

## EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA NOZULDAKİ ÇAP DARALMASININ ETKİLERİ

Barış Önen<sup>1</sup>, Sinan Fidan<sup>2</sup>  
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

Tamer Sınmazçelik<sup>3</sup>, Ali Çınar<sup>4</sup>  
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

### ÖZET

*Bu çalışmada, günümüz yolcu uçaklarında cama alternatif olarak kullanılan polimetilmetakrilatın (PMMA) farklı iki nozul çıkış çap ölçüsüne sahip nozullarla erozif aşınma testleri gerçekleştirilerek analiz edilmiştir. ASTM G-76 standartlarına göre gerçekleştirilen testlerde nozul giriş çapı 5mm iken çıkış çapları ise 5mm ve 3mm (5-5 ve 5-3) olarak seçilerek nozul içi geometrinin aşındırıcı partiküllerin hızlarına ve aşınma davranışlarına etkileri irdelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 120 mesh boyutunda(90-250 µm) garnet aşındırıcı partikülleri 1,5 bar püskürtme basıncıyla 90° çarpma açısında hedef malzemeye 50mm stand-off mesafesinden gönderilerek kütle kayıpları ölçülmüştür. Nozul geometrisinin kütle kayıplarına etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin hızları çift disk metodu kullanılarak ölçülmüş ve partikül hızlarının nozulun çıkış çapının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Aşındırıcı partikül debileri de, nozulun çıkış çapı arttıkça artmıştır. Deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen erozyon oranları karşılaştırıldığında 5-3 nozulla püskürtme sonrası daha yüksek erozyon oranı ölçülürken, 5-5 nozulda erozyon oranı daha düşük seviyede kalmıştır. Nozul çıkış çapı büyüdükçe erozyon oranı azalmıştır. PMMA yüzeyinde erozif aşınma testleri sonrası ortaya çıkan hasar kraterinin orta noktasından belirlenen profil çizgisinden temassız lazer profilometre yardımıyla ortalama pürüzlülük değerleri ölçümü gerçekleştirilmiştir. 5-3 nozulda ortalama pürüzlülük değeri 5-5 nozula göre daha yüksek çıkmıştır. PMMA yüzeyinde aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu hasar krateri topografyasını ve etki alanını ortaya koymak amacıyla da profilometre ile yüzey alan pürüzlülük taramaları yüksek hassasiyette yapılarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmayla laval tip nozulların PMMA malzemede ortaya çıkardığı erozif aşınma davranışları detaylı şekilde karakterize edilmiştir.*

### GİRİŞ

Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda malzeme kaybı gerçekleşir. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında ve türbinlerde bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür [Fidan,2011]. Katı partikül erozyonu nedeniyle uygulamada malzemeler hesaplanan ömürlerinden daha kısa sürelerde hasara uğramaktadırlar. Bu da beraberinde büyük maddi kayıplara, hatta önlem alınmaması durumunda can kayıplarına yol açabilmektedir.

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde-Motor Bakım Böl., E-posta: baris.onen@kocaeli.edu.tr

<sup>2</sup> Yrd. Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde-Motor Bakım Böl., E-posta: sfidan@kocaeli.edu.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, E-posta: tamersec@kocaeli.edu.tr

<sup>4</sup> Doç. Dr., Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, E-posta: alicinar@kocaeli.edu.tr

Kumlama işlemi, yüzey temizleme ve hazırlama amacıyla veya yüzeyin mekanik özelliklerinin değiştirilmesi amacıyla ya da bir malzeme işleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Kumlama işleminde; ince, aşındırıcı partiküller taşıyıcı gazlar ile nozul içerisinde hızlandırılarak yüksek hızlarda hedef malzeme yüzeyine çarpmakta ve katı partikül erozyonu ile aşınma meydana getirmektedir. Kumlama olarak adlandırılan basınçlı hava ile kum püskürtme işleminde kumun basınçlı bir şekilde yüzeye püskürtülmesini sağlayan en önemli ekipmanlardan bir tanesi kumlama nozulu [Lupoi,O'Neill,2011; Settles,Garg,1996; Kline,Mort,LaCompte,1988; Seavey,1985; Sutton,1992]. Nozul geometrisi, uzunluğu ve iç çap/çıkış çapı oranı gibi parametreler maksimum aşındırıcı partikül hızını değiştiren parametrelerdir. Buna karşın kumlama nozullarının modern bilimsel yöntemler kullanılarak optimize edilmesi üzerine az sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatür çalışmalarında nozul geometrisinin (nozul giriş çapı ve nozul uzunluğunun) partikül hızına etkisinin az olduğu belirtilmiştir [Lupoi,O'Neill,2011]. Bu çalışmada bu nedenle giriş çapı ve nozul uzunluğu değişimleri hesaba katılmamıştır. Nozulun çıkış çapına daha fazla odaklanılmıştır.

Farklı tasarımlarda kumlama nozullarının geliştirilmesi kumlama verimliliğini artıracak ve çevreyi daha az kirleterek kumlama işleminin tamamlanmasını mümkün kılacaktır. Partikül çarpma hızı; kumlama işlemi için en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada kumlama işleminde farklı nozul tasarımlarının partikül çarpma hızlarına etkilerinin çift disk yöntemi ile deneysel olarak analiz edilmesi ve nozul tasarımlarının hedef malzemede meydana getirdiği erozyon oranlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

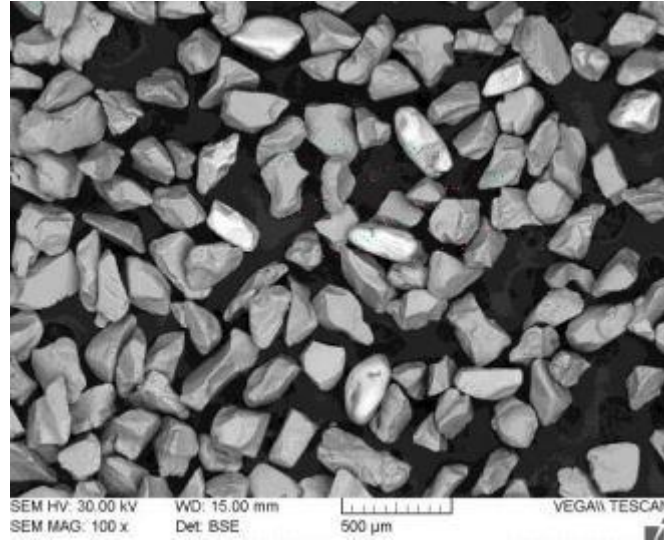
Ayrıca mühendislik malzemelerinin kaplama, boyama ve yapıştırma işlemleri öncesinde yüzeylerinin istenilen pürüzlülük değerlerinde işlenmeleri önem arz etmektedir. Kumlama işlemi bu amaçla kullanılan ekonomik, kolay ve istenilen yüzey pürüzlülük değerlerinin optimize edilebildiği mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Kumlama ile malzeme yüzeylerinin istenilen pürüzlülük değerlerinde işlenmesinde nozul tasarımı önemli bir parametredir. Bu nedenle bu çalışmada farklı nozul tasarımlarının ortalama alansal pürüzlülük değeri üzerine etkileri irdelenmiştir.

## YÖNTEM

### Hedef Malzeme ve Aşındırıcı Partiküller

Erozif aşınma testinde hedef malzeme olarak PMMA kullanılmıştır. Ticari olarak daha çok akrilik cam ya da pleksiglas olarak bilinen poli (metil metakrilat) (PMMA) renksiz ve şeffaf bir termoplastik polimerdir. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler 50x50x5 mm boyutundadır.

Şekil 1' de deneysel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak kullanılan 120 mesh boyutundaki garnet verilmiştir. Garnet benzer fiziksel özellikleri, kristal formu ve genel kimyasal bileşimlere sahip bir grup demir-alüminyum silikat minerallerine verilmiş genel bir isimdir. Garnetler orta yüksek sertlik, yüzeylerinde keskin çatlaklar, 1250 °C de erime noktası, yarı yuvarlaktan yarı köşeliye değişen keskin kenarlı taneler, fiziksel ve kimyasal ayrışmalara karşı dirençli oluşları ve çoğunlukla serbest silis içermemeleri ya da çok az oranda bulundurmaları gibi özellikleri nedeniyle yüksek kaliteli aşındırıcılar sınıfına girer. Son derecede sert ve üzerinde keskin çatlaklar bulunan garnetler bu özellikleri nedeniyle ağaç, deri, cam, metal ve plastik malzemelerin işlenmesinde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Kullanım çoğunlukla aşındırma kağıdı, aşındırıcı diskler, bileme taşları, parlatma ya da cilalama toz ve kumları şeklindedir.



Şekil 1: Aşındırıcı garnet partikülleri

### Nozul Tasarımı ve İmalatı

Birçok farklı parametre altında erozif aşınma dayanımı karakterize edilirken, bu konunun daha fazla irdelenmesi amacıyla, farklı nozul tasarımları içindeki hava akışı ve onun küçük katı partikülleri hızlandırmasıyla ilgili Ansys Fluent 14.5 programıyla analiz yapıp bunlar arasında karşılaştırma yaparak ve hangi nozul geometrisinin nerede kullanılacağını belirlenmeye çalışılmıştır. Bilgisayar destekli analizlerin sonuçları daha önce gerçekleştirilen bir yayında detaylı bir şekilde verilmiştir [Önen,Yildiran,Avcu,Çınar,2015].

Nozul geometri olarak giriş çapı 5 mm ve çıkış çapı 5 mm ve 3 mm'ye sahip nozul geometrileri seçilmiştir. Bu nozul geometrilerinin aşındırıcı partikül hız ve dağılım üzerine etkileri irdelenerek sonuçlar ortaya konmaya çalışılmıştır. Şekil 2' de imal edilen nozulların şematik gösterimi ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 2: Nozul geometrileri ve ölçüleri

### Kumlama Testleri

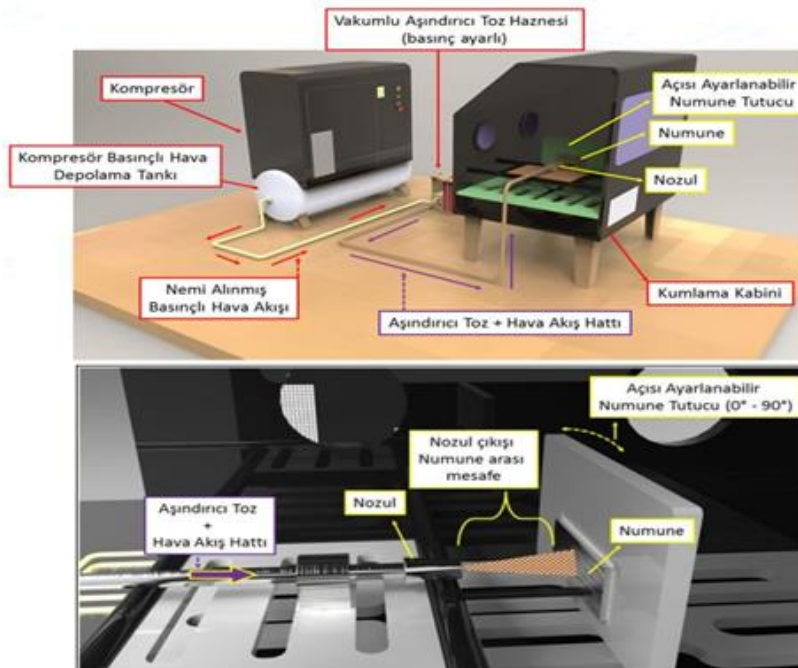
Kumlama deneyleri özel olarak tasarlanan erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma test düzeneği basınçlı hava kompresörü, portatif

basıncı kumlama makinesi, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kumlama tabancası kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından portatif basınçlı kumlama makinesi üzerindeki bir kol vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da portatif basınçlı kumlama makinesi üzerine yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kumlama tabancası, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir.

Bu çalışmada erozif aşınma testleri ASTM G76-95 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler özel tasarlanmış test kabiniinde 90° çarpma açısında, 1.5 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı partiküller vakumlu kaptan basınçlı hava yardımıyla çekilerek nozuldan püskürtülmüştür. PMMA levha numuneleri nozul çıkışından 50 mm mesafeye yerleştirilmiştir. Her numune için 20 saniye süre ile püskürtme yapılmıştır. Her bir parametrede 2 tekrar yapılarak sonuçların ortalaması alınmıştır. Çizelge 1' de kumlama testi parametreleri verilmiştir. Her numune test öncesi ve sonrası basınçlı hava ile temizlenerek testler sonrası hassasiyeti  $\pm 0,1$  mg olan hassas terazi ile kütle kayıpları ölçülmüştür. Erozif aşınma test düzeneği Şekil 3' te şematik olarak verilmiştir.

Çizelge 1: Kumlama testi parametreleri

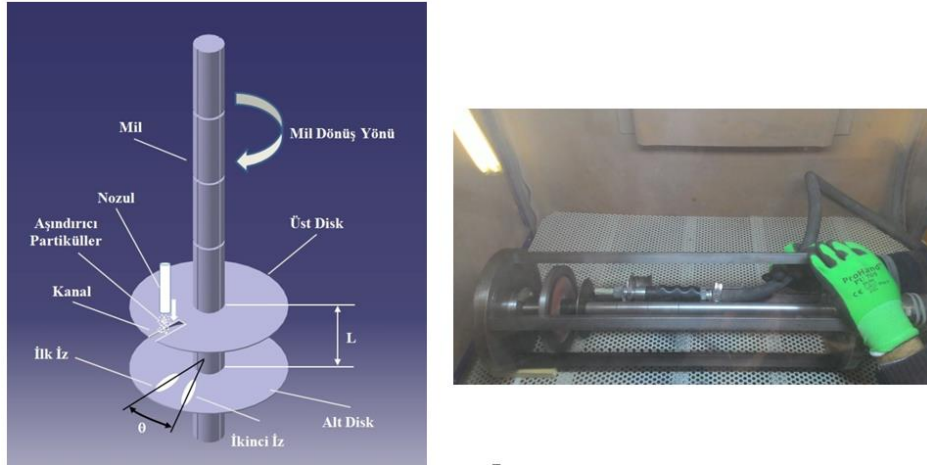
Aşındırıcı Tipi	Garnet
Aşındırıcı Boyutu	120 mesh
Aşındırıcı Çarpma Açısı	90°
Püskürtme Basıncı	1.5 bar
Test Sıcaklığı	25 °C $\pm$ 2 °C
Test Süresi	20 saniye
Nozul çıkışı-Numune arası mesafe	50 mm



Şekil 3: Kumlama kabini test düzeneği

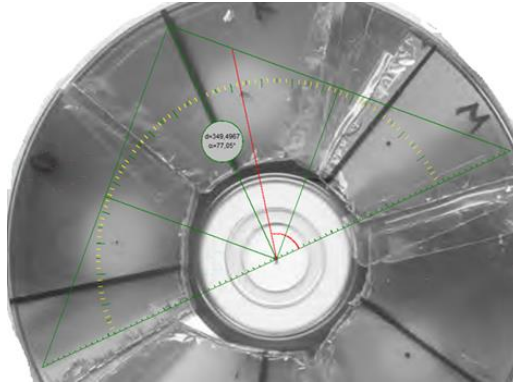
## Hız Ölçümü

DeneySEL çalışmalarda; 1,5 bar basınçta hızlandırılan aşındırıcı garnet partikülleri hızları döner çift disk metodu kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 4’de çalışmada kullanılan partikül hız ölçüm düzeneği verilmiştir.



Şekil 4: Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler ve yapılan deney

Döner disk partikül hız ölçme sistemini çalıştırmadan önce ikinci disk üzerinde başlangıç noktası belirlenmiştir. Sistem; 2000 devir/dk hızda diskler arasında 50 mm mesafe olacak şekilde ayarlanarak çalıştırılmıştır. İkinci disk üzerinde oluşan izler, Şekil 5’te görüldüğü gibi MB-Ruler programıyla açı ( $\theta$ ) hesabı yapılmıştır.



Şekil 5: Program yardımıyla disk üzerinde oluşan aşınma izleri açıları ölçümü

İlk aşamada disklerin dönüş hızı ( $n$ ) ve aşınma izleri arasındaki açı ( $\theta$ ) ölçülerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşmaları esnasında geçen süre ( $t$ ) hesaplanır. Denklem (1) ve (2)’de şekilde verilen döner disk ile partikül çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan formülasyon verilmiştir.

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (1)$$

$t$ = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

$\theta$ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ( $^{\circ}$ )

$n$ = devir hızı (rpm)

Daha sonra hesaplanan süre aşağıdaki formülde yerine koyularak partiküllerin çarpma hızı bulunmuştur.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

V = partikül çarpma hızı (m.s<sup>-1</sup>)

L = diskler arası mesafe (m)

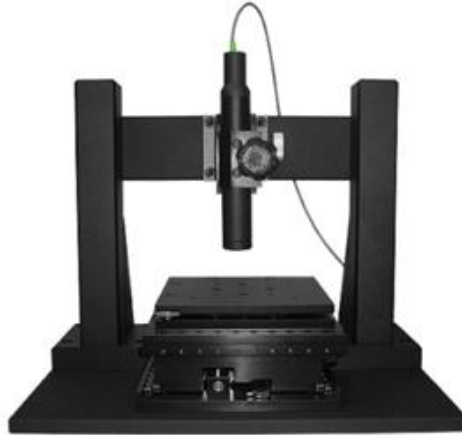
t= partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

### Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Farklı geometri ve ölçülerde tasarlanan 2 adet nozul (5-3 ve 5-5) kullanılarak aşındırılan numunelerin yüzeylerinden aşınma hasarının merkez bölgesinde Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 6' da deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazının fotoğrafı, Çizelge 2'de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir. Optik profilometre analizleri ile aşınan tüm yüzey taranarak 3 boyutlu yüzey topografyaları elde edilmiştir.

Çizelge 2: Optik profilometre cihazının özellikleri

Aydınlatma aralığı (dinamik)	Yeşil Işık 11 Hz – 2,4 MHz
Dikey Çözünürlük	0,1 nm (cihaza bağlı)
Yatay Çözünürlük	380 nm (objektife bağlı)
Yatay Yer Değiştirme Çözünürlüğü	0,1 piksel (geometriye bağlı)

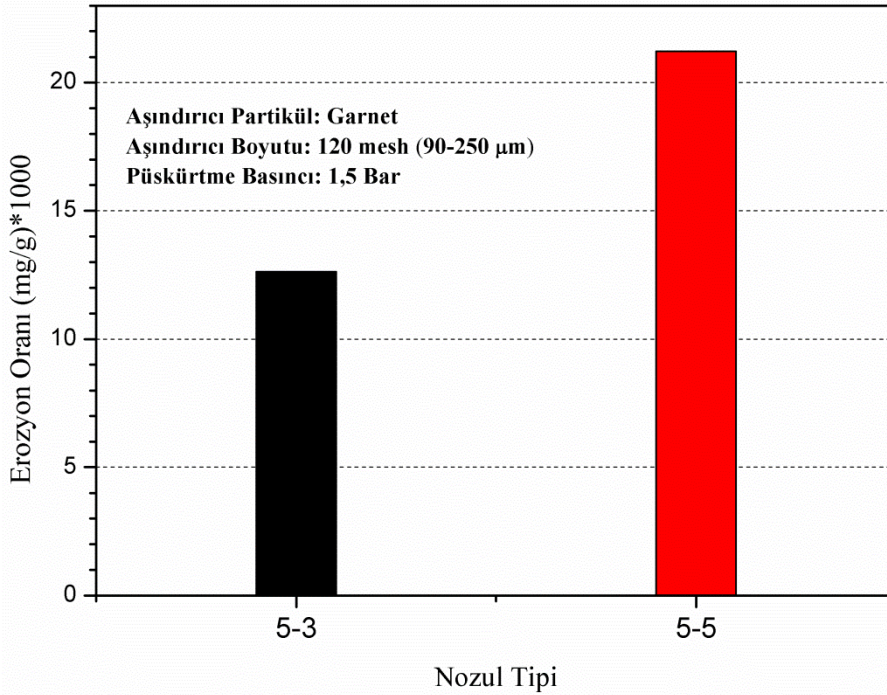


Şekil 6: Temassız lazer optik profilometre

### UYGULAMALAR

Katı partikül erozyonu sonrası ortaya çıkan sonuçlardan en önemlisi hedef malzemede yaşanan kütle kaybıdır. Hedef malzemede gerçekleşen kütle kaybı; aşındırıcı partikül büyüklüğü, aşındırıcı partikül hızı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül debisi, hedef malzeme ve aşındırıcı sertlikleri gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Hedef malzemelerin gevrek ve sünek yapılarda olması, ortaya çıkan maksimum aşınma miktarının farklı çarpma açılarında ortaya çıkmasına sebep olur. Sünek

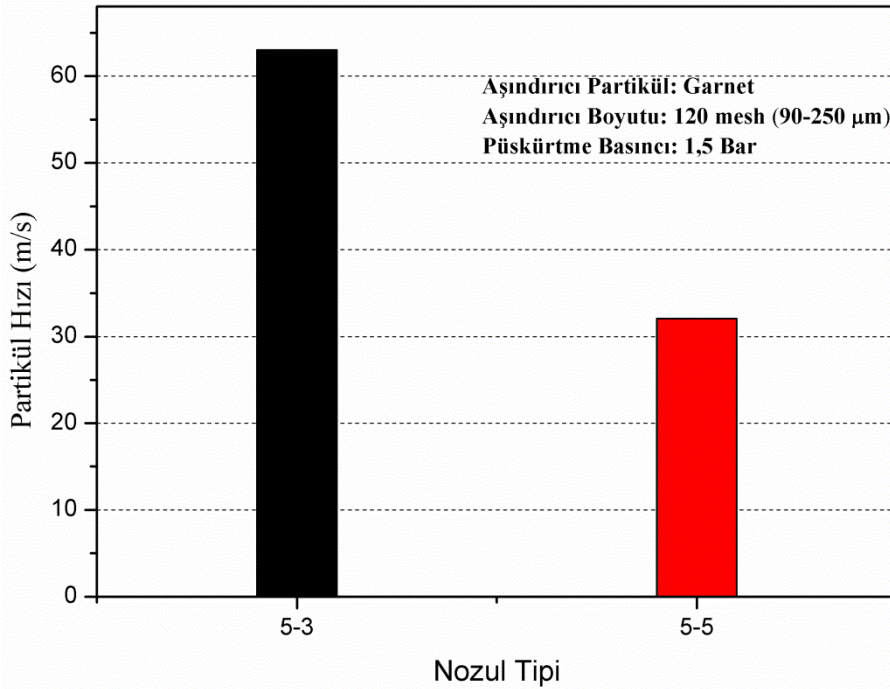
malzemelerde maksimum kütle kaybı 15-30° çarpma açılarında ortaya çıkarken gevrek malzemelerde çarpma açısı dik olduğunda (90°) maksimum kütle kaybı gözlemlenir. Diğer taraftan erozif aşınma testleri sonrası ortaya çıkan hasarı değerlendirmek için ölçülen kütle kaybı analiz edilebileceği gibi, analizin içine harcanan aşındırıcı partiküllerin kütlesini de katarak erozyon oranı hesaplamasıyla yapılan analizler daha efektif sonuçlar vermektedir. Erozyon oranı, hedef malzemede gerçekleşen kütle kaybının, bu kütle kaybını ortaya çıkarmak için kullanılan toplam aşındırıcı partikül kütlesine bölünmesiyle elde edilir. Bu çalışmada kullanılan iki farklı nozul geometrisiyle (5-3 ve 5-5) gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan erozyon oranları karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir. 120 mesh (90-250 µm) garnet partiküllerinin 1,5 bar basınçla püskürtülmesi sonucu ortaya çıkan erozyon oranları incelendiğinde, sabit nozul kesitine sahip 5-5 nozulunda elde edilen erozyon oranının, nozul çıkışına doğru daralan kesite sahip olan 5-3 nozulunda ortaya çıkan erozyon oranına göre yaklaşık iki kat fazla olduğu gözlemlenmiştir. 5-3 kesitli nozuldan çıkışta dar bir yayılma alanında hedef malzeme PMMA yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin sebep olduğu erozyon oranı düşük olmuştur. Diğer taraftan daha geniş bir hasar yüzeyi oluşturan 5-5 nozulundan püskürtülen aşındırıcı partiküller erozyon oranının yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Farklı iki nozulun püskürttüğü partikül debileri sırasıyla 5-5 nozulu için 37 gr/s iken debi 5-3 nozulu için 21 gr/s ölçülmüştür. 5-5 nozulundaki yüksek partikül püskürtme debisi, erozyon oranının da yüksek olmasına sebep olmuştur.



Şekil 7: Farklı geometrili nozularda erozyon oranı karşılaştırması

Erozif aşınma davranışına etki eden bir başka önemli değişken de aşındırıcı partikül hızıdır. Aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanması, basınçlı hava tarafından aşındırıcı partiküllere uygulanan geri sürüklenme kuvvetiyle ortaya çıkar. Partikülün hızlanmasını sağlayan bu geri sürüklenme kuvvetini etkileyen faktörler; partikül geri sürüklenme katsayısı, partikülün ortalama kesit alanı, havanın yoğunluğu ve partikül ile hava arasındaki bağıl hızdır. Partikül ile hava arasındaki bağıl hızı etkileyen faktörlerden bir tanesi de hızlandırmanın yapıldığı nozulun geometrisi ve boyudur. Bu çalışmada kullanılan 5-3 daralan kesitli nozul geometrisinin partikülün hızlanmasını net şekilde artırdığı Şekil 8'de görülmektedir. 5-3 nozulu boyunca hızlandırılan garnet partikülleri nozul çıkışında yaklaşık 63 m/s hıza ulaşırken, 5-5 nozulu çıkışındaki

partikül hızı 32 m/s civarında kalmıştır. Bir başka deyişle, nozul boyunca daralan kesit, sabit kesite göre partiküllerin yaklaşık iki kat daha fazla hızlanmasına sebep olmuştur. Daralan kesitte aşındırıcı partiküller ilerlerken hava tarafından partiküllere daha yüksek oranda geri sürüklenme kuvveti etki ederek nozul çıkışında yüksek partikül hızlarına çıkmıştır. Diğer taraftan, 5-3 ve 5-5 nozulları için, Şekil 7'deki erozyon oranlarıyla Şekil 8'deki partikül hızları arasında ters orantı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu ters orantının ortaya çıkmasında en büyük faktörlerden bir tanesi partiküllerin nozul içinde hızlanma davranışlarıyla nozuldan çıktıktan sonra hedef malzeme PMMA yüzeyine çarpana kadarki davranışları arasındaki farktır. 5-3 nozulunda hızlandırılan partiküllerin hızları 5-5 nozulundakilere göre yüksek olmasına rağmen PMMA yüzeyine çarptıklarında daha dar bölgeli bir erozyon karakteri oluşturarak düşük erozyon oranı ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca daralan kesitli 5-3 nozulundan çıkan partiküller hedef malzeme PMMA yüzeyine ulaşana kadar daha küçük hacimli bir püskürme konisi içinde hareket ettiklerinden yüzeye çarpıp seken partiküller, kendilerinden sonra gelen partiküllerle daha fazla etkileşime girdiklerinden, peşi sıra gelen partiküllerin hasar oluşturma potansiyellerini düşürmüşlerdir.

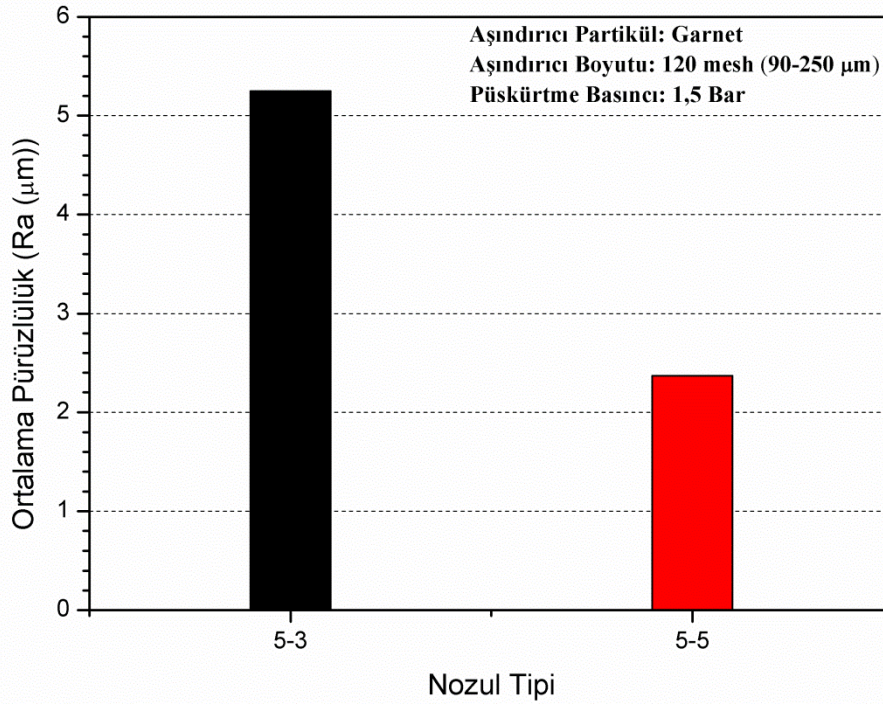


Şekil 8: Farklı geometrili nozullarda partikül hızları karşılaştırması

Erozif aşınma testleri sonrası hedef malzeme PMMA yüzeyinde ortaya çıkan hasar mekanizmalarının değerlendirilmesinde önemli adımlardan bir tanesini de yüzey pürüzlülük ölçümleri oluşturmuştur. Aşındırıcı partiküllerin deneysel parametrelere bağlı olarak hedef malzeme yüzeyinde oluşturdukları pürüzlülük profilleri, malzemenin erozif aşınma davranışı değerlendirmesi açısından önemli bilgiler vermektedir. PMMA hedef malzemeye gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası temassız lazer profilometre ile yüzey taramaları yapılarak pürüzlülük haritaları çıkarılmış ve nozul kesit daralmasının yüzey pürüzlülüğüne etkileri analiz edilmeye çalışılmıştır. Pürüzlülük taramaları iki farklı metot izlenerek sonuçlar analiz edilmiştir. Birinci tip yüzey pürüzlülük analizlerinde, erozyon kraterinin tam orta noktasından, aşındırıcı partikül püskürtme yönüne tam dik açıda profil çizgisinden 0,1 µm hassasiyetle 20 mm uzunluğunda tarama yapılmıştır. Bu profilin ortalama pürüzlülük değerleri her iki nozul için Şekil 9'da verilmiştir. Kesit daralması olmayan 5-5 nozuluyla püskürtme sonrası erozyon krateri orta profil çizgisi ortalama pürüzlülüğü ( $R_a$ ) 2,37 µm ölçülürken; daralan kesite sahip 5-3 nozuluyla püskürtme sonrası  $R_a$  değeri 5,25 µm ölçülmüştür.

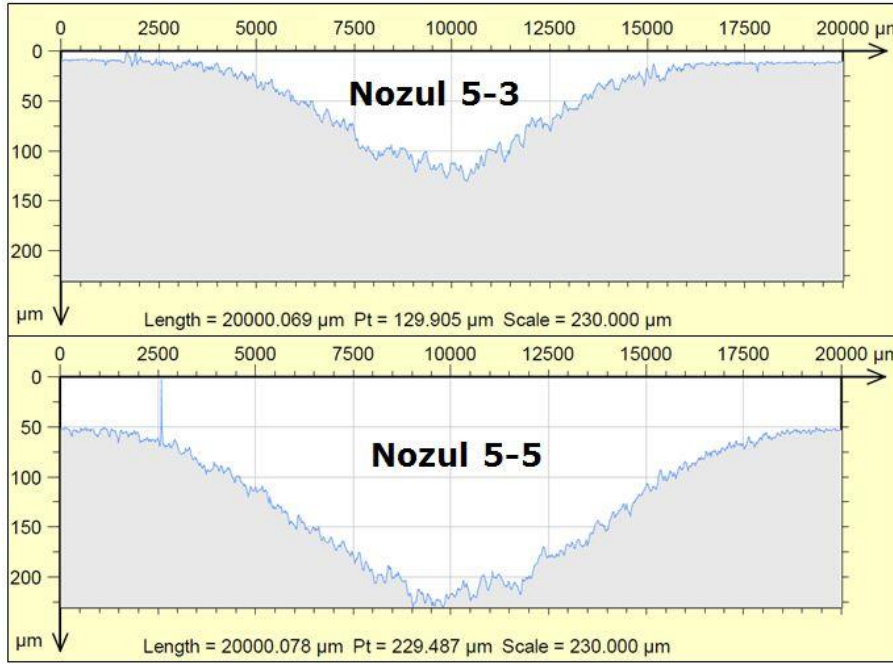


Buradan 5-3 nozuluyla püskürtme sonrası, PMMA yüzeyinde pürüzlülüğü artırıcı çok sayıda vadi ve tepe oluşumu ortaya çıktığı; bu vadiler ve tepeler arasında yükselti farkının yüksek seviyede olduğu analiz edilmiştir. Bu çizilme izlerinin ortalama pürüzlülük değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, 5-5 nozuluyla aşındırma sonrası ortaya çıkan hasar krateri profili ortalama pürüzlülük değeri 2,37  $\mu\text{m}$  ile 5-3 nozulu pürüzlülük değerinin yaklaşık yarısı kadar olmuştur. 5-5 nozulu ile püskürtülen aşındırıcı garnet partikülleri de PMMA yüzeyinde vadi ve tepeler oluşturmasına rağmen, vadi ve tepelerin arasındaki yükselti farkı, 5-3 nozulunda ortaya çıkan fark kadar olmamıştır.



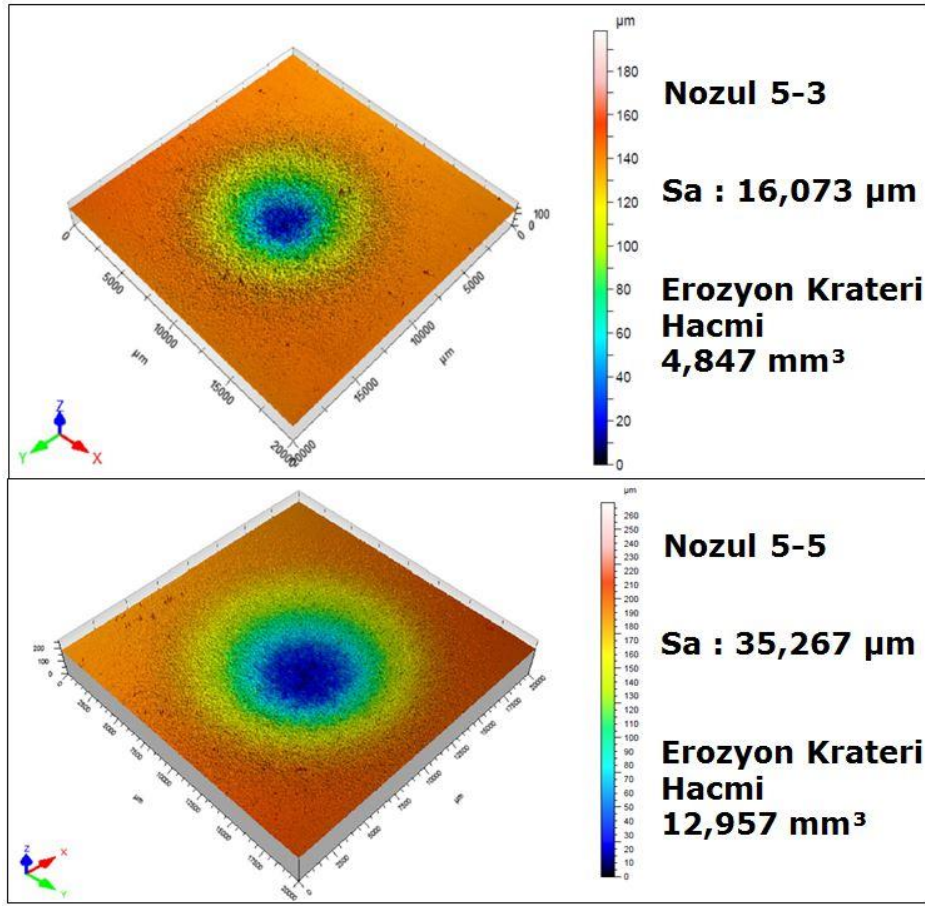
Şekil 9: Eroziyon aşınma testleri sonrası PMMA yüzeyi ortalama pürüzlülük değerleri

Eroziyon aşınma testleri sonrası erozyon krateri merkezinden yapılan profil çizgisi pürüzlülük ölçümlerinde ortaya çıkan hasar krateri kesitleri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde, 5-3 nozuluyla püskürtme sonrası garnet partiküllerinin yaklaşık 140  $\mu\text{m}$  maksimum derinliğe ulaşan ve 13000  $\mu\text{m}$  genişlikte bir krater kesiti oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte 5-5 nozuluyla yapılan testler sonrası oluşan kraterin yaklaşık 225  $\mu\text{m}$  maksimum derinliğe ve 20000  $\mu\text{m}$  genişlikte olduğu gözlemlenmiştir. 5-5 nozuluyla püskürtülen aşındırıcı garnet partiküllerinin hedef malzeme PMMA genişliğinin tamamına yayıldığı görülmektedir. Bu krater profili şekli, Şekil 7'de görülen erozyon oranı sonuçlarıyla da korelasyon göstermektedir. Erozyon oranı olarak da 5-5 nozulunda çok daha yüksek seviyede sonuçlar elde edildiği daha önce belirtilmişti. Şekil 10'da görülen pürüzlülük profilinde ölçümü yapılan bir başka değer ise  $R_z$  değeridir.  $R_z$  değeri pürüzlülük yapılan profildeki 5 tane en yüksek ve 5 tane en alçak noktanın ortalamasını veren bir değerdir. 5-5 nozuluyla püskürtme sonrası PMMA yüzeyi  $R_z$  değeri 14,063  $\mu\text{m}$  olurken; bu değer 5-3 nozulu için 10,671  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Şekil 10'da pürüzlülük ile ilgili tespit edilen ve değerlendirmeye alınan son değer ise  $R_t$  olmuştur.  $R_t$  değeri, pürüzlülük ölçümlerinde, ölçüm yapılan profil uzunluğu boyunca maksimum yükseklikle maksimum derinliğin toplamını vermektedir.  $R_t$  değeri 5-5 nozulu testinden sonra 67,716  $\mu\text{m}$  ölçülürken; 5-3 nozulunda  $R_t$  değeri 20,228  $\mu\text{m}$  olmuştur.



Şekil 10: Erozyon krateri orta nokta pürüzlülük profiline nozul geometrilerinin etkisi

Erozif aşınma testleri sonrası PMMA test numuneleri yüzeylerinde gerçekleştirilen ikinci tip pürüzlülük taramalarında, erozyon kraterinin tamamını kapsayacak şekilde yüzey taramaları gerçekleştirilmiştir. Tarama alanı olarak 20 mm × 20 mm boyutlarındaki yüzey 0,1 µm hassasiyetle taranarak Şekil 10'da verilen karşılaştırmalı yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Bu sayede ortaya çıkan hasar kraterinin makro görüntüleri elde edilmiş ve yüzey hasar morfolojisi analiz edilmiştir. Şekil 10'daki profil pürüzlülük profili yapısına benzer şekilde, alan yüzey pürüzlülük görüntüsü de 5-5 nozuluyla püskürtme sonrası erozif aşınma hasarının 5-3 nozuluna göre PMMA yüzeyinde daha geniş bir alana etki ettiği görülmektedir. Mavi renkle görülen merkez hasar konisinin çapı, 5-5 nozuluyla püskürtme sonrası 5-3 nozuluna göre daha geniş olmuştur. Erozyon krateri yan yüzeylerinde 5-3 nozulu püskürtme sonrası oluşan pürüzlülük daha belirgin fakat daha küçük bir yayılma alanına sahiptir. Diğer taraftan 5-5 nozuluyla püskürtme sonrası oluşan yüzey morfolojisinde pürüzlülük izlerinin daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Bunun en belirgin sebebi aşındırıcı garnet partiküllerinin nozul çıkışından hedef malzemeye ulaşana kadar 5-5 nozulunda daha geniş bir konik hacme yayılarak yol almasıdır. Ayrıca 5-5 nozulunda, erozyon hasar kraterinde derinliğe bağlı olarak değişen aşınma bölgelerinin de daha geniş yüzeyleri kapladığı renk konturlarından görülmektedir. Alan yüzey pürüzlülük taramalarında yüzeydeki hasara bağlı çarpıklık ve bozulmaları ölçümlemede kullanılan  $S_a$  değeri, 5-3 nozulu için 16,073 µm ölçülürken 5-5 nozulu için bu değer yaklaşık iki kat artarak 35,267 µm olmuştur. Alan yüzey taramalarından elde edilen bir başka sonuç, ortaya çıkan erozyon hasar kraterinin hacmidir. Kütle kaybına bağlı PMMA yüzeyinde oluşan erozyon krateri hacimleri yüzey alan taramaları sonrası elde edilmiştir. 5-3 nozuluyla yapılan testler sonrası ortaya çıkan erozyon krateri hacmi 4,847 mm<sup>3</sup> olurken 5-5 nozuluyla yapılan testler sonrası ortaya çıkan hacim 12,957 mm<sup>3</sup> olmuştur. Sonuç itibarıyla 5-5 nozulu ile yapılan test sonrası PMMA yüzeyinde 5-3 nozuluna göre yaklaşık üç kat daha büyük bir erozyon krater hacmi oluşmuştur. Büyük hacimli hasar krateri gözlemlenmesi 5-5 nozuluyla test sonrası ortaya çıkan erozyon oranının daha yüksek olması sonucuyla da uyum göstermektedir.



Şekil 11: PMMA yüzeyinde oluşan hasar kraterlerinin 3 boyutlu topografyaları

## SONUÇ

Bu deneysel çalışmada uçak yapılarında kokpit ve yolcu camlarında kullanılan PMMA malzemenin farklı iki nozul geometrisi kullanılarak gerçekleştirilen erozif aşınma davranışları karakterize edilmiştir. Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partikülleri hızlandırmada birinci dereceden etkiye sahip nozul geometrisinde daralma oluşmasının hem partiküllerin davranışına hem de hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkan hasarlara etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 5-5 ve 5-3 normal ve daralan kesitli nozullarla gerçekleştirilen testler sonrası erozyon oranları, partikül hızları, yüzey ortalama profil pürüzlülükleri, alan pürüzlükleri ve yüzey topografyaları karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu bilgiler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sabit kesitli nozul (5-5), daralan kesitli (5-3) nozula göre PMMA hedef malzemede daha fazla erozyon oranına sebep olmuştur. Nozulda kesit daralması PMMA erozyon oranını düşürmüştür.
- Daralan kesitli nozul (5-3) aşındırıcı partikülleri sabit kesitli (5-5) nozulla göre yaklaşık iki kat daha fazla hızlandırmıştır.
- Daralan kesitli nozulla (5-3) yapılan testler sonrası erozyon krateri merkezindeki profil pürüzlülük değeri sabit kesitli nozulla (5-5) yapılan testler sonrası ortaya çıkan değer yaklaşık iki katı olmuştur.
- Sabit kesitli nozulla (5-5) yapılan test sonrası erozyon krateri merkezi profili daha geniş ve daha derin bir hasar geometrisi ortaya çıkarmıştır.
- Alan pürüzlülüğü ve yayılımı sabit kesitli nozulda (5-5) daha büyük olmuştur.

**Teşekkür**

Bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Aşınma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

**Kaynaklar**

Fidan, S., 2014. *Journal of Polymer Engineering*, Cilt.34, No.6, s.569-579.

Kline, E., Mort, G., LaCompte, J., 1988. *Journal of Protective Coatings & Linings*, Cilt. 5, No. 2, s. 8-12.

Lupoi, R., O'Neill, W., 2011. *Surface & Coatings Technology*, Cilt. 206, s.1069-1076.

Önen, B., Yildiran, Y., Avcu, E., Çınar, A., 2015. *Acta Physica Polonica A*, Cilt. 127, s. 1225-1229.

Seavey, M., 1985. *Journal of Protective Coatings & Linings*, Cilt. 2, No.7, s. 26-37.

Settles, G.S., Garg, S., 1996. *Journal of Thermal Spray Technology*, Cilt. 5 (I), s 35-41.

Sutton, G.E., 1992. John Wdey& Sons, 6th edition, New York.