
- [10] Zheng, Y., Sun, D., Feng, Q., Peng, Z. (2022). Nano-Sio2 modified basalt fiber for enhancing mechanical properties of oil well cement. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 128900.
- [11] Sepetcioglu, H. (2021). Experimental study on the effect of graphene nanoplatelets on the low-velocity impact response of prestressed filament wound basalt-based composite pressure vessels. *Polymer composites*, 42(10), 5527-5540.
- [12] Demircan, G., Mustafa, Ö., Murat, K. (2020). Flexural properties of glass fiber reinforced epoxy composites at different strain rates. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 22(64), 271-276.

- [13] Karaçor, B., Özcanlı, M. (2022). The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 439-448.
- [14] Imrek, H., Demet, S.M. (2014). Experimental investigation of wear behaviors of bronze and carbon-reinforced polytetrafluoroethylene alloy pivot pin bearings. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 228(10), 1187-1194.
- [15] Maslavi, A., Hüseyin, Ü., Yetgin, S.H. (2022). Karbon fiber takviyeli grafit ve ptfе katkılı poli-eter-eter-eton (peek) polimer kompozitin tribolojik performanslarına kayma hızının etkisinin belirlenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 457-467.
- [16] Yetgin, S., Çolak, M. (2020). Grafit katkılı polipropilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal Of Science And Engineering*, 7(2), 649-658.
- [17] Yenigün, B., Kılıçkap, E. (2020). Ketp kompozitlerin delinmesinde delme parametrelerinin çekme kuvvetine etkisinin varyans analizi ile incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 215-223.
- [18] Şimşek, İ., Şimşek, D., Özyürek, D. (2020). Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda sic takviyeli a356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*.
- [19] Karakurt, N.F., Sağbaş, A. (2020). Tepki yüzeyi tasarımı ve yapay sinir ağları yaklaşımı uygulanarak epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma dayanımının tahmini ve modellenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1325-1344.
- [20] Vahdettin, K., Demirel, M. (2019). Epoksi reçine-Mgo polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi ve pin on disk abrasiv aşınma özelliklerinin incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 1-10.
- [21] Gökçe, N., Şevki, E., Subaşı, S. (2020). Hibrit polimer matrisli ve cam lifi takviyeli polimer kompozitlerin çekme özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8(4), 872-883.
- [22] Chen, C., Liu, X., Zhou, Q.Q., Ma, Y.Y. (2022). Effect of basalt fiber on the thermal conductivity and wear resistance of sintered wc-based diamond composites. *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 105, 105829.
- [23] Balaji, K.V., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A.V., Naebe, M. (2020). Surface treatment of basalt fiber for use in automotive composites. *Materials Today Chemistry*, 17, 100334.
- [24] Arslan, G., Fidan, S., Sinmazcelik, T. (2018). Solid particle erosion behavior of carbon fiber-metal wire hybrid reinforced polymer composites. *Journal Of Science And Engineering*, 5(1), 182-190.
- [25] Maity, P., Sarkar, B. (2020). An exploratory analysis for erosion wear behavior of filler materials of hybrid composites: a de novo approach. *Measurement*, 166, 108232.
- [26] Yadav, R., Lee, H.H., Meena, A., Sharma, Y.K. (2022). Effect of alumina particulate and e-glass fiber reinforced epoxy composite on erosion wear behavior using taguchi orthogonal array. *Tribology International*, 107860.
- [27] Bağci, M. (2016). Determination of solid particle erosion with taguchi optimization approach of hybrid composite systems. *Tribology International*, 94, 336-345.
- [28] Cai, F., Zhang, Y., Wang, J., Zheng, J., Wang, Q., Zhang, S. (2021). Improved adhesion and erosion wear performance of crsin/cr multi-layer coatings on ti alloy by inserting ductile cr layers. *Tribology International*, 153, 106657.

- [29] Wang, Y.F., Yang, Z.G. (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, 265(5-6), 871-878.
- [30] Desale, G.R., Gandhi, B.K., Jain, S. (2006). Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials. *Wear*, 261(7-8), 914-921.
- [31] Jena, H., Pradhan, A.K., Pandit, M.K. (2018). Study of solid particle erosion wear behavior of bamboo fiber reinforced polymer composite with cenosphere filler. *Advances In Polymer Technology*, 37(3), 761-769.
- [32] Harsha, A., Thakre, A.A. (2007). Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites. *Wear*, 262(7-8), 807-818.
- [33] Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S., Dash, R.R. (2009). Tribo-performance of polyester hybrid composites: damage assessment and parameter optimization using taguchi design. *Materials & Design*, 30(1), 57-67.
- [34] Arjula, S., Harsha, A. P. (2006). Study of erosion efficiency of polymers and polymer composites. *Polymer Testing*, 25(2),188-196.