

TÜRKİYE'DE ENERJİ NAKİL HATLARINDA KULLANILAN AA-1070 İLE AA-6101 ALAŞIMLARININ KATI PARTİKÜL EROZYON DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Egemen AVCU ^{a,1}, Sinan FİDAN ^b, Sedat KARABAY ^a, Tamer SINMAZÇELİK ^{a,c}

^a Kocaeli Üniversitesi, Makine Müh., Umuttepe Kampüsü, 41380 İzmit, Kocaeli

^b Kocaeli Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Arslanbey Kampüsü, 41285, İzmit, Kocaeli

^c TUBITAK-MAM, Malzeme Enstitüsü, P.K. 21, 41470 Gebze, Kocaeli

avcuegemen@gmail.com, sinan_fidan@hotmail.com, sedatkarabay58@gmail.com, tamersc@yahoo.com

(Geliş/Received: 26.12.2011; Kabul/Accepted: 09.10.2012)

ÖZET

Bu çalışmada yüksek gerilim hatlarında enerji iletimi için kullanılan AA-1070 ve AA-6101 alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışları incelenmiştir. Servis ömürleri boyunca enerji nakil hatlarında kullanılan malzemeler zorlu atmosfer şartlarına maruz kalmaktadır. Özellikle kum fırtınası gibi meteorolojik olaylar bu malzemelerin katı partikül erozyonu ile aşınmalarına neden olmaktadır. Katı partikül erozyonu nedeniyle oluşan malzeme kaybı ve iletken kesitindeki daralmalar bu malzemelerin kullanım ömürlerinin kılmasına ve bunun sonucunda enerji nakil hatlarında büyük enerji kayıplarına yol açmaktadır. Bu çalışmada enerji nakil hatlarında kullanılan AA-1070 ve AA-6101 alüminyum alaşımlarının farklı partikül çarpma açılarında (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) katı partikül erozyonu davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Aşınan malzeme yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS) yardımıyla incelenmiş ve aşınmaya yol açan etkin aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı partikül erozyonu, AA-1070, AA-6101, partikül çarpma açısı, SEM

THE COMPARISON OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIORS OF AA-1070 AND AA-6101 ALLOYS USED IN POWER TRANSMISSION LINES IN TURKEY

ABSTRACT

In this study, solid particle erosion behaviors of AA-1070 and AA-6101 alloys used in high-voltage power transmission lines for energy transfer were investigated. During their service life materials used in power transmission lines are exposed to extreme atmospheric conditions. Meteorological events, such as sand storms, especially cause these materials to wear due to solid particle erosion. Material loss due to solid particle erosion and cross-sectional narrowing in wires lead to a reduction in their service life which causes large scale losses in power transfer lines. In this study solid particle erosion behaviors of AA-1070 and AA-6101 aluminum alloys used in power transfer lines were investigated at various impingement angles (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) and compared. Surface morphology of eroded samples was examined by using scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and dominant erosion damage modes were determined.

Key words: Solid particle erosion, AA-1070, AA-6101, particle impingement angle, SEM

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları iletken sanayisinde elektrik enerjisinin taşınmasında temel malzeme olarak belirlenmiş ve pek çok ülke yüksek voltajlı transmisyon hatlarında bu malzemeleri kullanmışlardır. Ülkeler genelinde saf bir alüminyum

alaşımı olan AA-1070 alaşımı ve galvanizlenmiş çelik telden oluşan kompozit yapı (ACSR % 99,7 EC Al) yaygın olarak tercih edilmiştir. Ülkemizde de 1952 yılından itibaren bu iletken tipi tercih edilmiş ve altyapı yatırımları başlamıştır. Yıl 2012 olduğunda Türkiye'deki transmisyon hatlarının büyük çoğunluğu nominal kullanım ömürlerini doldurmuştur. Yapılan

çalışmalar çerçevesinde enerji nakil hatlarında aşırı sünme gösteren hatların bir kısmının öncelikli olarak değiştirilmelerine rağmen çok büyük bir çoğunluğu henüz programa alınmamış konumdadır. Aşırı yaşlanmış enerji nakil hatları etkin sünme mekanizmalarından dolayı sehime maruz kalmışlardır. Bu durum bu hatlarda taşınan enerjinin önemli bir bölümünün ısıya dönüşerek kaybolmasına neden olmaktadır. Diğer yandan son yıllarda enerji nakil hatlarında kullanılabilir çok sayıda alternatif alüminyum alaşımı ortaya çıkmıştır. Bu noktada ülkemizin bir an önce nominal kullanım ömürlerin tamamlamış iletkenler yerine hangi yeni iletkeni ikame edeceğine karar vermesi gerekmektedir.

Günümüzde dünya ölçeğinde en fazla kabul gören iletkenlerden birisi şüphesiz AAAC-6101 iletkenidir. Bunun küreselleşen dünyada kabul gören en temel gerekçesi bu iletkenlerin yüksek çekme dayanımları neticesinde herhangi bir takviye elemanına ihtiyaç duymaksızın kullanılabilmeleridir. AA-1070 alaşımı ve galvanizlenmiş çelik telden oluşan ACSR iletken kompozit yapısı iletkenin zaman içerisinde galvanik aşınma mekanizması ile aşınması sonucunda zayıflamaktadır. AAAC-6101 iletkenlerde ACSR iletkenlerde görülen çelik tel-alüminyum kombinasyonu olmadığı için “Galvanik aşınma” mekanizması çalışmaz, zira iletken kompozit yapıdan arındırılmış durumdadır. ACSR iletkenlerde çelik teller galvanizlenmiş olmalarına rağmen çok küçük noktasal hasarlarla başlayan galvaniz boş noktalarındaki paslanmaya müteakip pilleşme mekanizması alüminyum tellerin yenilerek aşınmalarına ve iletkenlerin hasara uğramalarına sebep olmaktadır [1].

Diğer yandan servis ömürleri boyunca enerji nakil hatlarında kullanılan bu malzemeler zorlu atmosfer şartlarına maruz kalmaktadır. Özellikle kum fırtınası gibi meteorolojik olaylar bu malzemelerin katı partikül erozyonu ile aşınmalarına neden olmaktadır. Katı partikül erozyonu nedeniyle oluşan malzeme kaybı ve iletken kesitindeki daralmalar bu malzemelerin kullanım ömürlerinin kılmasına ve bunun sonucunda enerji nakil hatlarında büyük enerji kayıplarına yol açmaktadır.

Katı partikül erozyonu aşındırıcı katı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine tekrarlı çarpmaları sonucu malzeme yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir [2,3]. Kumlama ve yüksek hızlı aşındırıcı su jetiyle kesme işlemleri gibi bazı durumlarda katı partikül erozyonu malzemelerin işlenmesi için kullanılan faydalı bir yöntem olarak düşünülebilir. [4,5]. Diğer taraftan genellikle katı partikül erozyonu malzemelerde aşınma, yüzey

pürüzlenmesi ve bozulması, makroskopik düzeyde hasar krateri oluşumu ve yapının yorulma ömrünün kısalması görevini yerine getiremeyecek kadar hasara uğraması gibi bir dizi negatif etkiye neden olmaktadır. Katı partikül erozyonu bütün bu negatif etkileriyle mühendislik uygulamalarında hataya sebep olan ciddi bir problem olarak değerlendirilmelidir [3,6]. Uzay ve hava aracı yapılarındaki buhar ve jet motorları, helikopter pervaneleri, katı partikül içeren süspansiyon taşıyan boru hatları ve üzerlerindeki vanalar, akışkan yataklı yanma sistemleri ve tozlu servis şartları altında çalışmak zorunda olan araç ve yapılar güçlü erozyon aşınmasına maruz kalan mühendislik uygulamalarına örnek gösterilebilir [3-7].

Katı partikül erozyonunu etkileyen faktörleri dört ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar operasyon parametreleri (çarpma açısı ve hızı, aşındırıcı debisi vs.), aşındırıcı partiküllerin özellikleri (şekil, sertlik, tip vs.), hedef malzemenin özellikleri (sertlik, tokluk, modül, kırılma davranışı vs.) ve çevresel test şartlarıdır (sıcaklık, hedef malzeme ile aşındırıcı partiküller arasında ortaya çıkan kimyasal etkileşim) [3-8-11]. Birçok araştırmacı daha önce farklı malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları üzerine çalışmalar yapmışlar ve aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma açısının erozyon aşınması üzerinde büyük etkisi olduğunu bulmuşlardır [3,5,10-18].

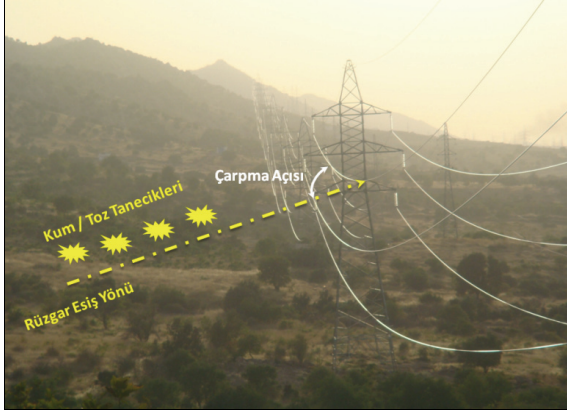
Alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışı üzerine literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Tablo 1’ de alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışı üzerine gerçekleştirilen çalışmaların özetleri verilmiştir. Daha önce de değinildiği gibi yüksek gerilim hatlarında kullanılan malzemeler, buz ve rüzgar fırtınaları, çöl şartlarında kum fırtınaları gibi farklı çevresel koşullar altında görev yaparlar. Bu şartlar altında çalışan yüksek gerilim hatlarının malzemeleri, kum ve toz partikülleri tarafından erozyona uğrayarak mekanik ve elektriksel özelliklerinde kayıplar yaşarlar. Ortaya çıkan bu durum malzemelerin servis ömürlerini kısaltır. Bu yüzden yüksek gerilim hattı malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışlarını anlamak önem arz etmektedir. Daha önce açıklandığı gibi malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi aşındırıcıları hedef malzemeye çarpma açısıdır. Kum / toz gibi aşındırıcı partiküllere maruz kalan yüksek gerilim hatlarına partiküllerin rüzgarın esiş yönüne bağlı olarak çok farklı açılarda çarpması mümkündür. Şekil 1’de yüksek gerilim hatlarında ortaya çıkan katı partikül erozyonunda çarpma açısının rüzgar yönüne bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

Tablo 1. Alüminyum alaşımlarının erozyon davranışları üzerine gerçekleştirilen çalışmaların özetleri(Literature survey of the solid particle erosion behaviour of aluminium alloys)

Yazarlar	İncelenen malzeme	Kullanılan Yöntem	Bulgular ve Sonuçlar
Fang, C.-K., Chuang, T. H.[19]	AA6063 alaşımı	Katı partikül erozyonu	AA6063 alaşımı düşük çarpma açılarında maksimum miktarda aşınmıştır. Aşındırıcı partikül boyutunun artışı hedef malzemenin yüzeyinde daha büyük hasarlara yol açmıştır. Bağıl nem miktarı erozif aşınma miktarı üzerinde önemli bir rol oynamıştır.
Ramesh, C. S., Keshavamurthy, R., Channabasappa, B. H., Pramod, S.[20]	AA6061 alaşımı	Çamur Erozyonu	Çamur içerisindeki partikül oranının artırılması erozyon miktarının arttırmıştır. Partikül çarpma hızının artırılması erozyon miktarını arttırmıştır. Al6061 alaşımının yaşlandırıldığında çamur erozyon direnci artış göstermiştir.
Tu, J. P., Pan, J. Matsumura, M., Fukunaga, H.[21]	Al ₁₈ B ₄ O ₃₃ whisker takviyeli ACTC Al alaşımı matrisli kompozit	Katı Partikül Erozyonu	Kompozit malzeme sünek davranış göstermiş ve en fazla aşınmayı 20°-30° partikül çarpma açısında göstermiştir. Aşındırılan takviye edilmemiş alüminyum matris ve kompozit numunelerin yüzeylerinde benzer aşınma mekanizmaları gözlenmiştir. Çok düşük çarpma açılarında whisker takviyesi alüminyum alaşımının erozif aşınma dayanımını arttırmıştır.
Desale, G. R., Gandhi, B. K., Jain, S. C.[22]	AA6063 alaşımı	Çamur erozyonu	Partikül boyutunun azalması ile alüminyum alaşımında görülen etkin aşınma mekanizması değişmiştir. Küçük boyutlu partiküller büyük partiküllere kıyasla malzemeyi daha fazla aşındırmıştır.
Das, S., Mondal, D. P., Sawla, S.[23]	Al-Si alaşımı (LM13)	Katı Partikül Erozyonu	Maksimum aşınma alüminyum alaşımının 45° partikül çarpma açısı ile aşındırılması ile gözlenmiştir. 15°-30° çarpma açılarında malzemede mikro-sürme ve mikro-kesme, 45°-60° açılarda kesme ve 75°-90° çarpma açılarında mikro-kırılma aşınma mekanizmaları gözlenmiştir.
Cousens, A. K., Hutchings, I. M.[24]	AA6061 alaşımı	Katı Partikül Alaşımı	Erozif aşınma sırasında farklı aşınma mekanizmaları ile malzeme kaybı gerçekleştiği gözlenmiştir. Malzemenin akarak oluşturduğu izler belirlenmiştir. Aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşturduğu ve saplanarak malzeme yüzeyine gömüldükleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada enerji hatlarında kullanılan AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşımlarının farklı çarpma açılarında (30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) katı partikül erozyonu davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kum / toz fırtınası koşullarını simüle etmek amacıyla aşındırıcı olarak silika (SiO₂) kumu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonrası ortaya çıkan hasar

mekanizmalarını değerlendirmek amacıyla numune yüzeylerinin erozyon testleri sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri çekilerek ve enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS) gerçekleştirilerek malzemelerde görülen aşınma mekanizmaları yorumlanmıştır.



Şekil 1. Enerji hatlarında aşındırıcı partiküllerin çarpma açısının rüzgar yönüne bağlı değişimi. (Impact angle variations of abrasive particles depending on the wind direction in power lines)

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

2.1 Malzeme (Materials)

Bu çalışmada Türk Kablo A.O. firması tarafından üretilen AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşım malzemeler kullanılmıştır. Alüminyum alaşım malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri üretici bilgilerine göre Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmiştir. Üretici firmadan tedarik edilen iletken teller 60 mm boyunda kesilerek deney numunesi haline getirilmiştir. AA-1070 alüminyum alaşımının tel çapı 3,6 mm; AA-6101 alüminyum alaşımının tel çapı 3,2 mm’dir.

2.2 Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Şekil 2’te katı partikül erozyonu testlerinin gerçekleştirildiği test düzeneği görülmektedir. 150-200 μm (Şekil 3) boyutlarındaki silika (SiO_2) kumu tanecekleri 3 bar püskürtme basıncıyla 5 mm çapında ve 50 mm uzunluğundaki nozulda hızlandırılarak püskürtülmüşlerdir. Bu püskürtme basıncında aşındırıcı silika partiküllerinin ortalama hızları çift disk metodu kullanılarak ölçülmüş ve 40 m/s bulunmuştur. Bununla birlikte bu püskürtme basıncında aşındırıcı partiküllerin debisi 6.25 g/s olarak ölçülmüştür. Şekil 2’te gösterilen ayarlanabilir numune fikstürü yardımıyla numuneler farklı partikül çarpma açıları (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) aşındırılmıştır.

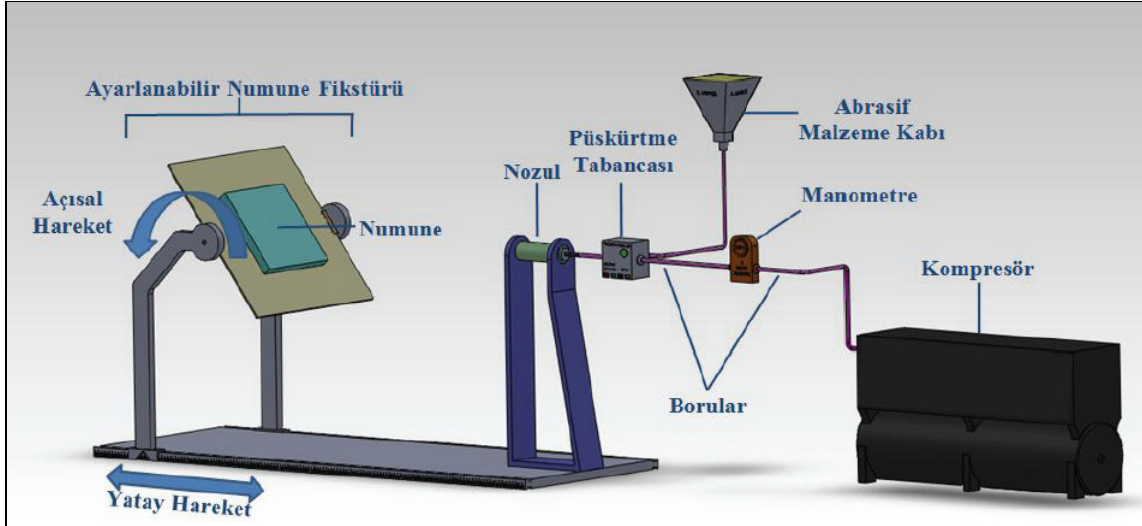
Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm parametreler detaylı bir şekilde Tablo 4’de verilmiştir. Deney numunelerinin ağırlıkları erozyon testleri öncesi ve sonrasında ± 0.1 mg hassasiyetli terazi ile ölçülmüştür. Erozyon aşınma deneyleri her bir numune ve parametre için 5 kez tekrarlanmış ve hata oranı % 5 olarak belirlenmiştir. Her deney numunesi 15 saniye aşındırılmış ve aşınma miktarları ölçülmüştür. Ölçülen aşınma miktarlarının ortalamaları alınarak nihai aşınma miktarları belirlenmiştir. Ölçüm öncesinde malzeme yüzeyinde kalan aşındırıcı kum/toz parçacıklarının deneysel sonuçları etkilemesini önlemek amacıyla numuneler basınçlı hava ile temizlenmiştir.

Tablo 2. AA-6101 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve tipik fiziksel özellikleri. [25] (Chemical composition and physical properties of AA-6101 aluminium alloy)

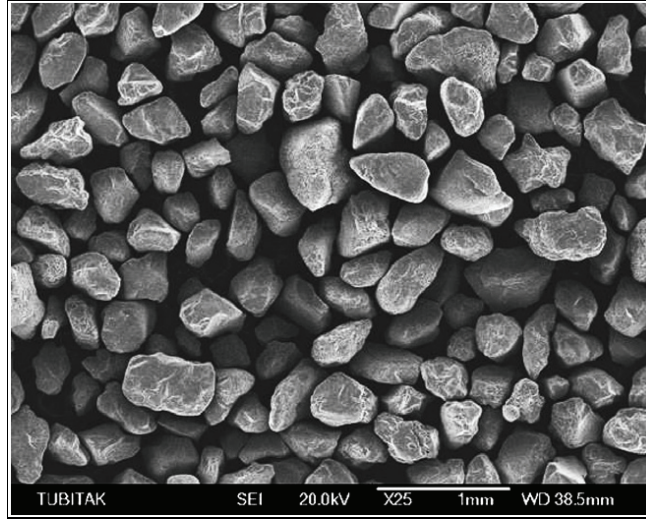
Kimyasal Bileşim Limitleri (%)					
Mg	Si	Fe	Cu	Diğer elementlerin her biri	Diğer elementler toplamı
0,40 – 0,9	0,30 - 0,7	0,40	0,05	0,03	0,10
Tipik Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk	Elastisite Modülü	25° C’de (298 K) Termal İletkenlik	20-200 °C (293-473 K) arası Uzama Katsayısı	20 °C’de (293 K) Özgül Elektriksel Direnç	
2,710 g/cm ³	67000 N/mm ²	2,18 W/cm. K	23 x 10 ⁻⁶ /K	0,03133 Ω mm ² /m	

Tablo 3. AA-1070 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve tipik fiziksel özellikleri. [25] (Chemical composition and physical properties of AA-1070 aluminium alloy)

Kimyasal Bileşim Limitleri (%)								
Fe	Si	Zn	Cu	Mg	Mn	Ti	Diğer elementlerin her biri	Al (min)
0,25	0,20	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	97,70
Tipik Fiziksel Özellikler								
Yoğunluk	Elastisite Modülü	25° C’de (298 K) Termal İletkenlik	20-100 °C (293-373 K) arası Uzama Katsayısı	20 °C’de (293 K) Özgül Elektriksel Direnç				
2,7 g/cm ³	68600 N/mm ²	2,3 W/cm. K	23,5 x 10 ⁻⁵ /K	0,028 Ω mm ² /m				



Şekil 2. Katı partikül erozyonu test düzeneği. (Solid particle erosion test rig)



Şekil 3. Silica partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (Scanning electron microscope (SEM) images of silica particles)

Tablo 4. Katı erozyonu test parametreleri. (Solid particle erosion test parameters)

Aşındırıcı malzeme	Silika kumu (SiO ₂)	Aşındırıcı partiküllerin ortalama hızı	40 m/s
Aşındırıcı partikül boyutu	150-200 µm	Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi	6,25 g/s
Partikül çarpma açısı	30°, 45°, 60°, 75°, 90°	Test sıcaklığı	25 °C
Aşındırma süresi	15 s	Nozul çapı	5 mm
Püskürtme/hızlandırma basıncı	3 bar	Nozul uzunluğu	50 mm

Erozyona uğramış malzemelerin yüzey morfolojilerini karakterize etmek ve hedef malzeme yüzeyinde etkin aşınma mekanizmalarını tanımlamak amacıyla numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir (SEM Cihazı: JEOL JSM-6335F). Ayrıca SEM analizleri esnasında malzeme yüzeyinde enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS) gerçekleştirilmiştir.

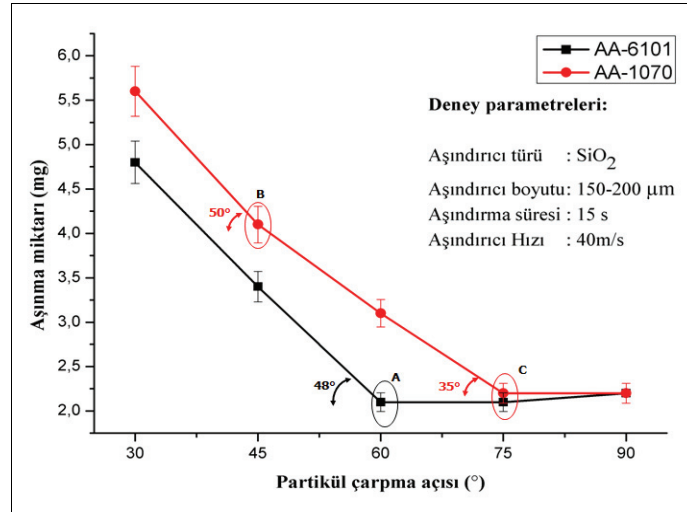
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 4’te çarpma açısına bağlı olarak AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşım malzemelerde ortaya çıkan erozyon miktarlarının grafiği verilmiştir. Erozyon miktarı malzemede ortaya çıkan ağırlık kaybı olarak tanımlanır ve katı partikül erozyonu testleri öncesi ve sonrası malzeme ağırlıklarının farkı

bulunarak hesaplanır. Daha önce bahsedildiği gibi erozyon aşınması; test koşulları, çevresel faktörler, aşındırıcı ve hedef malzeme özellikleri gibi çeşitli faktörlerin etkisi altındadır [26]. Bütün bu faktörlerin tanımlanması malzemelere ait erozyon aşınması davranışları yorumlanırken önem arz eder. Bu yüzden bahsi geçen faktörlere ait bilgiler grafiklerin sağ üst köşesinde verilmiştir. Literatürde malzemeler, erozyon oranının çarpma açısına bağlı olarak değişimine göre sünek, yarı-sünek ve gevrek olarak sınıflandırılırlar. Sünek malzemelerde maksimum erozyon aşınması düşük çarpma açılarında (15° - 30°), gevrek malzemelerde maksimum erozyon aşınması dik çarpma açısında (90°) ve yarı-sünek malzemelerde maksimum erozyon aşınması 45° - 60° çarpma açılarında görülür [3,5,10,11,16,18]. Şekil 4’de hem AA-6101 alaşımının hem de AA-1070 alüminyum alaşımının maksimum erozyon aşınması 30° çarpma açısında gözlenmiş ve malzemeler sünek bir karakteristik göstermiştir [21].

alüminyum alaşımı çarpma açısına bağlı erozyon karakteristiği açısından AA-6101 alüminyum alaşımından farklı bir değişim göstermiştir.

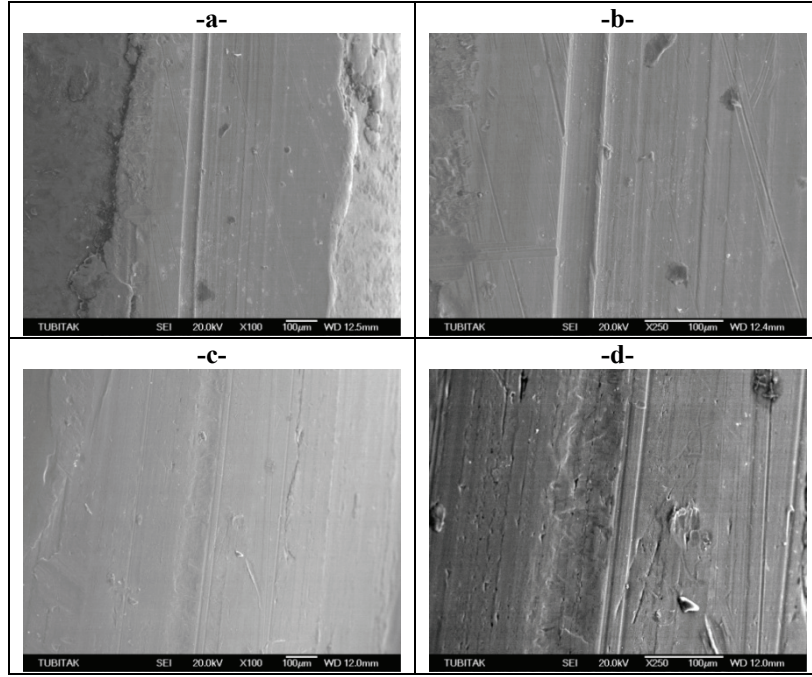
Katı partikül erozyonu sürecinde malzemelerin erozyon aşınması üzerinde baskın erozyon hasar mekanizması tipinin etkisi büyüktür. Bu yüzden erozyon aşınmasına maruz kalan malzemelerin yüzeylerinin, malzemenin erozyon karakteristiklerini çözümlmek adına derinlemesine incelenmesi gerekir. Katı partikül erozyon testleri gerçekleştirilen AA-1070 ve AA-6101 alüminyum alaşımlarının erozyon aşınması davranışlarını ortaya çıkarmak amacıyla yapılan testler sonrası yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Bu incelemelerle ayrıca partikül çarpma açısına bağlı olarak ortaya çıkan baskın erozyon mekanizmalarının bulunması ve tanımlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla her numune için minimum ve maksimum aşınma oranlarının



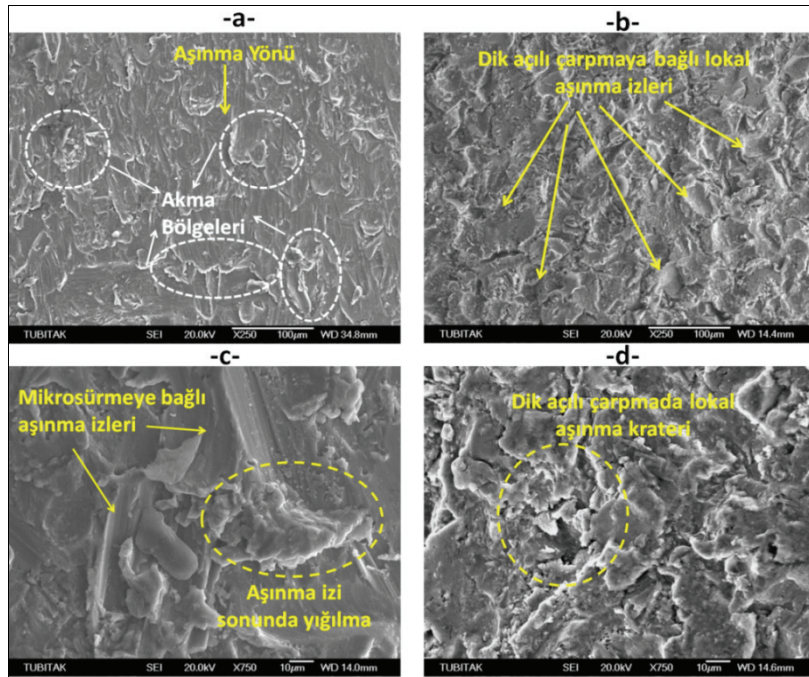
Şekil 4.Farklı çarpma açılarında AA-1070 ve AA-6101 alüminyum alaşımlarının aşınma miktarları karşılaştırması(Comparison of AA-1070 and AA-6101 aluminum alloy erosion rates at different impingement angles)

Her iki malzemenin de erozyon oranları 75° and 90° çarpma açılarında keskin bir düşüş göstermiştir. Her iki malzemenin de 90° çarpma açısındaki erozyon oranları 30° çarpma açısındaki erozyon oranlarının yaklaşık iki katıdır. Aşındırıcı partikülün hedef malzemeye çarpma açısının her iki malzeme açısından da erozyon miktarında büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. İki malzeme arasındaki erozyon miktarı farkı çarpma açısı arttıkça azalmış ve 90° çarpma açısında iki malzemenin erozyon aşınması miktarları neredeyse aynı seviyede olmuştur. Şekil 5 incelendiğinde bütün çarpma açılarında AA-6101 alaşımı AA-1070 alüminyum alaşımına göre daha az aşınma göstererek daha iyi performans sergilediği görülmektedir. AA-6101 alaşımı 30° çarpma açısından başlayarak 60° çarpma açısına kadar erozyon miktarında düşüş trendi izlemiştir (yatay eksenle 48° eğimli), 60° çarpma açısından sonra ise erozyon miktarı yatay bir seyir izlemiştir. AA-1070

ortaya çıktığı 30° ve 90° çarpma açılarındaki yüzeylerin SEM görüntüleri çekilmiştir. Ayrıca numunelerin erozyon aşınma deneyleri öncesinde SEM fotoğrafları çekilmiş ve aşınma ile malzemelerin yüzey morfolojisinde görülen değişimin aşınma öncesi ve sonrası çekilen SEM fotoğrafları karşılaştırılarak ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Şekil 5’de AA-6101 ve AA-1070 alüminyum numunelerinin aşınma deneyleri öncesinde farklı büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7’de ise 30° ve 90° çarpma açılarında erozyon aşınmasına maruz kalmış AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşımlarının yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde her iki malzemenin de yüzeyinde deneyler öncesinde tellerin üretilmesi esnasında meydana gelen çiziklerin mevcut olduğu ancak buna rağmen numune yüzeylerinin genel olarak pürüzsüz olduğu görülmektedir.



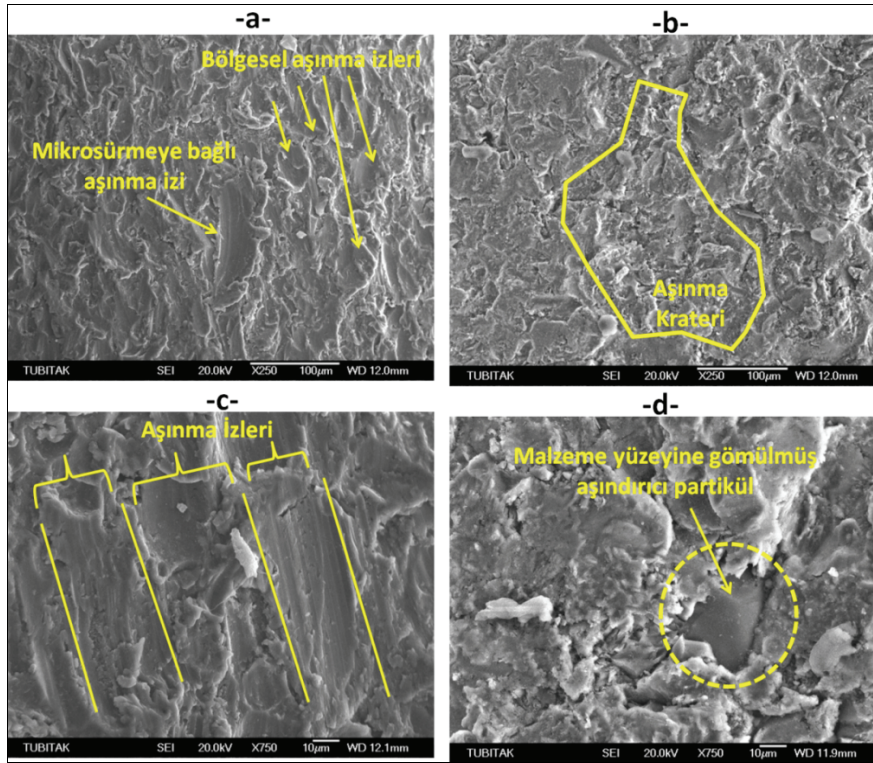
Şekil 5. AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşımlarının aşındırılmamış yüzeylerinin; (a) AA-6101 ($\times 100$), (b) AA-6101 ($\times 250$), (c) AA-1070 ($\times 100$), AA-1070 ($\times 250$) (Uneroded surface SEM images of AA-6101 and AA-1070 aluminum alloys; (a) AA-6101 ($\times 100$), (b) AA-6101 ($\times 250$), (c) AA-1070 ($\times 100$), AA-1070 ($\times 250$)).



Şekil 6. Erozyon aşınmasına maruz kalan AA-6101 alüminyum alaşımının yüzey SEM görüntüleri; (a) 30° çarpma açısında ($\times 250$), (b) 90° çarpma açısında ($\times 250$), (c) 30° çarpma açısında ($\times 750$), (d) 90° çarpma açısında ($\times 750$). (Surface SEM images of AA-6101 aluminum alloy exposed to solid particle erosion; (a) 30° impingement angle ($\times 250$), (b) 90° impingement angle ($\times 250$), (c) 30° impingement angle ($\times 750$), (d) 90° impingement angle ($\times 750$)).

Numunelerin aşınma sonrası yüzey morfolojilerinin verildiği Şekil 6 ve 7 ile Şekil 5 karşılaştırıldığında malzeme yüzeyinde katı partikül erozyonunun yol açtığı hasar ve aşınma çok net bir şekilde görülmektedir. Sünek malzemelerde aşınma olayı, aşındırıcı partiküllerin yer değiştirmesine veya kesme hareketine bağlı malzeme kaybıyla ortaya çıkan bir plastik deformasyon sürecidir [5]. Bu mekanizmalar

mikrokese ve mikrosürme olarak adlandırılırlar ve sünek malzemelerin dar açılarda (15° ve 30°) katı partikül erozyonu ile yüksek miktarda aşınmalarına yol açarlar [23]. Bu mekanizmalar Şekil 6 (a) ve Şekil 7 (a)'da net şekilde görülmektedir. Şekil 6 a ve b' de AA-6101 alaşımının 30° partikül çarpma açısı ile aşındırılması ile malzemenin yüzeyinin partiküller tarafından sürülerek deformasyona uğradığı



Şekil 7.Erozyon aşınmasına maruz kalan AA-1070alüminyum alaşımının yüzey SEM görüntüleri; (a) 30° çarpma açısında ($\times 250$), (b) 90° çarpma açısında ($\times 250$), (c) 30° çarpma açısında ($\times 750$), (b) 90° çarpma açısında ($\times 750$). (Surface SEM images of AA-1070 aluminum alloy exposed to solid particle erosion; (a) 30° impingement angle ($\times 250$), (b) 90° impingement angle ($\times 250$), (c) 30° impingement angle ($\times 750$), (b) 90° impingement angle ($\times 750$).

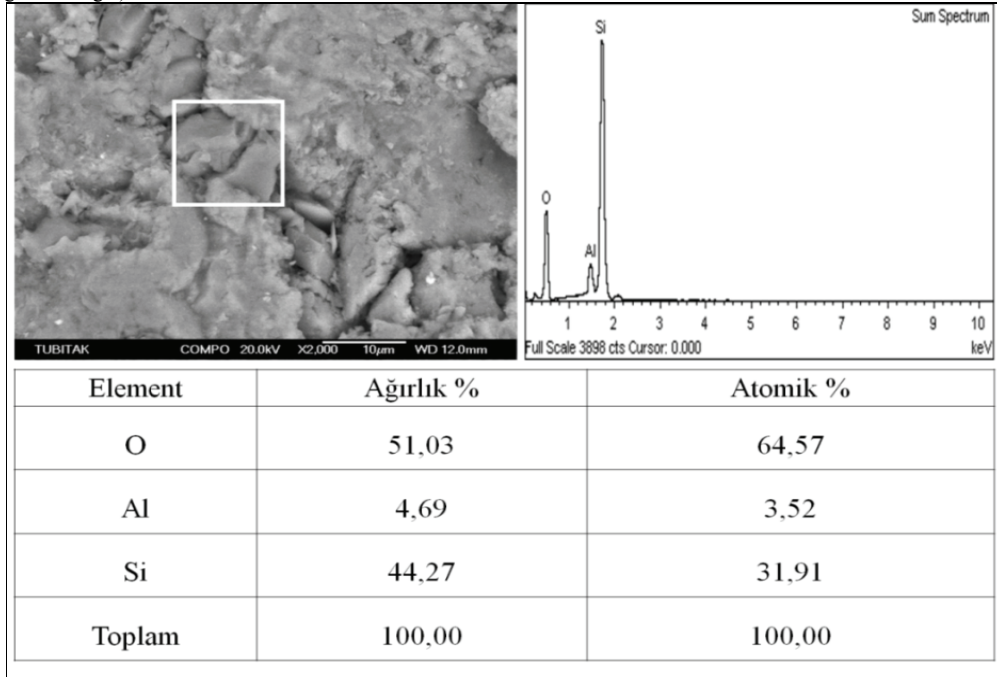
görülmektedir. Mikro-sürme mekanizması ile yüzeyde oluşan aşınma izleri (şekil 6a) ve aşınma izlerinin sonunda malzemenin yığılması (Şekil 6c) net bir şekilde görülmektedir. AA-1070 alaşımı için aynı açılarda benzer aşınma mekanizmaları Şekil 7 c ve d' de SEM görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. AA-1070 ile AA-6101 alaşımlarının 30° çarpma açısında aşındırılan yüzeylerinin SEM fotoğrafları karşılaştırıldığında AA-1070 alaşımında daha derin ve uzun aşınma izlerinin oluştuğu göze çarpmaktadır.

Dik çarpma açısıyla aşındırılmış (90°) numune yüzeylerinde sınırlı aşınma izleri Şekil 6 (b) ve Şekil 7 (b)'de görülmektedir. dik çarpma açısıyla aşındırılmış (90°) numune yüzeylerinde sınırlı aşınma izleri Şekil 6 (b) ve Şekil 7 (b)'de görülmektedir. Aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine dik (90°) çarpması halinde baskın aşındırma mekanizması plastik deformasyon olur ve katı partiküllerin tekrarlı çarpmasına bağlı olarak her yöne doğru çok sayıda çatlak ilerlemesi gözlemlenir [23]. Diğer taraftan gerçekleştirilen deneylerde bu tür baskın hasar mekanizmaları alüminyum alaşımlarının sünek karakteristiğine bağlı olarak efektif malzeme kaybına neden olmamıştır. Bu yüzden 90° çarpma açısında (Şekil 6-b ve Şekil 7-b), 30° çarpma açısıyla karşılaştırıldığında daha az erozyon aşınmasına sebep olan sınırlı oranda aşınma izine ve plastik deformasyona rastlanmıştır [24]. Buna karşın Şekil 6d ve 8b' de partiküllerin malzeme yüzeyine 90° lik açı

ile çarpmaları nedeniyle oluşan derin hasar bölgeleri (aşınma kraterleri) görülmektedir.

Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partiküllerin alüminyum alaşımları gibi sünek hedef malzeme yüzeylerine dik (90°) açılarda çarpmaları halinde malzeme yüzeyine gömüldükleri gözlemlenmiştir (Şekil 7-c). Gerçekleştirilen erozyon testleri sonrası hedef alüminyum alaşımların SEM incelemeleri sırasında enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS) de gerçekleştirilmiş, alaşımların yüzeyine gömülen aşındırıcı partiküllerin görüntülenmesi sağlanmıştır.

Tablo 5'te AA-1070 alüminyum alaşımının SEM görüntüsü ve işaretli alana ait EDS sonuçları verilmiştir. Aşındırılmış AA-1070 alüminyum alaşımının yüzeyine gömülmüş olan aşındırıcı silika partiküllerinin (SiO_2) varlığı, EDS spektrumunda net şekilde gözlemlenen silikon (Si) ve oksijen (O) tepe noktalarıyla kanıtlanmıştır. Şekil 7-b ve Şekil 7-d'de, 90°de aşındırılan yüzeylere gömülen aşındırıcı partiküllere bağlı ortaya çıkan mikroçatlak ve plastik deformasyon bölgeleri gözlemlenmiştir [23]. 90° çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin tekrarlı darbesine bağlı olarak hedef malzeme yüzeyinde pürüzlülükler ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan bu süreç daha önce bahsedilen sünek malzemelere ait erozyon karakteristiğinden ötürü etkin malzeme kaybına yol açmamıştır. Bundan dolayı her iki alaşımda minimum

Tablo 5. 90° çarpma açısında AA-1070 alüminyum alaşımının EDS sonuçları. (EDS result of AA-1070 aluminum alloy at 90° impingement angle)

erozyon aşınması 90° çarpma açısında gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1.) Gerçekleştirilen testler sonrasında bütün çarpma açıları AA-6101 alaşımı AA-1070 alüminyum alaşımına göre daha az aşınma göstererek daha iyi performans göstermiştir.

2.) Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı her iki alüminyum alaşımının da katı partikül erozyon davranışını önemli bir şekilde etkilemiştir. Bu noktada bu malzemelerin enerji hatlarında kullanımında bu parametre göz önünde bulundurulmalı ve bu duruma uygun tasarımlar yapılmalıdır. İletken çıplak olarak hava hatlarında kullanılacaksa büyük çaplı silindirik geometri ile iletkenin üzerine tesir edecek rüzgar, rüzgar ve aşındırıcı partikül tesirleri, kar ve buz yükleri ile oluşan ağır hava koşullarında iletkenin servis ömrünü gerek sünme mekanizmasının tetiklenmesi ve gerekse titreşim dalgaları dolayısıyla tekrarlı çekme ve eğilme gerilmeleri ile kısılacaktır. İşte bu gerekçe ile zorlu coğrafya koşullarında mesela açık rüzgarlı alanlarda, toz bulutlu alanlarda, çok kar ve buz yüküne maruz alanlarda çekilen havai hatlarında trapezoidal (ikizkenar yamuk) biçimli teller kullanılarak dış etkilerin “temas alanının” küçültülerek düşürülmesine çalışılmaktadır. Trapezoidal iletkenler yuvarlak tellerin makine üzerine takılan dairesel kalibreli haddeler kullanılarak imal edilirler. Bunların içinde hava boşlukları yoktur. Biçimlendirilmiş bu iletkenler telleri aslında tel çekme makinelerinden yuvarlak tel olarak çıkarlar ve sonradan bükme makineleri üzerinde dairesel

haddeler ile yüzey basıncı uygulanarak şekillendirilirler. Bu nedenle bu iletkenlerin yüzey gerilmeleri ve aşındırıcı partiküllere davranışları yuvarlak tellerden daha farklı olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle araştırmacılar bu şekilde biçimlendirilmiş iletkenlerin aşındırıcı partiküller altında nasıl davranacaklarını belirlemek için ileriye yönelik çalışmalar yapılmasını planlamaktadır. İleriki çalışmalarda bu yayında elde edilen bulgular ile yeni nesil farklı geometrilere sahip iletken tellerin katı partikül erozyon davranışlarının karşılaştırılması düşünülmektedir.

3.) Taramalı elektron mikroskobu (SEM görüntüleri) ve enerji dağılımlı X-ışını analizleri (EDS) her iki malzemede de farklı partikül açıları etkin olan aşınma mekanizmalarının belirlenmesini sağlamıştır. Her iki malzemede düşük partikül çarpma açıları (30°-45°) mikrosürme ve mikrokesme eroziv aşınma mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşınmıştır. Dik çarpma açıları (75°-90°) ise her iki malzemede mikroçatlaklar ve plastik deformasyona uğramış bölgeler görüntülenmiştir. Ayrıca bu açılarda aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine saplandıkları belirlenmiştir.

4.) AA-6101 ve AA-1070 alaşımlarının SEM fotoğrafları karşılaştırıldığında her iki malzemede de benzer aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Buna karşın AA-1070 malzemede daha derin aşınma izleri olduğu ve aşınmanın daha şiddetli gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum AA-1070 alaşımının aşınma miktarının AA-6101 alaşımına kıyasla daha yüksek olması ile örtüşmektedir.

5.) Türkiye’de şuanda kullanılan ACSR (AA-1070 alaşımı ve çelik tel yapısı) iletkenlerinin 30 yıllık nominal servis ömürleri dolmuştur. Bu araştırmanın test sonuçlarında ispatlandığı üzere AA-6101 alaşımı AA-1070 alaşımından daha iyi bir erozif aşınma direncine sahiptir ve Türkiye içinyeni nesil AAC (AA-6101 alaşımı) iletkenleri son derece önemli bir seçenektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karabay, S., Önder, F.K., "An Approach for Analysis in Refurbishment of Existing Conventional HV-ACSR Transmission Lines with AAAC", **Electric Power System Research**, Cilt: 72, Sayı: 2, 179-185, 2004.
2. Gandhi, B. K., Borse S. V., "Nominal particle size of multi-sized particulate slurries for evaluation of erosion wear and effect of fine particles", **Wear**, Cilt: 257, Sayı: 1-2, 73-79, 2004.
3. Sınmazçelik, T., Sarı, N., "Erodent size effect on the erosion of polyphenylene sulfide composite", **Polymer Composites**, Cilt: 31, Sayı: 6, 985-994, 2010.
4. American Society for Metals, **Friction, Lubrication and Wear Technology**, 18, (ASM handbook), ASM International, 1992.
5. Curkovic, L., Kumic, I., Kresimir, G., "Solid particle erosion behavior of high purity alumina ceramics", **Ceramics International**, Cilt: 37, Sayı: 1, 29-35, 2011.
6. Harsh, A. P., Thakre, A. A., "Investigation on solid particle erosion behavior of polyetherimide and its composites", **Wear**, cilt: 262, Sayı: 7-8, 807-818, 2007.
7. Tewari, U. S., Harsha, A. M., Hager, A.M., Friedrich, K., "Solid particle erosion of carbon fibre-and glass fibre-epoxy composites", **Wear**, Cilt: 63, Sayı: 3-4, 549-557, 2003.
8. Rajesh, J. J., Bijwe, J., Tewari, U. S., Vankataraman, B., "Erosive wear behavior of various polyamides", **Wear**, Cilt: 249, Sayı: 8, 702-714, 2001.
9. Bhushan, B., **Introduction to Tribology**, John Wiley and Sons, New York, USA, 2002.
10. Sınmazçelik, T., Fidan, S., Günay, V., "Residual mechanical properties of carbon/polyphenylene composites after solid particle erosion", **Materials & Design**, Cilt: 29, Sayı: 7, 1419-1426, 2008.
11. Sınmazçelik, T., Taşkıran, İ. (2007), "Erosive wear behavior of polyphenylenesulphide (PPS)", **Materials & Design**, Cilt: 28, Sayı: 9, 2471-2477, 2007.
12. Zhou, J., Bahadur, S., "Erosion-corosion of Ti6Al4V in elevated temperature air environment", **Wear**, Cilt: 186-187, Sayı: 1, 332-339, 1995.
13. Srivastava, V. K., Pawar, A. G., "Solid particle erosion of glass fibre reinforced flyash filled epoxy resin composites", **Composites Science and Technology**, Cilt: 66, Sayı: 15, 3021-3028, 2006.
14. Wensink, H., Elwenspoek, M. C., "A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion", **Wear**, Cilt: 253, Sayı: 9-10, 1035-1043, 2002.
15. Harsha, A. P., Bhaskar, D. P. (2008), "Solid particle erosion behavior of ferrous and non-ferrous materials and correlation of erosion data with erosion models", **Materials & Design**, Cilt: 29, Sayı: 9, 1745-1754, 2008.
16. Oka, Y. I., Ohnogi, H., Hosokawa, T., Matsumura, M., "Impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact", **Wear**, Cilt: 203-204, 573-579, 1997.
17. Molinari, J. F., Ortiz, M., "A study of solid-particle erosion of metallic targets", **International Journal of Impact Engineering**, Cilt: 27, Sayı: 4, 347-358, 2002.
18. Oka, Y. I., Mihara, S., Yoshida, T., "Impact-angle dependence and estimation of erosion damage to ceramic materials caused by solid particle impact", **Wear**, Cilt: 267, Sayı: 1-2, 129-135, 2009.
19. Fang, C.-K., Chuang, T.H., "The effect of humidity on the erosive wear of 6063 Al alloy", **Wear**, Cilt: 236, 144-152, 1999.
20. Ramesh, C.S., Keshavamurthy, R., Channabasappa, B.H., Pramod, S., "Influence of heat treatment on slurry erosive wear resistance of Al6061 alloy" **Materials and Design**, Cilt: 30, 3713-3722, 2009.
21. Tu, J.P., Pan, J., Matsumura, M., Fukunaga, H., "The solid particle erosion behaviour of Al₁₈B₄O₃₃ whisker-reinforced AC4C al alloy matrix composites", **Wear**, Cilt: 223, 22-30, 1998.
22. Desale, G. R., Gandhi, B. K., Jain, S. C., "Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063)", **Wear**, Cilt: 266, 1066-1071, 2009.
23. Das, S., Mondal, D. P., Sawla, S., "Solid particle erosion of Al alloy and Al-alloy composites: Effects of heat treatment and angle of impingement" **Metallurgical and Materials Transactions A**, Cilt: 35A, 1369-1379, 2004.
24. Cousens, A. K., Hutchings, I. M., "A critical study of the erosion of an aluminium alloy by solid spherical particles at normal impingement" **Wear**, Cilt: 88, 335-348, 1983.
25. Alcan Aluminium Africa and Middle East Ltd., **Aluminium alloy tables (7th edition)**, Alcan, 1982.
26. Sahin, Y., Durak, O., Abrasive wear behavior of austempered ductile iron, **Materials & Design**, Cilt: 28, Sayı: 6, 1844-1850, 2007.