

Erozif Aşınma Testlerinde Farklı Nozul Tasarımlarının PMMA Üzerinde Aşınma İzi Alanı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi

Barış ÖNEN^{*1}, Ekrem ALTUNCU², Ali ÇINAR³

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kocaeli

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Malzeme ve Üretim Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sakarya

³ Kocaeli Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

Sorumlu Yazar e-posta: baris.onen@kocaeli.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8579-7124>

e-posta: altuncu@subu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-9013>

e-posta: alicinar@kocaeli.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3467-150X>

Geliş Tarihi: 08.12.2020

Kabul Tarihi: 07.06.2021

Öz

Katı partikül erozyonu, basınçlı bir hava akımı aracılığıyla taşınan aşındırıcı sert partiküllerin yüksek hızlarda katı malzeme yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarparak malzeme yüzeyinde önemli oranda kütle kaybına sebep olan bir aşınma hasar türüdür. Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan birçok mühendislik malzemesi uçağın iniş kalkış ve seyri esnasında bulunduğu hava ortamında uçan katı partiküller nedeniyle katı partikül erozif aşınmasına maruz kalmaktadır. Polimetilmetakralat (PMMA) esaslı malzemeler yüksek yüzey dirençleri, UV dirençleri ve dış ortam koşullarına dayanıklılıkları ve saydam özellikleri nedeniyle genel olarak uçak pencerelerinde yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada PMMA malzeme yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma izi alanına ve yüzey pürüzlülüğüne erozif aşınma testlerinde farklı nozul tasarımlarının etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında farklı geometrilerde nozullar tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu nozullar ile erozif aşınma testleri plaka numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Görüntü işleme ile aşınma izleri görsel olarak sunulmuş ve aşınma iz alanları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Aşındırılan numuneler üzerinde ortalama alansal pürüzlülük değerleri optik profilometre yardımı ile belirlenmiştir. Genel olarak çalışmanın sonucunda farklı nozul geometrilerinin yüzey pürüzlülük değerlerini ve aşınma iz formunu önemli oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Laval tipi ve boğazlı nozullar içerisinde en dar kesitlere sahip olan nozullarda en yüksek oranda ortalama alansal pürüzlülük ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler

Katı partikül erozyonu;
Nozul geometrisi;
Aşınma alanı; Görüntü işleme; Yüzey pürüzlülüğü

Investigation of the Effects of Different Nozzle Geometries at Erosive Wear Tests on the Wear Track Area and Surface Roughness of PMMA

Abstract

Solid particle erosion is a severe wear failure type and it can cause the loss of mass and damage on material surfaces through abrasive hard particles carried by the air flow, which at high speed repetitively impact the surfaces. Especially many engineering materials used in aviation industry are subjected to heavy damage by solid particle erosion during flight, landing on and landing off. Polymethylmetacralate (PMMA) based materials are generally used extensively in aircraft windows due to their high surface resistance, UV resistance, outdoor availability and transparent properties. In this study, it is aimed to investigate the effects of different nozzle geometries on the area of wear and surface roughness caused by solid particle impingement on the PMMA surface. In the experimental studies, first phase of this study, different geometric sized nozzles were designed and manufactured. Erosive wear tests were carried out with the manufactured nozzles on flat samples. The area of the erosion tracks on the surface was analyzed by image processing methods for each nozzle geometry. Wear tracks are analyzed by image analysis methods and the wear track areas are calculated and compared. The average area roughness values of the eroded samples were determined with the help

Keywords

Solid particle erosion;
Nozzle geometry;
Wear area; Image processing; Surface roughness

of an optical profilometer. In general, it has been observed that different nozzle geometries significantly affect surface roughness and track areas. The average area roughness was highest in the laval type with narrow throat nozzles.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Erozif aşınma testlerinde ve malzemelerin erozif aşınma performansının belirlenmesinde çok sayıda parametre söz konusu olup bunlar arasında en önemli parametrelerden bir tanesi de geometrik nozul tasarımıdır (Lupoi and O'Neill 2011, Settles and Gary 1996, Kline et al. 1988, Seavey 1985). Nozul, katı partikülün kütleli debi ve hızına bağlı olarak hareketini şekillendiren en önemli fiziksel unsurdur. Nozul geometrisi hava/partikül karışımının hareketini belirlemektedir. Akışkanlar mekaniğinde havanın hareketini yönlendiren kesit değişimleri, uzunluklar, yüzey özellikleri, malzeme/akışkan arası sürtünme katsayısı gibi veriler partikül erozyonunu etkileyen nozula ait alt parametrelerdir. Burada en önemli kısım nozul içinde havanın ve partiküllerin hareketlerinin nozul geometrisine göre değişimleridir. Nozulun sabit çapta tam silindirik olması, giriş ve çıkış çapları arasında farklılıkların olması ya da nozul içinde bir boğaz olması, o boğaz kısmına kadar bir daralmanın olması, boğaz sonrası genişlemenin olması, boğazın konumu, bu daralma ve genişlemelerin açıları vb. her biri bir tasarımsal bir parametredir. Bu parametreler öncelikle nozul içindeki havanın (gaz akışkan) hızını ve basıncını etkilemektedir. Bu durum doğrudan hareket eden katı partiküllerin hızlarına etki etmektedir. Kütleli debi arttıkça nozul içindeki boğazdan geçen hava/partikül karışımının geçebileceği alan giderek daralmaktadır. Olabildiğince laminar bir akış sağlanmış olsa bile yerçekimi etkisi ve aerodinamik etkiler nedeniyle partiküllerin birbirine ve nozul çeperlerine çarpma eğilimleri artmaktadır. Bu partiküllerin hem laminar akışta olduğu gibi doğrusal hızlanmalarına negatif etki etmekle beraber hem de çarpma sonrası hız ve enerji kaybetmelerine, hareket doğrultularını değiştirmelerine neden olabilmektedir. Dolayısı ile bu boğazın çapının büyüklüğü, nozul içindeki konumu oldukça önemlidir. Boğaz bulunan nozul tiplerinde giriş ile boğazın bulunduğu yere kadar olan noktaya kadar kesit göreceli olarak giderek

azalmaktadır. Bu açı son derece önemlidir. Aynı şekilde buradaki mesafe de çok önemli parametrelerden bir tanesidir (Sutton and Biblarz 2013, Momber 2008).

Katı partiküller ile kumlama; otomotiv, gemi yapım, boyama ve yüzey hazırlama endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan yüzey işlem yöntemlerinden bir tanesidir (Lupoi and O'Neill 2011, Settles and Gary 1996, Kline et al. 1988, Seavey 1985, Sutton and Biblarz 2013). Kumlama ile malzemelerin yüzeylerinin işlenmesinde temel amaçlardan biri malzeme yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerlerine getirilmesidir. Özellikle boyama, yapıştırma ve kaplama uygulamaları öncesi, otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzemelerin yüzeyleri kumlama ile pürüzlendirilmektedir. Değişen nozul geometrisi ile hedef malzemenin kumlama operasyonunda katı partikül erozyonu ile yüzey pürüzlülüğünde önemli miktarda değişeceği aşikardır (Turchi et al. 2014, Strojny et al. 2000, Winter and Hutchings 1974). Havacılıkta PMMA esaslı malzemeler yoğun olarak pencere sistemlerinde kullanılmaktadır. Uçağın hareketi esnasında ortamdaki katı partiküller ile temas eden bu yüzeylerde erozif aşınma ve darbe riski söz konusudur (Şekil 1). Bu nedenle bu çalışmada termoplastik bir malzeme olan PMMA numunelerin yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma iz alanına ve yüzey pürüzlülüğüne farklı nozul tasarımlarının etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Nozul tasarımlarının ilk aşamasında bilgisayar destekli analiz yöntemleri kullanılarak aşındırma işlemi modellenmiş ve uygun nozul tasarımları belirlenmiştir. İkinci aşamada bu bilgiler ışığında belirlenen nozullar kendi imkanlarıyla sanayide 6 eksenli cnc tezgahı kullanan bir işletmede imal edilmiştir. Nozullar iç geometrilerinin üretim zorluğundan dolayı metal oksit kullanılarak değil, çelik malzemenin imal edilmişlerdir. Fakat kısa sürede aşınmalarını engellemek için üretimleri sonrası ısıtma tabii tutularak yüzeyinin sertleşmesi sağlanmıştır. Nozullar imal edildikten sonra katı partikül erozif

aşınma test ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiş ve yüzey pürüzlülük etkileri ortaya çıkarılmıştır.

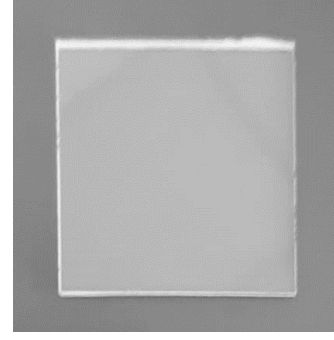


Şekil 1. Katı partikül erozif aşınma gözlemlenen PMMA yüzeyler

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Malzemeleri

Katı partikül aşınma testinde test malzemesi olarak termoplastik bir polimer olan polimetil metakrilat (PMMA) plakalar kullanılmıştır. PMMA, şeffaf ve saydam özellikleri ve düşük nem absorpsiyonuna ve düşük yoğunluğa sahiptir. PMMA, mekanik özellikler bakımından yüksek dayanım, boyutsal kararlılık, yüksek elastik modülü, iyi sertlik değerleri ve düşük kopma uzamasına sahiptir. PMMA, seyreltilmiş asitler, halka-silikat bileşenleri, alifatik hidrokarbonlar gibi, zorlu şartlara dayanma gücüne sahiptir. PMMA mükemmel optik özelliklere sahip olup, görünür bölgedeki ışık geçirgenliği oldukça yüksektir. PMMA, mükemmel optik berraklık ile güvenlik camları, ışık armatörleri, tavan pencereleri, lensler, fiber optikler, takma dişlerde, dolgularda ve kontak lenslerde kullanım alanı bulmaktadır (Bel vd. 2019, Foster and Wool 1991). Deneysel çalışmalarda yüzeyi alkol ile temizlenmiş plaka numuneler 50x50x5 mm boyutlarındadır (Şekil 2). Bunun yanında erozif aşınma testlerinde aşındırıcı partikül olarak 120 mesh boyutundaki yüksek saflıkta alüminyum oksit kullanılmıştır.



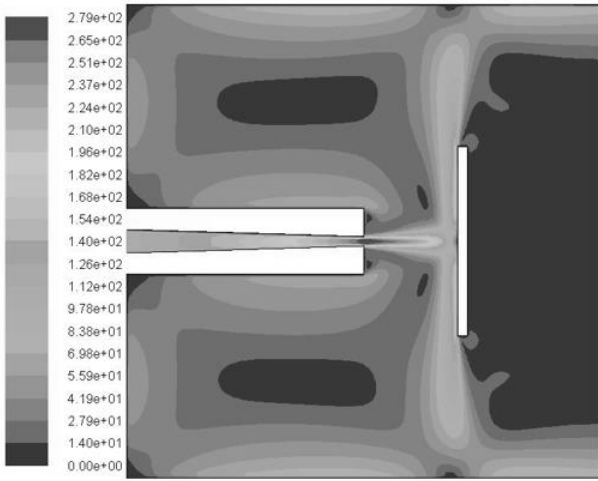
Şekil 2. Test numunesi (PMMA)

2.2. Testlerde Kullanılan Nozul Geometrileri

Birçok endüstri dalında bir ürünün performansının daha ürün tasarım sürecindeyken bilinmesi oldukça önemlidir. Böylece ürünün artan performans isteklerini karşılayıp karşılamadığı daha tasarım aşamasında görülebilir, probleme sebep olan etkenler bu aşamada ortadan kaldırılabilir ve optimize edilmiş ürün piyasaya sürülerek ürünün rekabet gücünü ve müşteri memnuniyetini artırma imkanına sahip olunabilir (Önen 2016).

Nozul geometrileri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir. Bu yüzden farklı iç geometrilere sahip nozullar tasarlanarak üretilmiş, katı partikül erozyonu testlerinde bu farklı nozul geometrileriyle deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılarak kullanım amacına yönelik olarak hangi geometrinin optimum sonuçları vereceği ortaya konulmaya çalışılmıştır (Önen vd. 2015).

Bu analizde, bir sayısal modelleme katı parçacık erozyon işlemi ile ilgili nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafe, ivmelenme basıncı ve parçacık boyutu etkilerinin belirlenmesi amacıyla ve iki fazlı akış olan gaz-katı akışını eksiksiz olarak simüle etmek için Ansys-Fluent 14.5 programı kullanılmıştır. İki boyutlu düzlemde simetrik modeller hesaplama süresini azaltmak için kullanılmaktadır. Basıncı hava ideal ve sıkıştırılabilir olarak alınmıştır. Kararlı bir durumda; akış alanını ve sonuçları çözmek için Fluent'te kullanılan mevcut bir birleştirilmiş kapalı yöntem elde edilmiştir. Realizable K-ε türbülans modeli simülasyonda kullanılmıştır ve partikül hızlanması ayrık faz modelleme kullanılarak hesaplanır. Bu modellemenin bir örneği Şekil 3'de gösterilmiştir (Önen 2016).



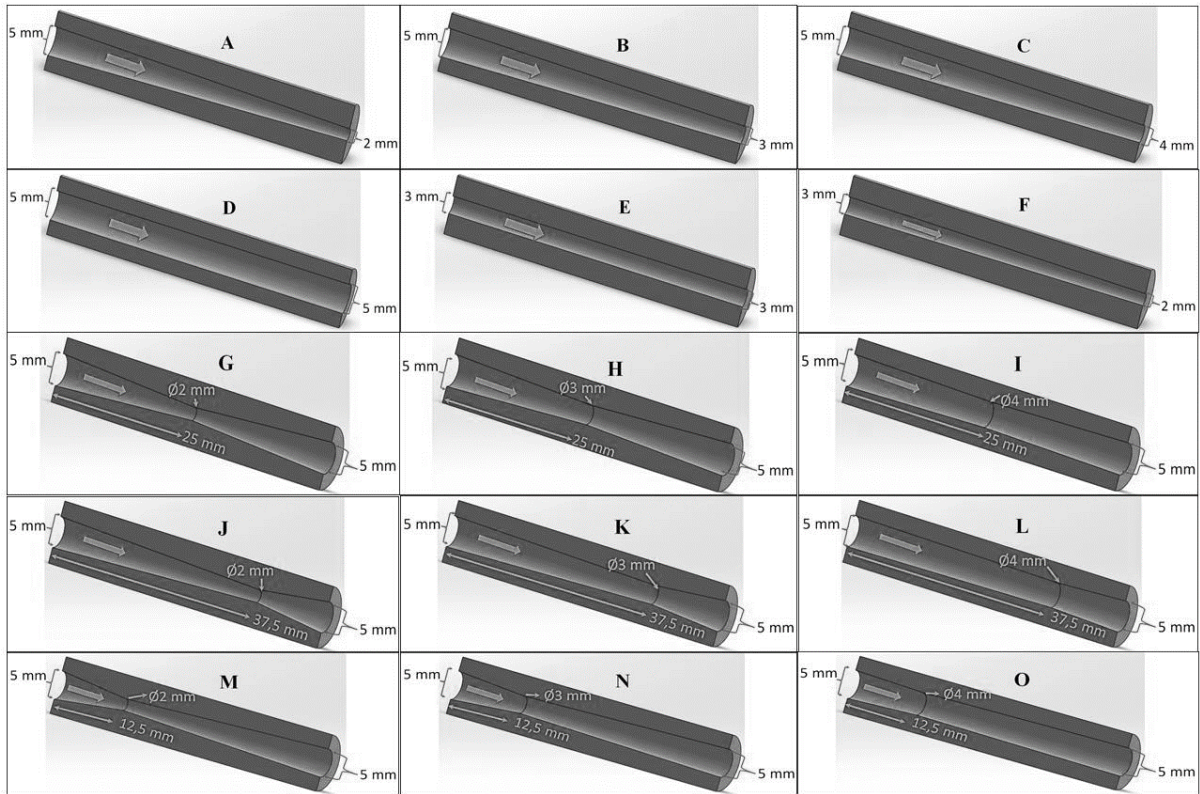
Şekil 3. İki boyutlu modellemesi yapılan nozul geometrisinde akış analizi

Yapılan bu analizler sonucunda, farklı geometrik ölçülerde tasarlanan ve üretilen 15 adet nozulun

ölçüleri, nozul adları ve grupları Çizelge 1'de ve Şekil 4'de sergilenmektedir.

Çizelge 1. Farklı nozul geometrilerinin ölçüleri

Nozul Adı	Nozul Giriş Çapı (mm)	Boğaz Çapı (mm)	Boğaz Yeri (mm) (Girişe olan mesafe)	Nozul Çıkış Çapı (mm)	Nozul Grupları
A	5	-	-	2	I. Grup
B	5	-	-	3	I. Grup
C	5	-	-	4	I. Grup
D	5	-	-	5	I. Grup
E	3	-	-	3	II. Grup
F	3	-	-	2	II. Grup
G	5	2	25	5	III. Grup
H	5	3	25	5	III. Grup
I	5	4	25	5	III. Grup
J	5	2	37,5	5	IV. Grup
K	5	3	37,5	5	IV. Grup
L	5	4	37,5	5	IV. Grup
M	5	2	12,5	5	V. Grup
N	5	3	12,5	5	V. Grup
O	5	4	12,5	5	V. Grup



Şekil 4. Eroziyon testlerinde kullanılan nozul geometrileri

2.3. Katı Partikül Eroziyon Testleri

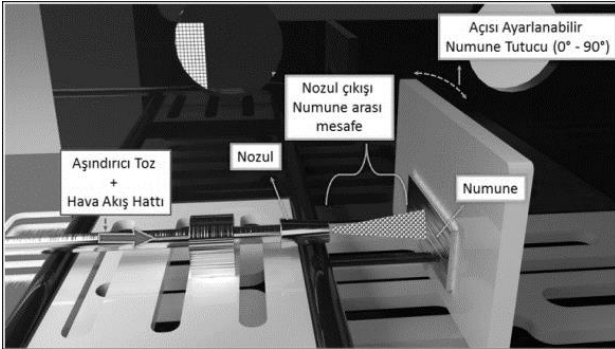
Katı partikül erozyon testleri eroziyon miktarını ölçmek için amaçlanmış basınçlı kuşaklama test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Test ünitesinin bileşenleri (Şekil 5): ana taşıyıcı gövde, püskürtme haznesi, vakumlu

katı partikül haznesi, açılı ayarlanabilir plaka tutucu, basınç kontrollü bir hava kompresörü ve püskürtme tabancası ve nozulu ile bağlantı hortumlarından oluşmaktadır (Önen vd. 2017). Bu deneysel çalışmada katı partikül eroziyon testleri ASTM

G76-95 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test parametreleri Çizelge 2’de sergilenmektedir. Genel olarak aşınma testlerinde katı partiküller plaka numunelere 90° çarpma açısında, 1.5 bar püskürtme basıncında 20 sn. süreli püskürtülmüştür. Test plakaları nozul çıkışından sabit 50 mm mesafe uzaklığa yerleştirilmiştir. Her test 3 kez tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır. Testlerde plakalar üzerinden aşınma kayıpları hassas bir terazide ($\pm 0,1$ mg) aşınma öncesi ve sonrasında tartılarak kütle kayıpları ölçülmekte ve aşınma hızları hesaplanmaktadır.

Çizelge 2. Kumlama testi parametreleri

Katı Partikül Türü	Alüminyum oksit, Al ₂ O ₃
Boyutu	120 mesh
Çarpma Açısı	90°
Püskürtme Basıncı	1.5 bar
Test Sıcaklığı	25 °C \pm 2 °C
Test Süresi	20 saniye
Nozul -Numune arası mesafe	50 mm

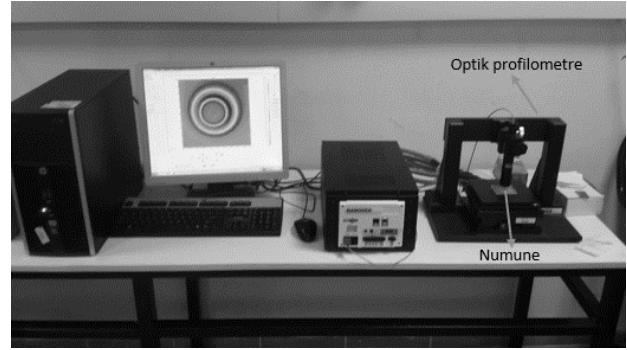


Şekil 5. Kumlama kabini test düzeneği

2.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Aşınma testleri sonrasında plaka yüzeyleri incelenerek yüzey aşınma izleri ve aşınma geometrileri ölçülmektedir. Bununla birlikte yüzeyin pürüzlülük değişimi incelenmektedir. Farklı geometrik ölçülerde nozullar ile yapılan testlerde numunelerin yüzeylerinden Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı ile yüzey profili incelenmiş ve pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 6’da deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazının test düzeneği sergilenmektedir. Bu test düzeneğiyle numune

yüzeyi taranarak üç boyutlu yüzey topografileri analiz edilmiştir.



Şekil 6. Optik profilometre cihazı ve test düzeneği

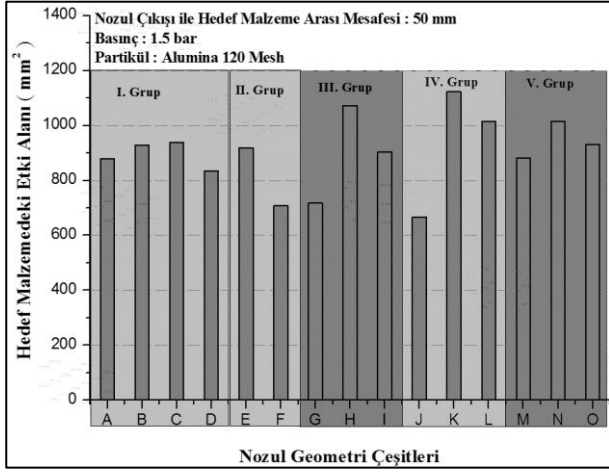
2.5. Görüntü İşleme

Numunelerin farklı nozullarla aşınmış yüzeylerinin görüntülerinin elde edilmesi sonrasında görüntü işleme aşamasına geçilmiştir. Farklı nozul geometrileri kullanılarak gerçekleştirilen katı partikül erozyonunun, PMMA yüzeylerinde oluşturduğu hasarın yüzey dağılım alanlarına etkilerini ortaya koymak amacıyla yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri tarayıcıdan elde edilmiştir. Tarama sonrası elde edilen 2 boyutlu numune yüzey resimleri Image J açık kodlu görüntü işleme programı algoritmaları yardımıyla işlenmiştir. Her bir nozul geometrisi için PMMA numunelerde yüzeyde aşınma dağılım alanları hesaplanarak görüntüler elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

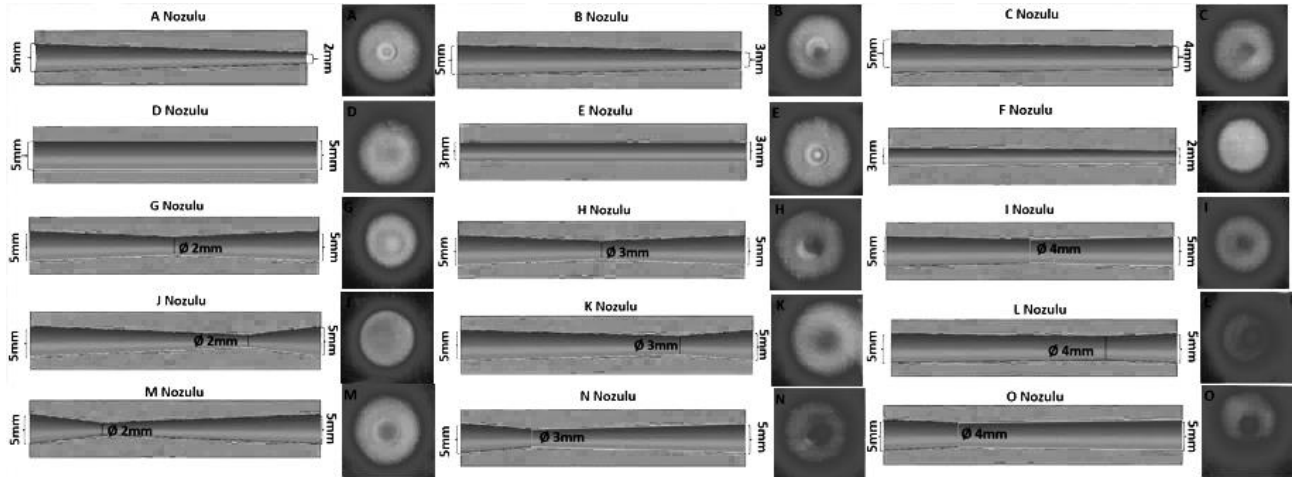
Şekil 7’de farklı nozul geometrilerine bağlı olarak 120 mesh alümina aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde aşınma sonucu oluşan aşınma bölgesi etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V. grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 120 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile etki alanında artış meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ye geçişte

etki alanında azalma gerçekleşmektedir. Bu durum üç grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına H ve K nozulları sahip olmuştur.



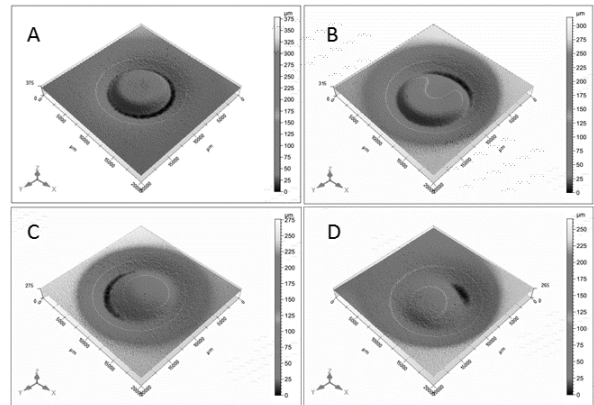
Şekil 7. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Şekil 8’de 120 mesh alüminanın aşındırıcı kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan testler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde hedef malzeme yüzeyinde geniş bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. PMMA’nın erozif aşınma testleri sonrası A ve E nozullarında aşındırıcı partiküller merkez noktada daha fazla aşınmaya sebep olarak “puslanma” olarak adlandırılan bir hasar mekanizması ortaya çıkarmıştır. Şeffaf bir malzeme olan PMMA’da aşındırıcı partiküllerin tekrarlı çarpması sonucu opak bir bölgenin merkezde ortaya çıkarak görüntü kaybına sebep olması “puslanma” olarak adlandırılır. Puslanma bölgesi izi merkezde A ve E nozullarıyla yapılan aşındırma testleri sonrası daha net görülmüştür. L, N ve O nozullarında ise merkezde aşınmanın fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu tip nozullarda aşındırıcı partiküllerin merkezde odaklanmadığı görülmektedir.



Şekil 8. Farklı nozul geometrilerinin oluşturduğu erozif aşınma iz görüntüleri

Şekil 9’da farklı nozullar kullanılarak pürüzlendirilen hedef malzemelerin 3 boyutlu yüzey topografyaları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde nozul geometrisine bağlı olarak oluşan erozif aşınma izinin geometrisinin ve topografyasındaki değişim dikkat çekmektedir. Nozul çıkış çapının artışı ile erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı A ve D nozullarının analiz sonuçları karşılaştırıldığında net bir şekilde görülmektedir.

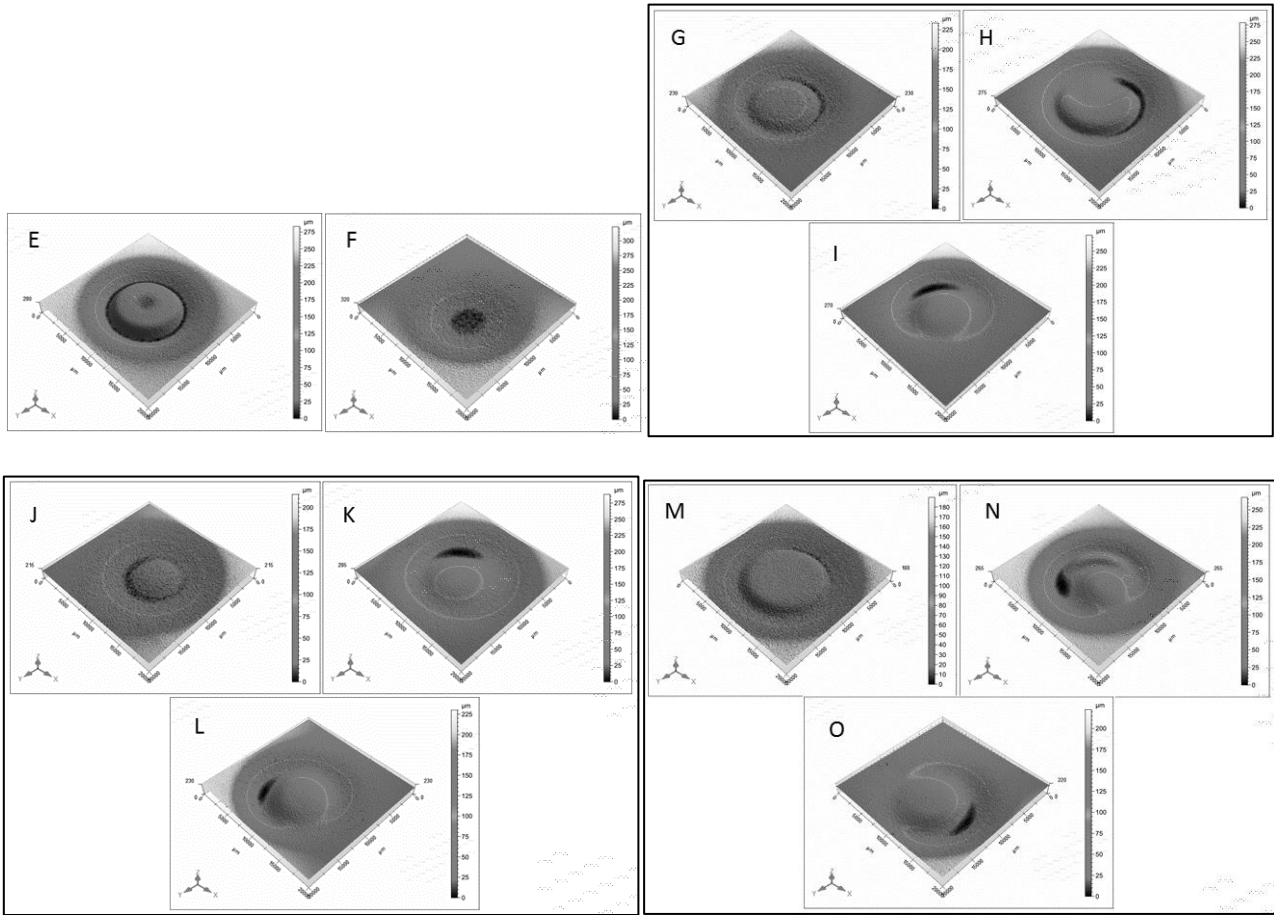


Şekil 9. I. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA’nın üç boyutlu yüzey topografyaları

Bu durumun yüzey pürüzlülük sonuçlarında belirtildiği gibi nozul çıkış çapının artışı ile aşındırıcı partiküllerin nozul çıkışı sonrası saçılarak daha büyük bir alana çarpmaları ve aşınma gerçekleştirmeleri ile açıklanabilir.

Boğaz içermeyen ve dar bir nozul giriş ve çıkış çapına sahip olan F nozulunun meydana getirdiği aşınma izi diğer tüm nozullara göre farklılık göstermektedir. Diğer nozullar ile gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olduğu ve bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum nozul geometrisi nedeniyle hedef malzemenin tam merkezinde bir durma noktası meydana geldiği ve bu nedenle bu bölgeye çok az sayıda partikülün çarpması ile açıklanabilir. F nozulunda ise nozul tasarımına bağlı

olarak bir durma noktasının oluşmadığı ve aşınmanın izin merkezinde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine daha düzenli bir şekilde yönlenecek şekilde tekrarlı bir şekilde belirli bir alana çarpması ile gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum topografyanın yanında verilen derinlik cetveline bakılarak da doğrulanmaktadır. Yüzeyde oluşan erozif aşınma kraterinin derinliğinin 300 µm'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Buna karşın nozul tasarımına boğaz eklenmesi ile oluşan iz derinliği düşmüştür. M nozulu için maksimum iz derinliği yaklaşık olarak 190 µm olarak ölçülmüştür. Bu değişim nozul tasarımının yüzeyde meydana gelen erozif aşınma kraterinin büyüklüğünü, geometrisini ve derinliğini büyük ölçüde değiştirdiğini ortaya çıkarmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Farklı grup nozul tasarımları ile pürüzlendirilen PMMA numunelerin üç boyutlu yüzey topografyaları

4. Sonuç

Bu çalışmada PMMA numuneler yüzeyinde katı partikül erozyonu nedeni ile oluşan aşınma iz alanına ve yüzey pürüzlülüğüne farklı nozul tasarımlarının etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Farklı geometrilerde 15 farklı nozul tasarlanmış ve imal edilmiştir. İmal edilen nozullar ile erozif aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve nozul tasarımına bağlı olarak yüzeyde oluşan aşınma izinin alanı görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlar;

- Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça hedef malzeme üzerindeki etki alanının arttığı görülmektedir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü üç farklı partikül boyutunda da M nozulunda daha fazla olduğu görülmüştür. Genelde O nozulunda ise daha az ortalama yüzey pürüzlülüğü görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerine baktığımızda M nozulu, O nozuluna göre 2 kat daha fazla pürüzlülük yaratmıştır.
- PMMA yüzeyindeki ortalama alansal pürüzlülük değişimlerine baktığımızda düz ve konik nozullardan oluşan I. grup nozullarda daha fazla olduğu görülmüştür. Nozul çıkış çapının daralmasıyla ortalama alansal pürüzlülük değerinin arttığı belirlenmiştir.
- Nozul içerisinde boğazlı yapılara sahip nozullarda, düz ve konik nozul geometrilerine göre yaklaşık 2 kat pürüzlülük değerinde azalma oluşmuştur. Ayrıca boğazın nozul içerisindeki konumuna göre de değişim meydana gelmiştir. Nozul içerisindeki nozul girişine yakın boğaza sahip olanda daha az ortalama alansal pürüzlülük değeri oluşmuştur.
- 3 boyutlu yüzey topografyalarında nozul çıkış çapı arttıkça erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı görülmüştür.
- F nozulu hariç diğer nozul geometrilerinde gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olup, bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülürken, F nozulunda ise aşınma izinin merkezde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir.

Bu çalışmayla katı partikül erozif aşınma davranışında kullanılan farklı geometrik ölçülerde nozulların aşınma izi geometrisine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur (Önen 2016).

5. Kaynaklar

- Bel T., Arslan C., Baydoğan N., 2019. PMMA / mikroküre / montmorillonite nanokompozit ve PMMA / mikroküre/halloysite nanokompozitin atom transfer radikal polimerizasyon tekniği ile üretilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **34 (20)**, 687-700.
- Foster K.L. and Wool R.P., 1991. Strength of Polystyrene Poly (Methyl Methacrylate) Interfaces. *Macromolecules*, **24(6)**, 1397-1403.
- Kline E., Mort G., and LaCompte J., 1988. Improved Productivity from New Blast Nozzle Geometry. *Journal of Protective Coatings & Linings*, **5(2)**, 8-12.
- Lupoi R., O'Neill W., 2011. Powder stream characteristics in cold spray nozzles". *Surface & Coatings Technology*, **206**, 1069–1076.
- Momber A., 2008. Blast Cleaning Technology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 154-166.
- Önen, B., 2016. Farklı Nozul Geometrilerinin Polimetilmetakrilat (PMMA) Yüzeyinde Katı Partikül Erozyonunun İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 154.
- Önen B., Yildiran Y., Avcu E., Çınar A., 2015. Investigation of the effects of erosion test parameters on the particle impingement velocity by using cfd analysis. *Acta Physica Polonica A*, **127**, 1225-1229.
- Önen B., Fidan S., Sınmazçelik T., Çınar A., 2017. Nozul içi geometrilerinin partikül erozyonunda hedef malzeme aşınma ve pürüzlülüğüne etkileri. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **32(4)**, 1051-1061.
- Seavey M., 1985. Abrasive Blasting Above 100 psi. *Journal of Protective Coatings & Linings*, **2(7)**, 26-37.

Settles G. S. and Garg S., 1996. Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles. *Journal of Thermal Spray Technology*, **5(1)**, 35-41.

Strojny, N. R. Moody, J. A. Emerson, W. R. Even Jr and Gerberich W. W., 2000. Interfacial Fracture of Thin Polymer Films on Aluminum. *MRS Online Proceedings Library Archive*. **629**, 5.13.1–5.13.6.

Sutton G. E., Biblarz O., 2013. Rocket Propulsion Elements. 7, John Wiley & Sons, New Delhi, India, 45-100.

Turchi A., Bianchi D., Thakre P., Nasuti F., Yang V., 2014. Radiation and Roughness Effects on Nozzle Thermochemical Erosion in Solid Rocket Motors. *Journal of Propulsion and Power*, **30(2)**, 314-324.

Winter R. E., Hutchings I. M., 1974. Solid particle erosion studies using single angular particles. *Wear*, **29**, 181–194.