VI. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
28-30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

UHUK-2016-154

HELİKOPTER PALİ AŞINMA KALKANINDA MEYDANA GELEN KATI PARÇACIK EROZYONUNUN İNCELENMESİ İÇİN BİR TEST DÜZENEĞİ TASARIM VE İMALATI

Doğan ACAR[1] Dursun MERİÇ[2] Hasan SOFUOĞLU[3] Recep GÜMRÜK[4] Ömer Necati CORA[5]
Hasan GEDİKLİ[6]

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ÖZET

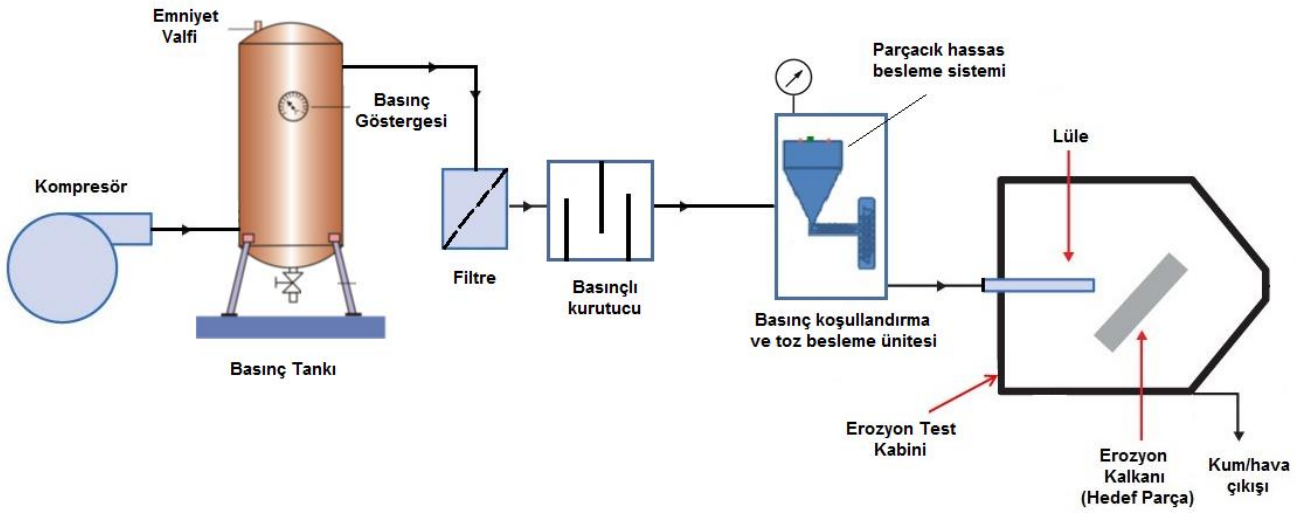
Hava araçlarının maruz kaldığı erozyon büyük maddi kayıplara ve servis kesintilerine yol açan önemli bir problemdir. Helikopter ve uçak motorlarının gaz türbin kanatçıkları, yakıt depoları, mühimmatlar, uçak motorlarındaki kompresörlerin yanı sıra helikopter pallerinde de karşılaşılan katı parçacık erozyonu, yüksek bakım ve yedek parça maliyetini de beraberinde getirmektedir. Helikopter pallerindeki bu aşınmanın en aza indirilmesi için farklı yöntemler uygulanmakla beraber, son zamanlarda aşınma kalkanı (erosion shield) olarak adlandırılan ve nikel ve alaşımlarından üretilen bir koruyucu malzeme, palde aşınmanın en yoğun olarak karşılaşıldığı uç kısma tatbik edilmektedir. Bu çalışma öncelikli olarak, bir helikopter palinde, katı parçacık erozyonuna maruz kalan farklı numunelerin aşınma performanslarının incelenmesi için bir test düzeneğinin tasarım ve imalatını hedeflemektedir. İlgili standarda uygun olarak tasarlanan ve üretilen test sistemi ile helikopter palinde kullanılan aşınma kalkanı numuneleri için erozyon testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

GİRİŞ

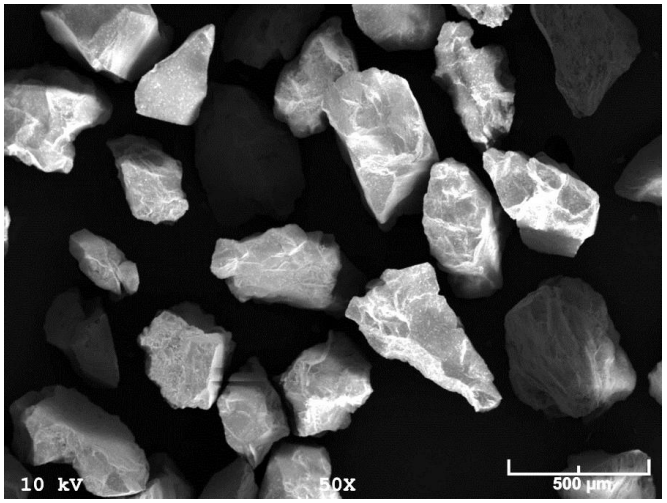
Katı parçacık erozyonu, küçük boyutlu katı veya sıvı parçacıkların bir yüzey üzerine tekrarlı olarak çarpmaları sonucu oluşan ve zamana bağlı olarak ilerleyen malzeme kaybıdır. Çarpma sırasında, bölgesel olarak akma gerilmesi aşılır ve çarpmanın gerçekleştiği bölge etrafında plastik deformasyon meydana gelir. Tekrarlı çarpmalardan sonra aşınan yüzeyin yakınında plastik deformasyona maruz kalmış bir yüzey tabakası oluşur ve bunun bir sonucu olarak şekil değiştirme sertleşmesi nedeniyle malzemenin akma mukavemeti artar. Malzeme yüzeyinde akma mukavemetinin artışı kırılma mukavemetine ulaşılıncaya kadar devam eder. Bu noktadan sonra malzeme yüzeyinde artık daha fazla plastik deformasyon gerçekleşemez ve malzeme yüzeyi gevrekleşerek yüzeyden parça kopuşları başlar. Helikopter palinde, bu aşınma etkisinin en aza indirilmesi için Ni esaslı alaşımlar palin uç kısmına uygulanmaktadır. Bu uygulama, aşınma kalkanı (erosion shield) olarak adlandırılmaktadır ve kompozit yapıdaki pal ana malzemesinin aşınmasını önlemektedir. Literatürde katı parçacık erozyonuna yönelik olarak iki standart mevcuttur: ASTM G76-13, ASTM F1864-05. Ancak bu standartlar, özellikle helikopterin iniş kalkış sırasında meydana gelen koşulları temsil etmemektedir. Bu ihtiyaca binaen Amerika askeri standardı MIL-STD-3033 oluşturulmuştur. Bu standart, ayrıntılı bir şekilde helikopter palinin maruz kaldığı erozyonun benzetimi için takip edilmesi gereken metodolojiyi tanımlamaktadır. Örneğin; testlerde kullanılacak tozların boyutu 240-550 µm aralığında, keskin köşeli, testten en az 24 saat önce 23 °C ve %50 nem koşullarında tutulmuş ve sadece bir kez kullanılacak kuvarz kumu olmalıdır.

[1] Araş. Gör., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl., e-posta: dgnacar@ktu.edu.tr
[2] Öğr. Gör., Abdullah Kanca MYO, Makine ve Metal Tek. Böl., e-posta: dmeric@ktu.edu.tr
[3] Prof. Dr., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl., e-posta: sofuoglu@ktu.edu.tr
[4] Yrd.Doç.Dr., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl., e-posta: rgumruk@ktu.edu.tr
[5] Yrd.Doç.Dr., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl., e-posta: oncora@ktu.edu.tr
[6] Doç.Dr., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Böl., e-posta: hgedikli@ktu.edu.tr

Bunun yanı sıra, helikopterlerin çöl vb. ortamlardaki iniş ve kalkış durumlarını temsil edebilmesi amacıyla kumlar test numunesi yüzeyine 225 ± 10.6 m/s (730 ± 30 ft/s) hız ile çarptırılmalıdır. Yine aynı standarda göre, kum tanecikleri yaklaşık 3 mm çapındaki bir lüleden geçirilerek hızlandırılmalıdır. Bu ve standartta belirtilen diğer hususlara uygun bir şekilde tasarlanan ve imal edilen test sisteminin şematik görünümü Şekil 1'de; testlerde kullanılan kuvarz kumunun SEM görüntüsü ise Şekil 2'de verilmiştir. Kum taneciklerinin, standartta belirtilen özelliklere uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 1: Katı parçacık erozyon test sisteminin şematik gösterimi



Şekil 2: Erozyon testinde kullanılacak kuvarz kumun SEM görüntüsü

Katı parçacık erozyonunda etkili olduğu bilinen sıcaklık, çarpışma hızı, parçacık boyutu, çarpışma açısı ve hem aşınan hedef malzeme ve hem de aşındırıcı parçacıkların yüzeyindeki mikro yapı gibi farklı parametrenin etkisini anlamak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [Gat ve Tabakoff, 1978; Andrews ve Field, 1982; Sundararajan ve Roy, 1997; Lopez vd., 2005; Bousser vd., 2013; Islam ve Farhat, 2014]. Her bir aşınma parametresinin kendine özgü etkilerinin yanısıra birlikte oluşturdukları karmaşık etkiler de söz konusudur [Head ve Harr, 1970; Evans ve Wilshaw, 1976; Stack ve Pungwiwat, 2002; Dhar vd., 2005; Wood, 2006; Wang ve Yang, 2008]. Bu parametrelerden, çarpışma hızı ve açısı kritik öneme sahiptir [Okonkwo vd., 2015; Lindsley ve Marder, 1999].

Lindsey vd., çalışmalarında farklı parçacık hızları ve aşınma oranlarının 70-30 pirinç ve Fe-C martenziti alaşımlarının aşınma davranışları üzerine etkilerini incelemişler. Çalışmalarının sonucunda aşınma oranının parçacık hızına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca martenzit malzeme çatlayarak aşınırken, pirinç malzemenin plastik deformasyon etkisi ile aşındığını ortaya koymuşlardır [Lindsey vd., 1999]. Matsumara vd., silika kum parçacıklarının farklı çarpışma açılarında 304 paslanmaz çelik hedef malzeme yüzeyine çarpmasına bağlı olarak yüzeyde meydana gelen hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Maksimum erozyon oranı hızı (maximum erosion rate) 30º - 50º çarpışma açıları arasında elde edilmiştir [Matsumara vd., 1991]. Finnie vd., sünek malzemeler için maksimum aşınma oranının 15º ile 40º arasında gerçekleştiğini rapor etmişlerdir [Finnie vd., 1960]. Öte yandan, Stackwick ve Batchelor, gevrek malzemeler için erozyon ve erozyon hızının artan çarpışma açısı ile arttığını ve maksimum değerine 90º 'de ulaştığını belirtmişlerdir [Stackwick ve Batchelor, 2011]. Islam vd., X42 çeliği üzerinde erozyon testleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, düşük abrasif besleme hızında erozyon hızı artan çarpışma hızı ile azaldığını göstermiştir. Parçacık hızı arttırıldıkça erozyon hızı da artmıştır [Islam vd., 2014]. Okonkwo vd., boru hatlarında kullanılan AISI 1018 çeliğinin erozyon mekanizmaları üzerinde çarpışma açısı ve hızının etkisini incelemiştir[Okonkwo vd., 2015]. Çalışma sonucunda, 90º'lik açıda kazıma (ploughing) mekanizması etkili iken düşük çarpışma açılarında kesme (cutting) mekanizmasının etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca artan çarpışma hızları ile gerçekleşen kütle kaybı ve erozyon oranında da artış gözlenmiştir.

Erozyon sırasında aşındırıcı parçacıkların hedef malzemeye çarpması esnasındaki mekanizmanın erozyonun gerçekleşmesinde önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Birçok çalışmada çelik malzemelerin erozyon mekanizmaları raporlanmıştır [Finnie, 1958; Forder vd., 1998; Desale vd., 2006; Al-Bukhaiti vd., 2007; Al-Bukhaiti vd., 2009; Forero vd., 2014]. Ancak erozyon mekanizması hala karmaşık bir olaydır ve henüz tam anlamıyla anlaşılamamıştır. Al-Bukhaiti vd., AISI 1017 ve kır dökme demir ile farklı açılarda gerçekleştirdiği testler sonucunda farklı erozyon mekanizmaları belirlemişlerdir [Al-Bukhaiti vd., 2007]. Islam vd. API X42 çeliğinin katı alüminyum oksit parçacıkları ile çarpışması sonucunda kazıma (ploughing), kırılma (fracture) ve kesme (metal cutting) mekanizmalarının erozyon üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [Islam vd., 2014]. Okonkwo ve Mohamed, bir başka çalışmalarında, AISI 1018 ve API X42 çelik malzemelerinin normal çarpma açısındaki erozyon mekanizmalarını incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda, erozyon mekanizmasının aşındırıcı parçacık hızına ve malzemeye bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirlemişlerdir. 20 m/s ile 80 m/s hızlar arasında hız değiştikçe farklı erozyon mekanizmaları gözlemlenmiştir [Okonkwo ve Mohamed., 2014]. Bu çalışma ile helikopter palinin gerçek çalışma koşullarında maruz kaldığı erozyonu temsil edebilecek ve literatürde fazla yer almamış bir test sisteminin tasarım ve imalatı ile doğrulama testlerinin yapılması hedeflenmiştir.

TEST DÜZENEĞİNİN TASARIMI ve İMALATI

Aşınma Test Düzeneğinin Tasarımında Esas Alınan Standartlar

Hedeflenen helikopter pali testlerinin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için, imalatı gerçekleştirilen aşınma test düzeneğinin, helikopterin özellikle tozlu/kumlu ortamlarda iniş-kalkış esnasında maruz kaldığı ortam koşullarını (parçacık çarpma hızı ve açısı; toz boyutu, geometrisi vb.) yansıtacak şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Bu durum dikkate alınarak yapılan araştırmalarda kum erozyonunun test edilmesinde, ASTM G76, ASTM F1864 ve MIL-STD-3033 standartlarının ön plana çıktığı görülmüştür.

ASTM G76 standardı katı parçacık çarpması ile meydana gelen erozyonun test edilmesi hususunda en yaygın olarak kullanılan test standardıdır. Bu standart, birçok malzemeye uygulanabilir iken, testin kalibre edilebilmesi amacıyla 10x30x2 mm boyutlarındaki AISI 1020 malzemesini referans olarak ele almıştır. Hedef yüzeyin, test öncesi ortalama pürüzlülük değerinin 1 mikrondan düşük olması istenirken, sertlik değeri 70±2 Rockwell B olmalıdır. Aşındırıcı parçacık olarak ortalama 50 µm boyutlarında (Toz dağılımı: %50'si 42-50 µm - %50'si >48 µm) alümina kullanılmalıdır. Alümina parçacıkları hedef yüzeye 90° açı ile çarptırılırken, çarpışma hızı 30-70 m/s arasında değişim gösterebilmektedir.

ASTM F1864 standardı ise, daha çok optik ve kızıl ötesi şeffaf malzemeler ile kaplamaların toz erozyonu için düzenlenmiş bir standarttır. Testlerde 25,4 - 152 mm (1-6”) kesitli numuneler kullanılır. Aşındırıcı parçacık olarak, 10-250 µm boyutlarında homojen dağıtılmış silika tozlar kullanılmaktadır. Aşındırıcı parçacıkların hedef yüzeye çarpma hızları yine ASTM G76’da belirtildiği gibi 30-70 m/s arasında değişmektedir.

Ancak yukarıda bahsi geçen her iki aşınma testi standardı, her ne kadar malzemelerin aşınma testlerinde yaygın olarak kullanılsa da helikopter vb. hava araçlarının iniş-kalkışlarında meydana gelen koşulları yansıtmamaktadır. Bu nedenle, 2012 yılında Army Research Laboratory tarafından helikopter palinde kullanılan aşınma kalkanının aşınma testlerini daha gerçekçi olarak gerçekleştirmek amacıyla bir çalışma yürütülerek MIL-STD-3033 standardı oluşturulmuştur. Bu standart kapsamında takip edilmesi gereken prosedür detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Örneğin; testlerde kullanılacak tozlar, 240-550 mikron boyut aralığında, keskin köşeli, testten en az 24 saat önce 23 °C ve %50 nem koşullarında tutulmuş ve sadece bir kez kullanılacak kuvarz kumu olmalıdır. Ayrıca, helikopterin çöl vb. ortamlardaki iniş-kalkış koşullarının tam olarak temsil edilebilmesi için, kum tanecikleri 3 mm çapındaki bir lüleden geçirilerek hedef yüzeye 225 ± 10.6 m/s (730 ± 30 ft/s) hız ile çarptırılmalıdır.

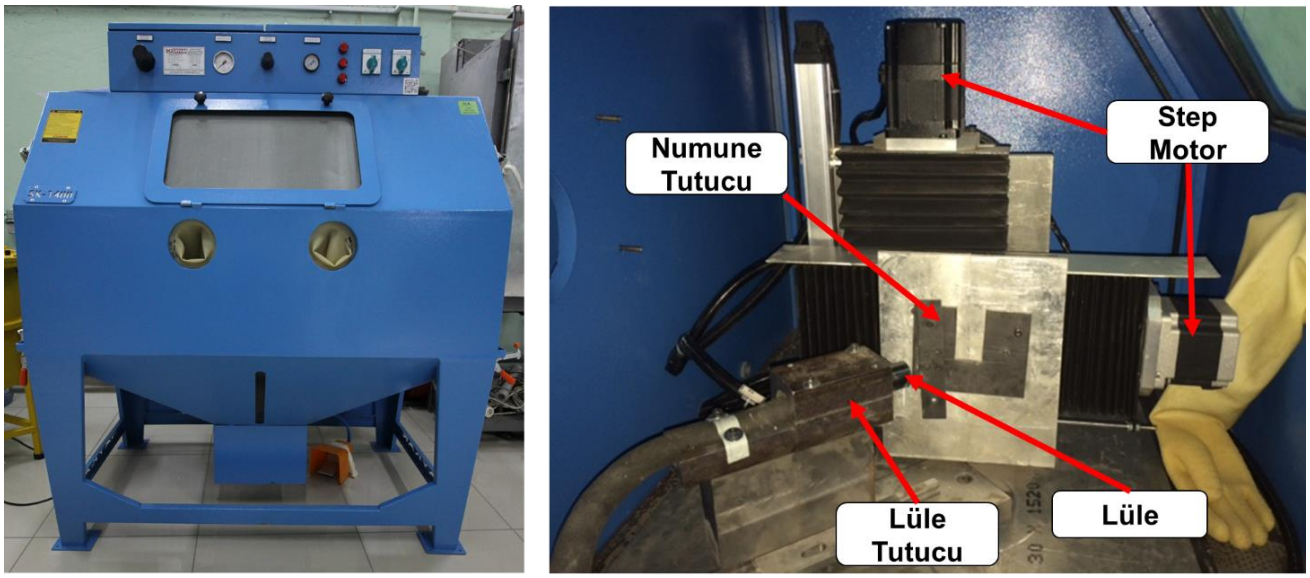
KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü’nde gerçekleştirilen aşınma test düzeneğinin imalatında ilgili üç standart da dikkate alınmıştır.

Aşınma Test Düzeneğinin Bileşenleri

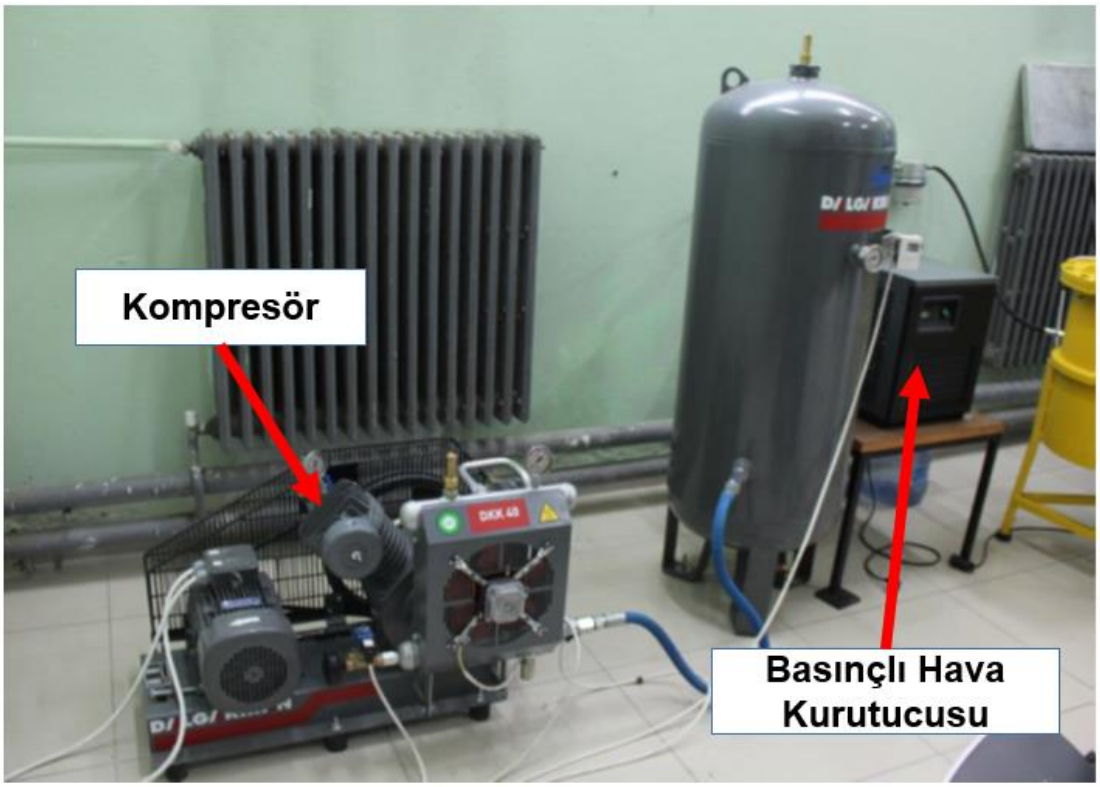
Test düzeneği helikopterin iniş-kalkış esnasında meydana gelen koşulları oluşturmak amacıyla farklı sistemlerden oluşmaktadır. Bu elemanların başında ise, içerisinde erozyon testlerinin gerçekleştirileceği test kabini gelmektedir (Şekil 3-a). Erozyon testleri gerçekleştirilirken hedef parçacığın sabit durmak yerine düşey ve yatay eksenlerde belirli hızlarla hareket etmesi istenmektedir. Böylelikle, aşındırıcı parçacıkların hedef yüzeyi daha homojen bir şekilde taraması ve aşındırması sağlanmaktadır. ASTM F 1864 standardına göre hedef parça, yatayda 0-30 çevrim/dk, düşeyde ise 0-4 çevrim/dk öteleme yapabilmelidir. Bu amaca uygun olarak tasarlanan step motor tahrikli, iki eksenli lineer vidalı platform Şekil 3-b’de görülmektedir. Bu platform, erozyon test sistemi kabininin içerisinde aşındırıcı parçacıkların püskürtüldüğü lülenin (nozzle) tam karşısına yerleştirilmektedir. Standartlara göre tasarlanan bu platform, hedef parçanın (aşınma kalkanı) farklı çarpma açılarında teste tabi tutulmasına da olanak sağlamaktadır.

Kum parçacıklarının gerçek ortamdaki helikopter paline çarpma hızlarına ulaşabilmek için 40 bar basınç kapasiteli pistonlu hava kompresörü (DKK 40, Dalgakıran Kompresör, İstanbul, Türkiye) kullanılmaktadır. Kompresörün çıkışına tozların parçacıklarının koşullandırılmasını (neminin alınması) sağlamak amacıyla bir basınçlı hava kurutucu da (DryAir DK 38, Dalgakıran Kompresör, İstanbul, Türkiye) eklenmiştir (Şekil 4).

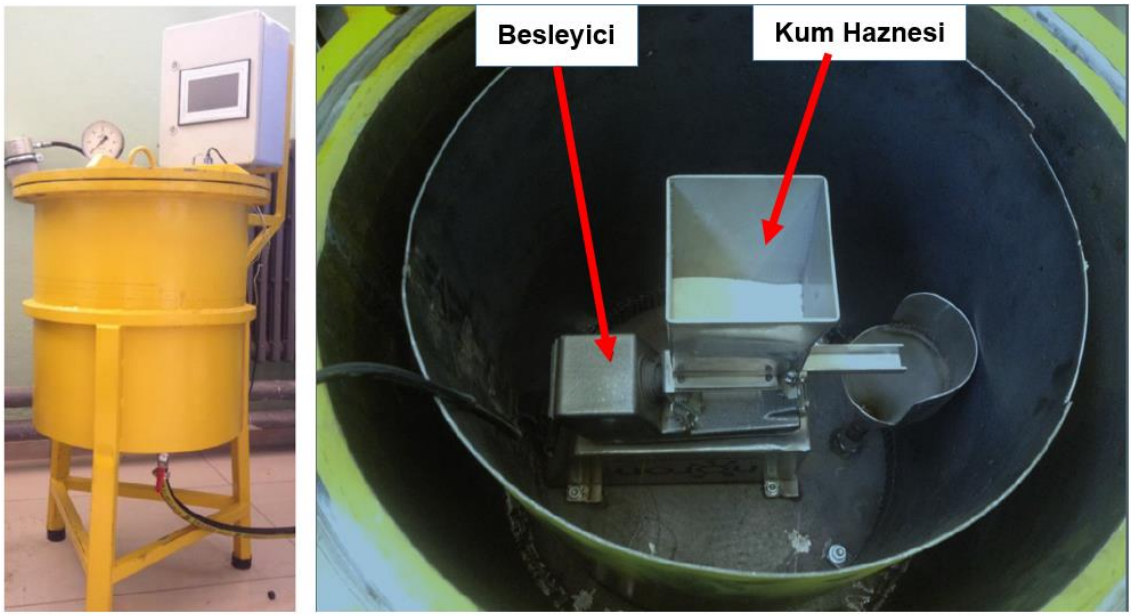
Erozyon testleri sırasında kullanılacak aşındırıcı parçacıkların yeterli basınç veya hız ile aşınma kalkanına yönlendirilebilmesi için, sistemi besleyen bu parçacıkların kontrolünün çok hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. ASTM F1864 standardına göre bu değer 0.2 g/dk kadar küçük bir değer de olabilmektedir. Bu amaçla standartlardaki hassasiyet değerleri dikkate alınarak, manyetik etki ile çalışan hassas bir dozajlama sistemi (besleyici) özel olarak imal ettirilmiştir. Hassas dozajlama sistemi, basınç kaybının yaşanmaması amacıyla test sisteminde kompresöre bağlı basınçlı hava kurutucudan hemen sonra yer alan basınçlı koşullandırma ünitesi içerisine Şekil 5’te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3: a) Erozyon testlerinin gerçekleştirildiği test kabini, b) Numune ve lüle tutucunun yerleştirildiği step motor tahrikli lineer hareketli platform



Şekil 4: a) Erozyon test sisteminde kullanılan kompresör ve basınçlı hava kurutucu



Şekil 5: a) Basınçlı koşullandırma ünitesi, b) Ünite içerisindeki aşındırıcı parçacık hassas besleme elemanları



Şekil 6: ASTM G76 ve MIL-STD-3033 standartlarına uygun lüleler

Aşındırıcı parçacıkların hedef parçaya çarptırılmasında lüleler kullanılmaktadır. MIL-STD 3033 standardında aşındırıcı parçacıkların 3.175 mm (1/8”) çapındaki bir lüleden geçerek hedef yüzeye çarptırılması istenirken, ASTM G76 standardı ise lülenin 1/16 (1.5875 mm) çapında ve parçacıkların en azından 50 mm uzunluğundaki bir lüleden geçerek aşındırılacak malzemeye çarptırılmasını şart koşmaktadır. Testlerde kullanılacak lüleler, farklı çaplarda 6 farklı tip olarak tedarik (AlfaTech Makina Mümessillik San. ve Dış Tic. Ltd. Şti, İstanbul) edilmiştir (Şekil 6). Yukarıda kısaca belirtildiği şekilde tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen test düzeneğinin genel bir görünümü Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 8’de ise kum besleme hızı, test kabini ve koşullandırma ünitesi basıncının hassas bir şekilde kontrol edilebildiği kontrol paneli görülmektedir.



Şekil 7: Erozyon test sisteminin genel görünümü



a) b)

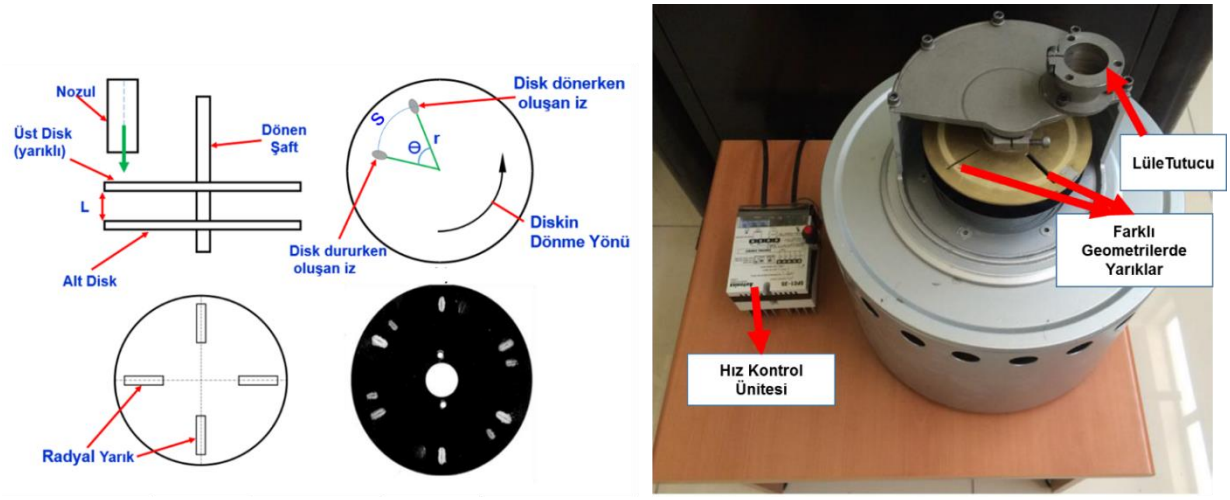
Şekil 8: a) Erozyon test kontrol paneli, b) Kontrol paneli ara yüzü

YAPILAN ÇALIŞMALAR ve İRDELEME

Çift-Disk Yöntemi, Tasarımı ve Hız Ölçümleri

Aşınma testlerinde temsili durum hızlarına ulaşmak kadar bu hızların ölçülmesi/doğrulanması da önemlidir. Bu amaçla, aşınma testinde kullanılan toz parçacıklarının hızının belirlenmesinde literatürde önerilen dönen çift-disk yöntemi kullanılmıştır [Ruff ve Ives., 1975]. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 9-a'da verilmiştir. Sistem aynı açısal hızla dönen iki diskten oluşmaktadır.

Birinci diskin üzerinde hızı ölçülecek olan parçacığın ikinci diske nüfuz etmesine ve bir darbe (iz) oluşturmasına müsaade eden yarıklar bulunmaktadır. Diskin boyutlarının ve açısal hızın bilinmesi sayesinde, parçacıkların ortalama hızı, ikinci diskteki referans ize göre belirli bir mesafede (s) bulunan (çarpan) parçacıkların oluşturduğu iz tarafından belirlenebilmektedir.



Şekil 9: a) Çift disk yönteminin şematik gösterimi, b) imalatı yapılan çift-disk hız ölçüm sitemi [Bağcı., 2010'dan sonra]

Şekil 9-a'da görüldüğü gibi referans olarak oluşturulan iz geometrisi ve disklerin dönüşü sırasında çarpan parçacıkların oluşturdukları iz arasındaki mesafe hem doğrusal hem de açısal olarak ölçülebilmektedir. Bu durumda S ile gösterilen iki iz arasındaki eğrisel mesafe ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla elde edilmektedir:

$$Vp = L/t \tag{1}$$

$$S = \theta * r = (\omega * t) * r \tag{2}$$

Ruff ve Yves, parçacık hızını belirlemek için S izler arası eğrisel mesafesi kullanılarak oluşturulan bağıntıyı (Denklem 3) kullanmışlardır.

$$Vp = \frac{w*rx*L}{S} = (2 * \pi * n * r * L)/(60 * S) \tag{3}$$

Burada;

S: Erozyon izleri arası mesafe

θ: Açısal yer değiştirme

r: Erozyon izlerinin ortalama yarıçapı

ω: Disklerin açısal hızı

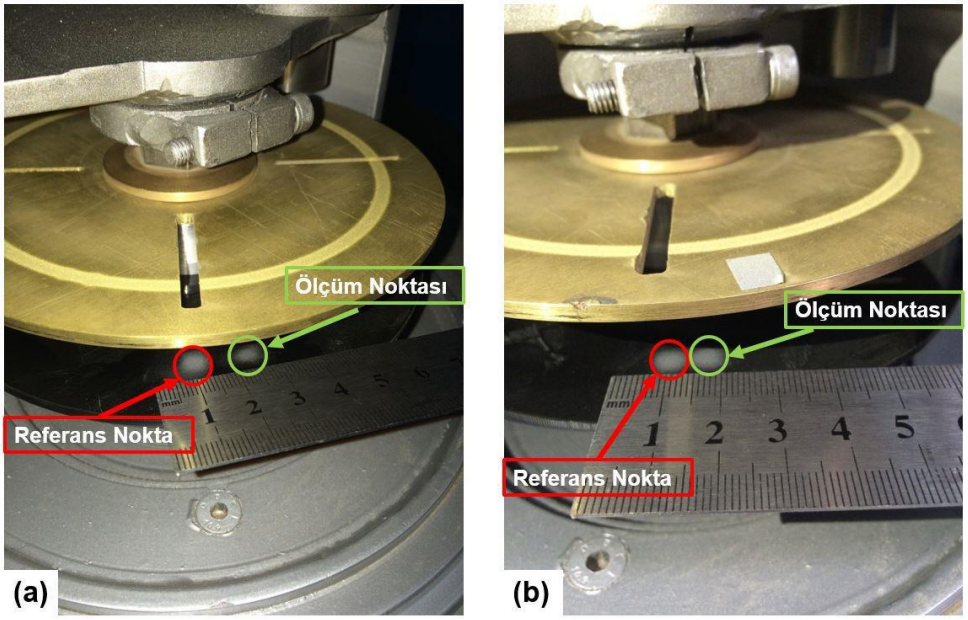
t: Aşındırıcı parçacıkların üst diskten geçip alt diske ulaşması için geçen zaman

n: Disklerin devir sayısı

L: Diskler arası mesafe

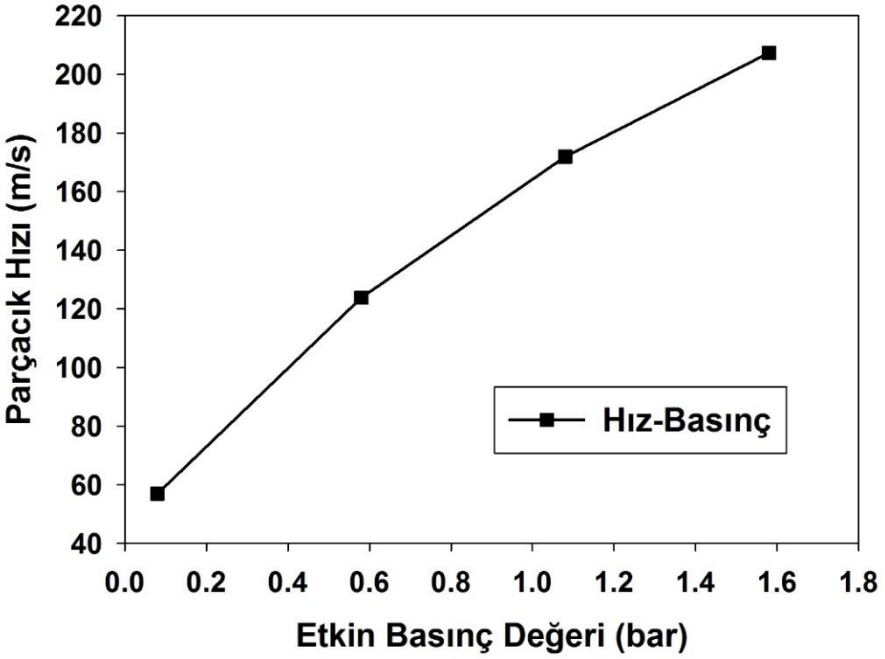
Vp: Aşındırıcı parçacıkların çarpma hızı

Çift-disk hız ölçüm sistemi, maksimum hızı 16000 d/dk olan bir elektrik motoru, iki disk ve hız kontrol ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 9-b). Birinci disk üzerinde birbirine göre 90° açıyla açılmış 4 adet yarık mevcuttur. İkinci disk ise üzerindeki referans izin ve hızı ölçülecek parçacıkların oluşturduğu izin kolay görünmesinin sağlamak amacıyla siyah pleksiglas malzemeden seçilmiştir. Diskler arası mesafe, farklı hız ve toz boyutlarında hız ölçümünün daha verimli yapılabilmesi amacıyla literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak 20 mm olarak belirlenmiştir [Fry vd., 2014]. Hız kontrol ünitesi kullanımıyla, disklerin sabit devir sayısında dönmesi sağlanarak parçacıklar tarafından oluşturulan iz geometrisindeki saçılmaların önüne geçilmekte ve hız ölçümünün daha hassas gerçekleştirilmektedir. Birinci diskte yer alan farklı geometrilere sahip yarıklar sayesinde farklı toz boyutlarında ve farklı hızlarda farklı iz geometrileri oluşmaktadır. Böylece iz geometrileri ile referans iz arasındaki mesafeler denklem 2 ve 3 kullanılarak parçacıkların hızı, izler arası mesafeye göre elde edilmekte ve ölçülen hız değerinde oluşabilecek hata oranı azaltılmaktadır.



Şekil 10: Çift-disk yöntemi ile gerçekleştirilen hız ölçümlerinde izler arası mesafeler, a) 1 bar basınçta, b) 2 bar basınçta

Şekil 10-a ve b'de sırsıyla 1 ve 2 bar basınçta disk üzerine gönderilen tozların hız ölçümleri görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi farklı basınçlarda izler arası mesafe farklıdır. Toz izleri arasındaki mesafenin ölçümü ve denklem 4 yardımıyla parçacık hızları hesaplanmıştır. Şekil 11'de bu yöntem ile elde edilen basınç-hız eğrisi verilmiştir.



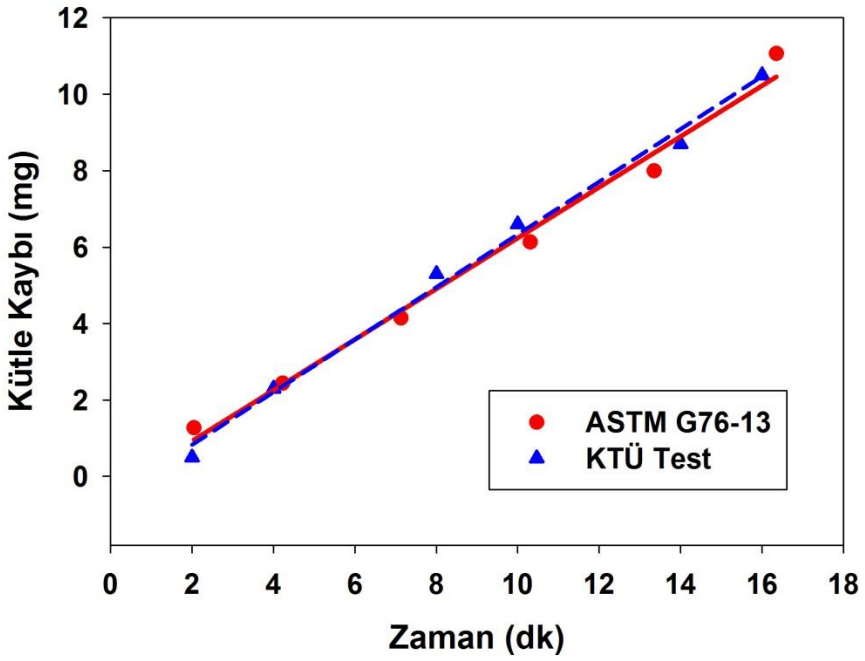
Şekil 11: Parçacık hızı-hava basıncı değişimi (240 grid toz kullanımı ile)

Erozyon Aşınma Testleri

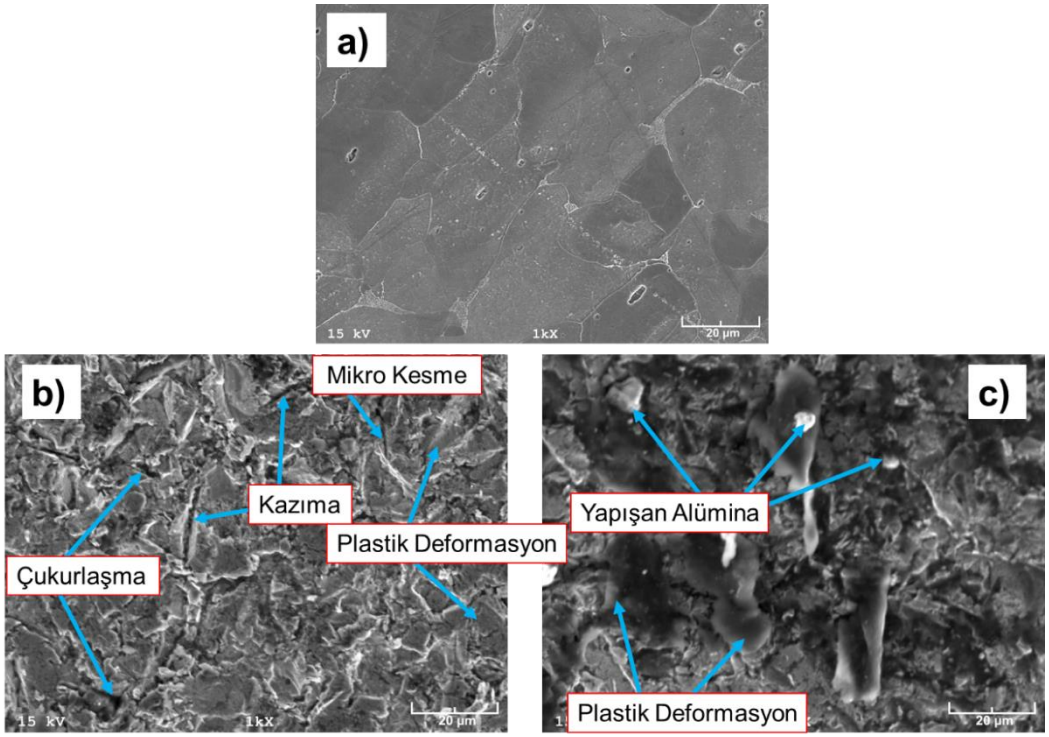
Aşınma test sisteminin işlerliğini test etmek ve literatürdeki bazı deneysel çalışmalarla tutarlılığını teyit etmek amacıyla bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla test numunelerinin hazırlanmasına dair prosedür aşağıda detaylandırılmıştır.

Testlerde aşındırıcı katı parçacık olarak alüminyum oksit seçilirken, aşınan hedef malzeme olarak AISI 1020 alınmıştır. Erozyon testinde kullanılan numunelerin boyutları AISI 1020 için 25x25x5 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler, EDM ve kesici disk kullanılarak son boyutlarına getirilmiştir. Kesme işleminin ardından, AISI 1020 çeliğinden numuneler 760 ºC sıcaklıkta 15 dakika boyunca ısıl işleme tabi tutulduktan sonra oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılmıştır. Sertlik ölçümü için AISI 1020 çeliğinden alının numune bakalite alınarak yüzey parlatma işleminden sonra sertlik ölçümleri yapılmış ve ortalama sertlik değeri 65.1 Rockwell-B (HRB) olarak tespit edilmiştir. Böylelikle, AISI 1020 numuneler için ASTM G76 standardında belirtilen sertlik değerlerine (HRB=70±2) yakın değerler elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri Tablo 1'de verilmiştir. Ardından tüm numunelerin (AISI 1020) yüzeylerine sırasıyla 400, 600, 1000 ve 1200-grit SiC zımparalama uygulanmıştır. Zımparalanan numuneler, trichloro-ethylene çözeltisi içerisinde ultrasonik temizleme ile temizlendikten sonra 0.00001g hassasiyetteki vakumlu bir hassas terazi yardımıyla tartılmış ve test öncesi ağırlıkları kaydedilmiştir. Katı parçacık erozyonu testi için nominal boyutu 75 μm olan Al_2O_3 toz parçacıkları kullanılmıştır.

ASTM G76 standardında referans olarak gösterilen erozyon testi koşulları takip edilerek testler gerçekleştirilmiş ve elde edile sonuçlar yine bu standartta AISI 1020 hedef malzemesi için verilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 12). Bu şekilden de görülebileceği üzere, elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. Aradaki farkların parçacık hızı, boyutu ve hedef malzeme sertliğinin standartta verilen değerlerle birebir örtüşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 12: Erozyon test sistemi ile gerçekleştirilen test sonuçlarının ASTM G76 standardında verilen sonuçlarla karşılaştırılması



Şekil 13: Aşınma testi öncesi ve sonrası SEM görüntüleri karşılaştırılması (1000X), a) aşınma öncesi yüzey görünümü, b) krater merkezi, c) aşınma bölgesi kenarı

Testler sonucunda numuneler, metalografi mikroskobu ve tarama elektron mikroskobu altında incelenerek erozyon mekanizmaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 13-a'da aşınma testi öncesi AISI 1020 numunenin yüzey görüntüsü verilmiştir. Aşınma testi öncesi tane sınırları ve taneler net bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 13-b'de aşınma testi sonrasında aşınma sonucunda oluşan krater merkezi görülürken, Şekil 13-c'de krater kenarı verilmiştir. Bu şekillerden de görülebileceği üzere AISI 1020 malzemenin aşınmasında çukurlaşma (pitting), kazıma (ploughing) ve plastik deformasyon mekanizmaları etkili olurken krater kenarında ağırlıklı olarak plastik deformasyon ön plana çıkmaktadır. Aynı zamanda, krater kenarında bazı aşındırıcı parçacıkların (alümina) hedef yüzeye yapıştığı tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışma ile helikopter pali üzerine uygulanan ve katı parçacık erozyonuna maruz kalan aşınma kalkanı malzemesinin tasarımı ve performans değerlendirmesi için gerekli teknolojik alt yapı ve bilgi birikiminin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak, erozyon aşınma test düzeneği tasarımı ve imalatı literatürdeki ilgili standartlar (ASTM G76, ASTM F1864 ve MIL-STD-3033) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Test sisteminin güvenilirliğini test etmek için ilk olarak ASTM G76 standardına uygun olarak yapılan testlerin sonuçları ilgili standarttaki veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumluluğu gözlemlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalar, helikopter palinde aşınma kalkanı olarak kullanılan malzemeler (Ni, Ni-Co alaşımları vb.) ile bir helikopterin iniş-kalkış sırasındaki ortamı yansıtan MIL-STD-3033 standardı referans alınarak gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya destek ve katkılarından dolayı TUSAŞ Döner Kanat Teknoloji Merkezi'ne (DKTM) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Al-Bukhaiti M., Ahmed S., Badran F. ve Emara K., 2007. *Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron,* Wear 262(9): 1187-1198.

Al-Bukhaiti M., Emara K. ve Ahmed S., 2009. *Fractal Characterization of Slurry Eroded Surfaces at Different Impact Angles,* Journal of Tribology 131(3): 031601.

Andrews D. ve Field J., 1982. *Temperature dependence of the impact response of copper: erosion by melting,* Journal of Physics D: Applied Physics 15(11): 2357.

ASTM G76-13, 2013. *"Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets",* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM F1864-05, 2010. *"Dust Erosion Resistance of Optical and Infrared Transparent Materials and Coatings",* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Bousser E., Martinu L. ve Klemberg-Sapieha J., 2013. *Effect of erodent properties on the solid particle erosion mechanisms of brittle materials,* Journal of Materials Science 48(16): 5543-5558.

Desale G. R., Gandhi B. K. ve Jain S., 2006. *Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials,* Wear 261(7): 914-921.

Dhar S., Krajac T., Ciampini D. ve Papini M., 2005. *Erosion mechanisms due to impact of single angular particles,* Wear 258(1): 567-579.

Evans A. ve Wilshaw T. R., 1976. *Quasi-static solid particle damage in brittle solids—I. Observations analysis and implications,* Acta Metallurgica 24(10): 939-956.

Finnie I., 1958. *The mechanism of erosion of ductile metals*, 3rd US National Congress of Applied Mechanics.

Finnie I., 1960. *Erosion of surfaces by solid particles*, Wear 3(2): 87-103.

Forder A., Thew M. ve Harrison D., 1998. *A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves*, Wear 216(2): 184-193.

Forero A., Núñez M. ve Bott I., 2014. *Analysis of the corrosion scales formed on API 5L X70 and X80 steel pipe in the presence of CO2*, Materials Research 17(2): 461-471.

Levin, B.F., Vecchio, K.S., DuPont, J.N. ve Marder, A.R., 1990. *Modeling Solid-Particle Erosion of Ductile Alloys*, Metallurgical and Materials Transactions A, v. 30A, 1763-1774.

MIL-STD-3033, 2012. "*Particle/Sand Erosion Testing for Rotor Blade Protective Materials"*, U.S. Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, Materials Manufacturing Technology Branch, Specification and Standards Office, Aberdeen Proving Ground, MD, USA.

Okonkwo P.C., Mohamed A.M.A., 2014. *Erosion Mechanisms of API X42 and AISI 1018 Steel Materials at Normal Impact Angle*, Inernational Journal of Engineering Science and Innovative Technology 3(5): 402-407.

Okonkwo P.C., Mohamed A.M.A. ve Ahmed E., 2015. *Influence of particle velocities and impact angles on the erosion mechanisms of AISI 1018 steel*, Advanced Material Letters 6(7): 653-659.

Ruff A.W. ve Ives L.K., 1975. *Measurement of solid particle velocity in erosive wear*, Wear 35(1): 195-199.