

Grafen Nanoplaka Katkılı Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların İç Yüzey Eroziyon Direncinde Aşındırıcı Partikül Hızının Rolünün İncelenmesi

Seyit Mehmet DEMET*¹ ORCID 0000-0002-9795-0939

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya

Geliş tarihi: 05.10.2023

Kabul tarihi: 25.12.2023

Atıf şekli/ How to cite: DEMET, S.M., (2023). Grafen Nanoplaka Katkılı Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların İç Yüzey Eroziyon Direncinde Aşındırıcı Partikül Hızının Rolünün İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 907-915.

Öz

Bu çalışmada $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda filament sarım tekniği ile imal edilen iki farklı kompozit borunun boru içi malzeme akışının olduğu alt yapı ve malzeme aktarım uygulamalarında eroziyon aşınmaya maruz kalabilecek boru iç yüzeyinin erozyon davranışı dikkate alınarak araştırılmıştır. Bazalt elyaf takviyeli kompozit boru (BETKB) ile ağırlıkça %0,25 grafen nanoplakalar ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların (GNP/BETKB) katı partikül erozyon davranışları yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Dört farklı çarpma hızında (23 m/s, 28 m/s, 34 m/s, 53 m/s) ve üç farklı çarpma açısında (30°, 45°, 60°) alümina aşındırıcı partiküller boru iç yüzeyine çarptırılarak elde edilen erozyon oranı değerlendirildiğinde grafen nanoplaka takviyesinin bazalt elyaf takviyeli boruda erozyon aşınmasına karşı direnci artırdığı görülmüştür. Erozyon oranının oransal değişiminin de incelendiği grafiklerde de sunulduğu üzere 28 m/s çarpma hızında %50'ye yakın bir erozyon oranı azalımı grafen nanoplaka takviyesi sayesinde elde edilmiştir. Her iki borunun aşınma modelinin yarı sünek aşınma modeline uygun bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filament sarım tekniği, Erozyon aşınması, Grafen nanoplaka takviyeli kompozit boru

Investigation of the Role of Abrasive Particle Velocity on the inner Pipe Surface Erosive Wear Resistance of Composite Pipes Reinforced with Basalt Fibre and Graphene Nanoplatelets

Abstract

In this study, two different composite pipes manufactured with filament winding technique in $[\pm 55]_4$ winding configurations were investigated by considering the erosive behaviour of the inner surface of the pipe which may be subjected to erosive wear in substructure and material transfer applications where may be worn because of material flow. The solid particle erosion behaviour of basalt fibre reinforced composite pipe (BETKB) and basalt fibre reinforced composite pipes reinforced with 0.25 wt % graphene

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Seyit Mehmet DEMET, smdemet@ktun.edu.tr

nanoplatelets (GNP/BETKB) were compared by considering the results obtained from the experiments. When evaluating the erosion rate resulting from impacting alumina abrasive particles on the inner surface of a pipe at various impact velocities (namely 23 m/s, 28 m/s, 34 m/s, and 53 m/s) and impingement angles (30°, 45°, 60°), it was observed that graphene nanoplatelets reinforcement increased the resistance to erosive wear in basalt fibre-reinforced pipes. As indicated by the graphs, which also analyse the proportional change in erosion rate, the graphene nanoplatelets reinforcement achieved an erosion rate reduction of almost 50% at the impact velocity of 28 m/s. It was observed that the wear model of both pipes showed a behaviour suitable for the semi-ductile wear model.

Keywords: Filament winding technique, Erosive wear, Graphene nanoplatelets reinforced composite pipe

1. GİRİŞ

Kompozit yapıya sahip diğer elemanlar gibi kompozit borularda, birden fazla malzemenin kullanıldığı ve farklı malzemelerin birleşerek yeni bir malzeme elde edilmesi ile üretilen bir boru tipidir. Kompozit borular, kullanılan her bir malzemenin avantajlı özelliklerinden yararlanacak şekilde tasarlanabilmekte bu sayede geliştirilmiş performans özelliklerine sahip bir boru eldesi mümkün olabilmektedir [1-4].

Kompozit borular, geleneksel metal veya plastik borulara göre çeşitli avantajlar sunar. Örneğin korozyona karşı dirençli bir boru elde edebilmek için polimer iç astarın kullanıldığı kompozit boru uygulamaları, metal boruları aşındırabilecek sıvıların taşınmasında özellikle yararlı olan korozyona karşı daha üstün direnç sağlamaktadır [5,6]. Bununla birlikte polimerler ile yüksek mukavemet değerlerine sahip dayanıklı fiberler takviye edilerek imal edilen borular sayesinde yüksek bir mukavemet-ağırlık oranı elde edilebilmektedir [7-9]. Bu durum, nakliye, kurulum ve taşıma faaliyetlerini kolaylaştırmaktadır. Metalik boru tiplerine kıyasla kompozit borular esnek bir yapıya sahip olabilmektedirler. Boruların kolay şekil verilebilmesi montaj alanlarında kolaylık sağlayabilecek bir kazanım sağlamaktadır. Kompozit borunun iç yüzeyinde bulunan polimer astarlar sayesinde pürüzsüzlüğü daha iyi yüzeyler elde edilebilmekte bu durum ise boru içerisindeki akışta enerji tasarrufu sağlayacak bir artı olacaktır. Tüm bu etkileri göz önüne alarak çeşitli çalışma ortamlarında daha uzun ömürlü ve verimli bir boru performansı elde edilebilmektedir.

Kompozit borular; petrol sanayi, kimyasal işleme tesisleri, su dağıtım şebekeleri ve altyapı projeleri gibi çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır [10-14]. Avantajlı özellikleri sayesinde aşındırıcı ortamlarda, yüksek basınçlı uygulamalarda, hatta geleneksel malzemelerin uygulanmasının çeşitli dezavantajlarının olduğu durumlar da dahil olmak üzere çok çeşitli koşullar için uygun kullanım alanları bulmaktadır. İlerleyen teknoloji ve malzeme çeşitliliği ile birlikte kompozit boruların performans ve uygulama yelpazesinin de genişleyeceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada erozif ortamda bulunabilecek grafen nanoplaka ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun katı partikül erozyon aşınması araştırılmıştır. Bazalt elyafın yüksek kimyasal ve ısı denge, yüksek ısı ve elektrik yalıtımı gibi özellikleri bilinmektedir. Bununla birlikte bazalt elyaflar -230°C ile $+700^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kullanılabilme avantajına sahiptir. Bazalt elyafın yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci sağlaması tribolojik olarak pozitif bir katkı sunmaktadır [15,16]. Kompozit boru erozyon aşınmasının incelendiği bu çalışmada deney numuneleri farklı hızlarda ve farklı çarpma açılarında katı partikül erozyon testlerine tabi tutularak grafen nanoplaka takviyesinin erozyon aşınmasına etkisi incelenmiştir. Boru içi katı partikül akışı deneysel ortamda simüle edilerek farklı parametreler altında boru iç yüzeyinde oluşan aşınma durumları değerlendirilmiştir. Grafen ile güçlendirme yapılmamış olan bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların katı partikül erozyon aşınması

davranışı [17] ile grafen nanoplaka ile güçlendirilen boruların erozyon davranışı karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

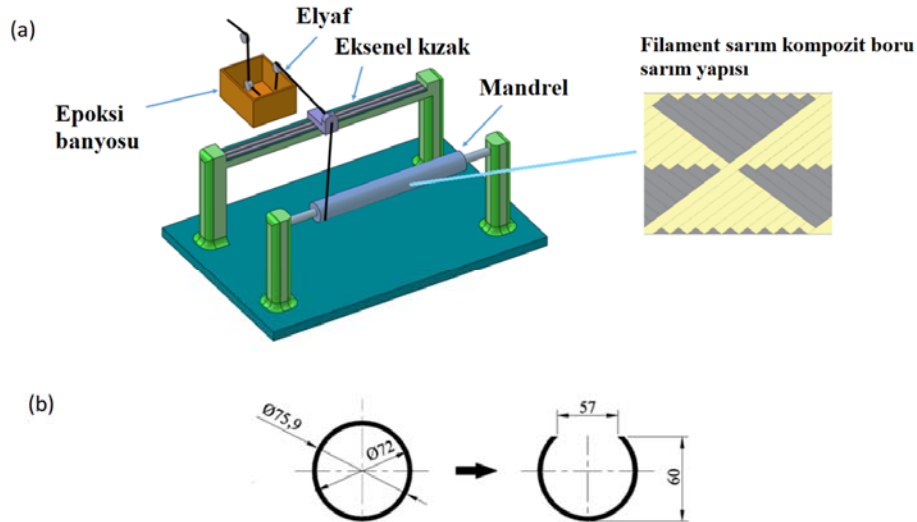
2.1. Deneysel Malzemesi

Kompozit borularda kullanılan bazalt lifler 13 μm ve 1000 m elyaf uzunluğu 400 gram olan monofilament özelliğe sahip olup, matris olarak Bisphenol-A epoksi reçine ve anhidrit bazlı kürleme ajanı kompozit borunun imalatında kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan bazalt elyaf takviyeli kompozit malzeme; 800 m^2/g yüzey alanı, 3-7 nm katman kalınlığı, ortalama 1,5 μm katman genişliği ve %99,9 saflığa sahip grafen nanoplakalar ile takviye edilmiştir. Kompozit borunun imalat sürecinde ağırlıkça % 0,25 oranında grafen nanoplakalar epoksi reçine ile homojen bir dağılım elde edilene kadar 60°C sıcaklıkta karıştırılmış ve sonrasında anhidrit bazlı (EpikureTM 866) sertleştirici eklenecek filament sarıma hazır hale getirilmiştir. Boru üretiminde kullanılan malzemeler, bazalt elyaf ve epoksi reçine sırasıyla Kamenny Vek ve Hexion firmalarından temin edilmiştir. Mekanik özelliklere ilişkin ayrıntılar Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kompozit boru bileşenlerinin mekanik özellikleri

	Elastisite modülü (GPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Yoğunluğu (g/cm^3)
Bazalt elyaf	90-95	2900-3200	2,48
Epoksi reçine	3,2	70-75	1,25

Kompozit borular filament sarım yöntemi kullanılarak 11 mm bant genişliğinde ve $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda imal edilmiştir. Filament sarım işlemi tamamlanan kompozit borular yatay döner fırında önce 120°C'de 3 saat kürlenmiş ve nihai olarak 140°C'de 3 saat kürlenmiştir (post-cure). İmal edilen kompozit borular 75,9 mm dış çapa ve 1,95 mm et kalınlığında geometrik ölçüleri sahiptir. Şekil 1'de boyutları ile birlikte verilen kompozit boru deney numuneleri Şekil 2'de gösterilen deney setinde katı partikül erozyon testine tabi tutulmuştur. Deney numunesi – nozul arasındaki mesafe sabit tutularak kompozit borular, boru eksenine boyunca ve iç yüzeyde partikül akışını sağlayacak şekilde deney setinde konumlanmıştır (Şekil 3). Deneylerde, katı partiküllerin belirlenmiş çarpma açıları boru boyunca iç yüzeye çarpıtılıp erozif ortam simüle edilmesi için belirtilen ölçülere sahip boru parçalarına kesilmiş ve ardından bu parçalar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1, bu tasarımın detaylarını göstermektedir.



Şekil 1. a) Filament sarım kompozit boru üretim şeması b) deney numunesi ölçüleri (ölçüler mm'dir)

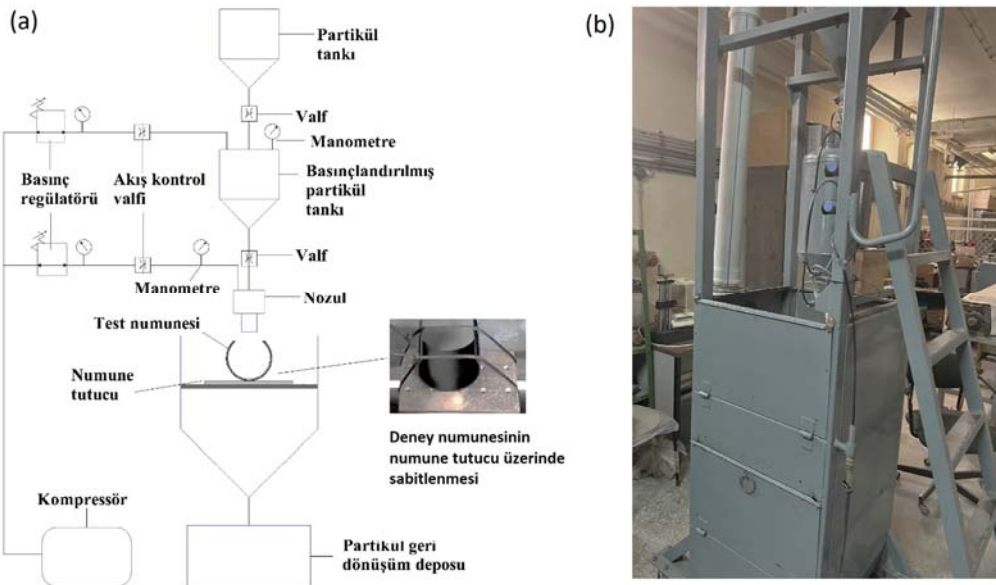
2.1. Deney Tesisatı

Üretilen kompozit boruların katı partikül erozyon testleri Şekil 2’de verilen ASTM G76-95 standardına uygun deney setinde yapılmıştır. Şekil 2’de elemanları ile birlikte verilen deney setinde aşındırıcı olarak kullanılan alümina partikülleri önceden belirlenmiş miktarda partikül tankına eklenmekte ardından basınçlandırılmış partikül tankına aktarılıp belirlenmiş basınç değerlerinde basınçlandırılmaktadır. Çift disk metodu ile belirlenen basınç – hız ilişkisi sayesinde belirli basınç altında bulunan alümina partiküller istenilen çarpma hızında ve çarpma açısında deney numunesi üzerine çarptırılmaktadır. Bu yöntemle deney numunesi olarak belirlenmiş olan kompozit borunun iç yüzeyi üzerine çarpan partiküllerin erozyon aşındırıcı etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 2. Erozyon deneyi parametreleri

Aşındırıcı	Alümina (Al ₂ O ₃)
Aşındırıcı boyutu	600 µm
Partikül miktarı	2 kg
Partikül debisi	95 g/s
Partikül çarpma açıları	30°/45°/60°
Partikül çarpma hızları	23/28/34/53 m/s
Nozul-Deney numunesi arası mesafe	10 mm
Nozul çapı	6 mm

Şekil 3’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 kullanılan partikül hızlarının belirlenmesinde çift disk metodu kullanılmış ve basınçlandırılmış partikül tankının basınç değerinin 1, 1.5, 2 ve 3 bar olarak ayarlandığında karşılık gelen partikül hızı (m/s) değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

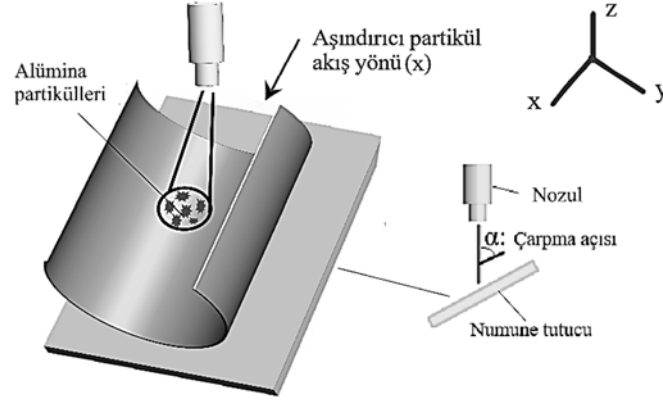


Şekil 2. ASTM G76-95 ile uyumlu katı partikül erozyon deney seti a) şematik resim, b) deney seti fotoğrafı

Boru içi partikül akışının simüle edildiği bu çalışmada deney öncesinde ve sonrasında deney numuneleri 10⁻⁴ gr hassasiyetteki terazide tartılarak deney esnasında oluşan ağırlık kaybı (ΔW, mg) belirlenmiştir. Deneyler üçer kere tekrar edilmiştir. Tekrarlı testler sonucunda ortalama ER değerleri standart sapma çubukları ile birlikte grafiklerle

sunulmuştur. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde erozyon oranı (ER) dikkate alınmış ve ağırlık kaybının aşındırıcı partikül miktarına (Q_p,kg) oranı ile belirlenmiştir (Eşitlik 1).

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

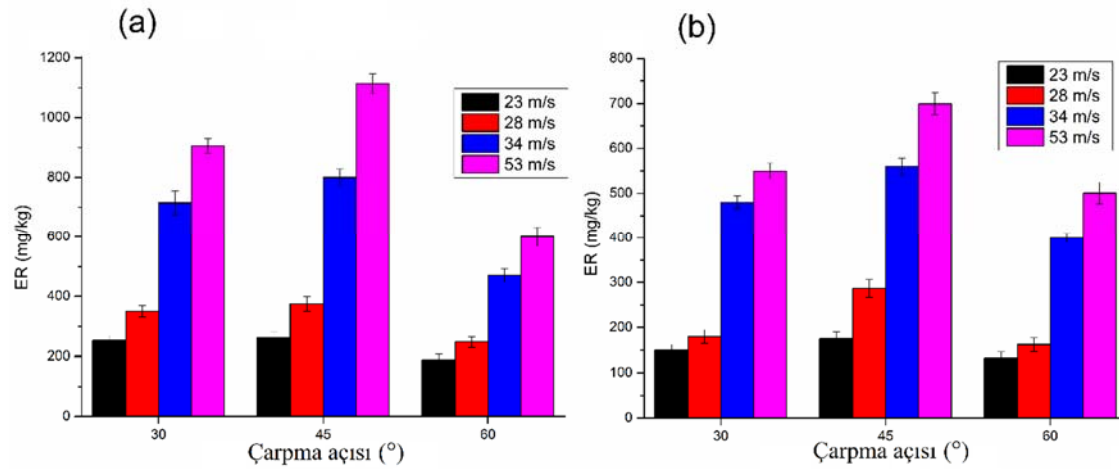


Şekil 3. Numunelerin test pozisyonunun belirlenme şekli

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Grafen nanoplaka ile kuvvetlendirilmiş ve saf bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların eroziv dayanımı katı partikül erozyon testleri ile araştırılmış olup Şekil 4’de verilen grafikte çarpma

açısı ve hız değişkenleri dikkate alınarak sonuçlar sunulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada üç farklı çarpma açısında ve dört farklı çarpma hızında alümina partiküller boru içerisinde oluşabilecek katı partikül akışını simüle etmiş ve deney sonuçları erozyon oranı (ER) ile grafiğe yansıtılmıştır.



Şekil 4. Partikül çarpma hızı değişiminin kompozit borunun erozyon oranına etkisi a) Bazalt elyaf takviyeli kompozit boru [17], b) grafen nanoplaka ile güçlendirilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit boru

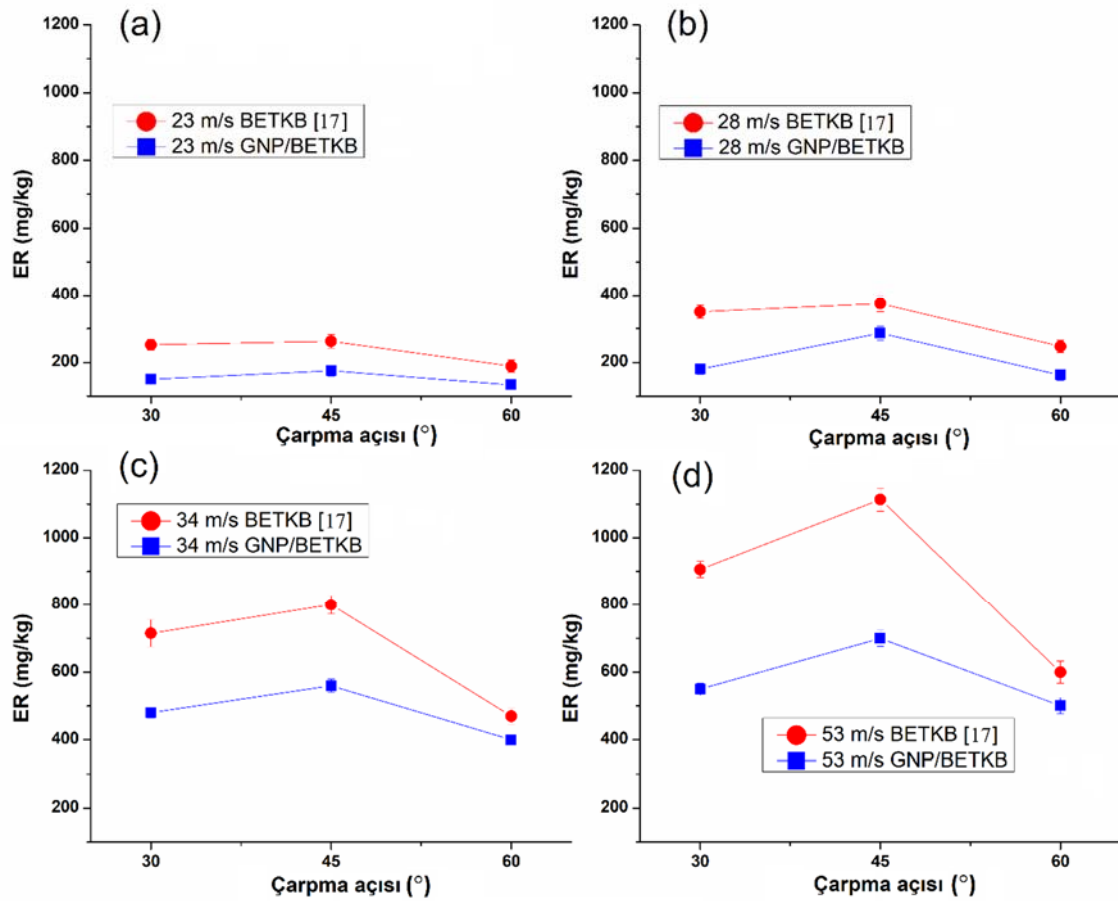
Şekil 4’de verilen grafik sonuçlarına bakıldığında tüm çarpma açılarında alümina partiküllerinin deney numunesi yüzeyine çarpma hızı arttıkça erozyon oranının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek aşınma oranlarına 45° çarpma açısında ulaşıldığı görülmektedir. Çarpma hızı ve çarpma açısı erozyon aşınmasına etki eden önemli test parametrelerindedir [18]. Boru iç yüzeyine

çarpan partiküllerin çarpma hızı arttıkça çarpma enerjileride artacaktır ve yüzeyden partikül koparma oranı düşük hıza göre daha yüksek oranda olacaktır. Dolayısıyla partikül çarpma hızı arttıkça erozyon aşınması artacaktır [19-21].

Şekil 5’de bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun erozyon aşınmasına ait erozyon oranı değerlerinin

dört farklı hız parametresi içinde grafen nanoplaka takviyeli kompozit borudan daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Grafen nanoplaka ile kuvvetlendirilen deney numunelerine ait sonuçlara bakıldığında ise grafen katkısının erozyon aşınmayı azalttığı ve erozyona karşı daha dirençli bir yapı elde edildiği görülmektedir. Bu sonucun eldesinde grafen nanoplakaların partikül ile yüzey arasında yağlayıcı bir rol üstlenerek partikülün yüzeyden kaymasını kolaylaştırması sonucunda alümina partiküllerinin daha az malzeme kopmasına sebep

olması bir etkidir. Grafen nanoplakaların kompozit yapılarda katı yağlayıcı bir rol üstlendiği, kompozit yapının sertlik ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirdiği literatür çalışmalarında da ifade edilmektedir [22-24]. Mekanik olarak daha mukavemetli bir kompozit yüzeyden malzemenin koparılmasının daha zor olmasının yanında birde ara yüzeyde yağlayıcı bir rol alıyor olması GNP takviyeli kompozit borunun aşınma direncini iki kata yakın artırmış ve erozyon direncini yükseltmiştir



Şekil 5. Partikül çarpma açısı değişiminin kompozit borunun erozyon oranına etkisi; a) 23 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, b) 28 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, c) 34 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi, d) 53 m/s partikül çarpma hızında ER değişimi

Bunun yanında her iki kompozit boru içinde erozyon oranı ile aşındırıcı partikülün yüzeye çarpma açısına bağlı olarak sunulan Şekil 5'deki

grafikler incelendiğinde hızdan bağımsız olarak yarı sünek bir erozyon davranışı görülmektedir. Erozyon testlerinde malzemelerde aşındırıcı

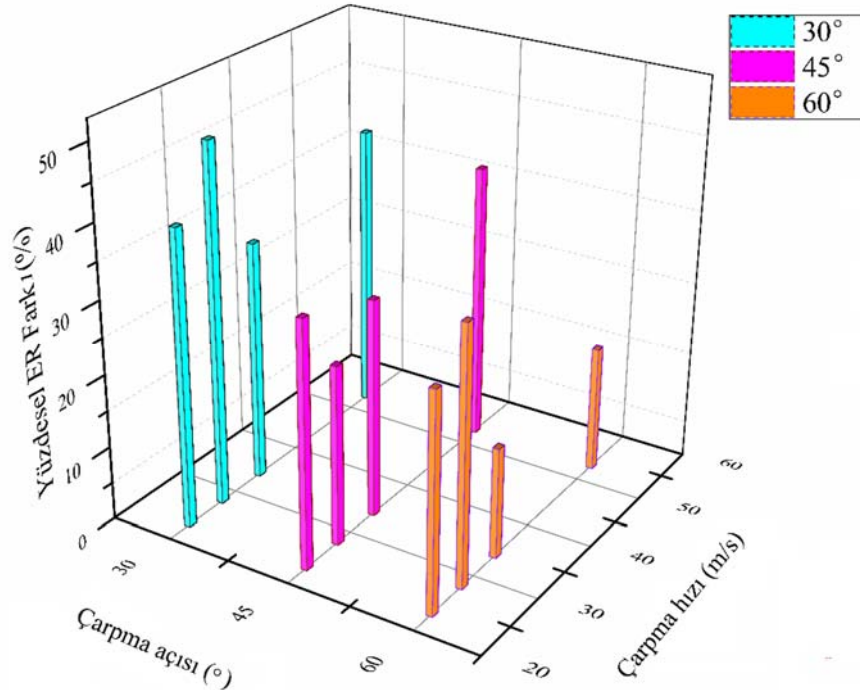
partikülün deney numunesi üzerine çarpma açısının 15°-30°, 45°-60° ve 90° aralıklarında değişimine bağlı olarak aşınma oranının en yüksek seviyelere ulaşması sonucunda sırasıyla sünek, yarı sünek ve gevrek davranış sergilediği ifade edilmektedir [25,26]. Yarı sünek erozyon davranışı görülen malzemelerde 45°-60° çarpma açısı aralığında en yüksek aşınma oranına ulaşılmaktadır. BETKB ve GNP/BETKB borularda erozyon aşınması davranışı çarpma açısının etkisi altında değerlendirildiğinde yarı sünek bir aşınma davranışı sergilediği Şekil 5'de görülmektedir. Sünek ve yarı sünek erozif davranış sergileyen malzemelerde 90° çarpma açısında daha düşük bir erozyon oranı elde edilir [25,26]. Bu sebeple yapılan çalışmada yarı sünek davranış tespit edildiği için 90° çarpma açısında erozif davranış incelenmemiştir.

Kompozit uygulamalarda yaygın kullanılan cam elyaf takviyesine göre daha mukavemetli bir yapıya ulaşan bazalt elyaf takviyeli kompozit [27,28] borularda grafen takviyesinin aşınmaya karşı direnci daha üstün bir seviyeye ulaştırdığı görülmektedir. GNP/BETKB borularda ise BETKB

borulara göre daha mukavemetli bir yapıya ulaştığı ve yorulmaya dayanımının da arttığı da belirtilmektedir [29,30].

Şekil 6'da verilen grafikte bazalt elyaf takviyeli kompozit borunun grafen nanoplaka ile güçlendirilmesi sonucunda erozyon oranlarının değişimi eşitlik 2 ile yüzdesel olarak sunulmuştur. Grafikten de görüldüğü gibi çarpma açısı ve çarpma hızı değişkenliğinde sabit bir erozyon oranı azalışı gerçekleşmemektedir. Çarpma açısındaki değişimin çarpma hızı üzerinden değerlendirildiği grafikte 30° çarpma açısında grafen nanoplaka ile güçlendirilen numunelerin en yüksek erozyon aşınma direnci geliştirme oranına sahip olduğu görülmüştür. Dört farklı çarpma hızında yapılan erozyon testleri sonucunda 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranı farkları elde edilmiştir. Alümina partiküllerinin 28 m/s hızında yüzeye çarptığı testlerde bu açıda %50'ye yakın bir erozyon oranı azalımı görülmüştür.

$$\text{Yüzdesel fark} = \frac{ER_{BETKB} - ER_{GNP/BETKB}}{ER_{BETKB}} * 100 \quad (2)$$



Şekil 6. BETKB ve GNP/BETKB borulara ait erozyon oranı yüzdesel değişimi

4. SONUÇLAR

Bazalt elyaf takviyeli kompozit boruda grafen nanoplaka ile güçlendirilme sonrasında erozyon direncinin partikül çarpma hızı ve çarpma açısına bağlı olarak değişiminin incelendiği bu çalışmada boru içi partikül akışı alümina partiküller kullanılarak simüle edilmiş ve her iki boruda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Grafen nanoplaka ile güçlendirilen ve güçlendirme yapılmayan bazalt elyaf takviyeli kompozit boru eksenine paralel olarak çarpan partiküllerin çarpma hızındaki artış sonucunda erozyon aşınmasının arttığı ve borunun erozyon direncinin azaldığı görülmüştür.
- Her iki kompozit boruda da 45° çarpma açısında en yüksek aşınma değerlerine ulaşılmış olup yarı sünek erozyon aşınma modeli davranışı sergiledikleri görülmüştür.
- Grafen nanoplaka ile güçlendirilen boru iç yüzeyindeki erozyon oranlarının ciddi bir oranda düştüğü ve borunun erozyon direncinin arttığı ve dolayısıyla erozyona bağlı kullanım ömrünün de uzayacağı açık bir şekilde görülmüştür.

Grafen nanoplaka ile güçlendirilen borudaki erozyon oranlarının güçlendirilmemiş boruya göre en yüksek erozyon direnci kazandığı testlerde 30° çarpma açısının etkili olduğu görülmüştür (Şekil 6).

5. KAYNAKLAR

1. Beycioğlu, A., Mıs, H., Güner E.D., Güner H., Gökçe N., 2020. A Study on Industrial-Scale Waste Utilization in Construction Material Production: The Use of Fly Ash in GRP Composite Pipe. *Materiales de Construcción*, 70(340), e234.
2. Adam, S., Ghosh, S., 2016. Application of Flexible Composite Pipe as a Cost Effective Alternative to Carbon Steel-Design Experience. In *Offshore Technology Conference Asia, OTC*.
3. Laney, P., 2002. Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas. *INEEL Field Work Proposal*, 4340-70.
4. Silverman, S.A., 1997. Spoolable Composite Pipe for Offshore Applications. *Materials Performance*, 36(1).
5. Prabhakar, M.M., Rajini, N., Ayrılmış, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., Karthikeyan, S., Ismail, S.O., 2019. An Overview of Burst, Buckling, Durability and Corrosion Analysis of Lightweight FRP Composite Pipes and Their Applicability. *Composite Structures*, 230, 111419.
6. Alabtah, F.G., Mahdi, E., Khraisheh, M., 2021. External Corrosion Behavior of Steel/GFRP Composite Pipes in Harsh Conditions. *Materials*, 14(21), 6501.
7. Picard, D., Hudson, W., Bouquier L., Dupupet G., Zivanovic, I., 2007. Composite Carbon Thermoplastic Tubes for Deepwater Applications. In *Offshore Technology Conference, OTC*.
8. Czél, G., Czigány, T., 2008. A Study of Water Absorption and Mechanical Properties of Glass Fiber/Polyester Composite Pipes-Effects of Specimen Geometry and Preparation. *Journal of Composite Materials*, 42(26), 2815-2827.
9. 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.
10. Zubail, A., Traidia, A., Masulli, M., Vatopoulos, K., Vielllette, T., Taie, I., 2021. Carbon and Energy Footprint of Nonmetallic Composite Pipes in Onshore Oil and Gas Flowlines. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127150.
11. Okolie, O., Latto, J., Faisal N., Jamieson, H., Mukherji, A., Njuguna, J., 2023. Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on The in-Situ Performance of Thermoplastic Composite Pipes in Oil and Gas Applications. *Applied Composite Materials*, 30(1), 231-306.
12. GangaRao, H., 2017. Infrastructure Applications of Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Applied Plastics Engineering Handbook*, 675-695.
13. Imrek, H., Demet, S., 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.
14. Najafigharehtapeh, A., Kaçar, R., 2016. Elektrofüzyon Kaynaklı Polietilen 80 Kalite Doğalgaz Borularının Tokluğu. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(ÖS1), 109-116.
 15. Chen, C., Liu, X., Zhou, Q.Q., Ma, Y.L., 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.
 16. Balaji, K., 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.
 17. Demet, S.M., Sepetçioğlu H., Bağcı M., 2022. Filament Sarım Bazalt/Epoksi Kompozit Boruların İç Yüzey Erozif Aşınma Davranışına Partikül Hızı ve Çarpma Açısının Etkisi. Gazi University Journal of Sicene Part C: Design and Technology, 10(4), 1046-1058.
 18. 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.
 19. Peng, W., Cao, X., 2016. Numerical Simulation of Solid Particle Erosion in Pipe Bends for Liquid-Solid Flow. Powder Technology, 294, 266-279.
 20. Dong, M., Li, Q., Liu, H., Liu, C., Wujcik., E.K., Shao, Q., Ding, T., Mai, X., Shen, C., Guo, Z., 2018. Thermoplastic Polyurethane-Carbon Black Nanocomposite Coating: Fabrication and Solid Particle Erosion Resistance. Polymer, 158, 381-390.
 21. Demet, S.M., Sepetçioğlu, H., Bağcı, M., 2023. Solid Particle Erosion Behavior on the Outer Surface of Basalt/Epoxy Composite Pipes Produced by the Filament Winding Technique. Polymers, 15(2), 319.
 22. Alajmi, A.F., Ramulu, M., 2021. Solid Particle Erosion of Graphene-Based Coatings. Wear, 476, 203686.
 23. Sepetçioğlu, H., Demet, S.M., Bağcı, M., 2023. A Comprehensive Experimental Study of Enhanced Solid Particle Erosive Resistance on the Inner/Outer Surface of Graphene Nanoplatelets Modified Basalt/Epoxy Composite Pipe. Polymer Composites, 44, 6944-6956.
 24. Rana, A.R.K., Islam, M.A., Farhat, Z., 2020. Effect of Graphene Nanoplatelets (Gnps) Addition on Erosion-Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Coatings. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 6, 1-14.
 25. Harsha, A., Thakre, A.A., 2007. Investigation on Solid Particle Erosion Behaviour of Polyetherimide and Its Composites. Wear, 262(7-8), 807-818.
 26. Shahapurkar, K., Soudagar, M.E.M., Shahapurkar, P., Mathapati, M., Khan, T.M.Y., Mujtaba, M.A., Ali, M.D.I., Thanaiah, K., Siddiqui, I.H., Massod, A.A., 2022. Effect of Crump Rubber on the Solid Particle Erosion Response of Epoxy Composites. Journal of Applied Polymer Science, 139(2), 51470.
 27. Singha, K., 2012. A Short Review on Basalt Fiber. International Journal of Textile Science, 1(4), 19-28.
 28. Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.J., Hui, D., 2015. A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. Composites Part B: Engineering, 73, 166-180.
 29. Sepetçioğlu, H., Tarakçioğlu, N., 2021. Fatigue Behavior of Graphene Nanoplatelets Reinforced and Unreinforced Basalt/Epoxy Composite Pressure Vessels Subjected to Low-Velocity Impact Under Internal Pressure. Journal of Composite Materials, 55(29), 4361-4373.
 30. Rafiee, M., Hosseini Rad, S., Nitzsche, F., Laliberte, J., Labrosse, M., 2020. Significant Fatigue Life Enhancement in Multiscale Doubly-Modified Fiber/Epoxy Nanocomposites with Graphene Nanoplatelets and Reduced-Graphene Oxide. Polymers, 12(9), 2135.

