

POLİMERLER VE POLİMER KOMPOZİTLERDE KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN MEKANİZMALARI VE MALZEME PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Sinan FİDAN¹, Tamer SINMAZÇELİK^{2,3}

¹ Kocaeli Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü,
Aslanbey Yerleşkesi, 41285 İzmit, Türkiye
E-mail: sfidan@kou.edu.tr

² Kocaeli Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Veziroğlu Yerleşkesi, 41040, İzmit
³ TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsü, 41470, Gebze, Kocaeli
E-mail: tamersc@kou.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada polimerlerin ve polimer kompozitlerin katı partikül erozyonuna maruz kalmaları durumundaki davranışları gözden geçirilmiştir. Katı partikül erozyonu oluşum sürecinde ortaya çıkan mekanizmalara değinilmiş daha sonra katı partikül erozyonuna etki eden faktörler üç ana başlık altında toplanarak (deneysel faktörler, aşındırıcı partikül özellikleri, hedef malzeme özellikleri) bu parametrelerinin polimerlere ve polimer kompozitlere etkileri hakkında bilgi verilmiştir.

Partiküllerin tipi, geometrileri, çarpma hızları, malzemeye çarpma açıları, sertliği, debisi, deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı, nem miktarı, polimer malzemelere ilişkin olarak ise fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, katkılı olup olmamaları, termoset veya termoplastik olmaları, kristalinite miktarları, morfolojileri, moleküler yönelme bulunup bulunmadığı gibi faktörlerin etkili olduğu literatürde belirtilmiştir.

Bu durumda belirli bir uygulama alanına ilişkin olarak istenen eroziv aşınma direncine sahip malzemelerin tespit edilmesi aşamasında bu konuda etkin olan parametrelerin fazla olduğunun dikkate alınarak servis şartlarına en uygun parametrelerin dikkate alınarak malzeme ve operasyon parametrelerinin belirlenmesi gerektiği çalışmada vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit; partikül erozyonu, polimer

SOLID PARTICLE EROSION MECHANISMS IN POLYMERS AND POLYMER COMPOSITES AND EFFECTIVE FACTORS ON MATERIAL PERFORMANCE

ABSTRACT

The aim of this study is to review the solid particle erosion behaviors of polymers and their composites. After mentioning about the mechanisms occurred during solid particle erosion process, the effecting parameters were listed under three different headlines (experimental factors, erodent particle properties, target material properties) and detailed information about the effects of parameters to polymers and their composites was given.

From literature survey it is evident that erodent properties such as type, shape, impact velocity, impact angle, hardness, flux rate, environment temperature, amount of humidity and polymeric materials properties like physical, chemical and mechanical, reinforced or not, thermosetting or thermoplastic, rate of crystallization, morphologies, molecular tendency have got great effects.

In this manner, when choosing the right erosion resistant material with remembering a number of influencing parameters; in this work it is emphasized the need of determination right material and operational parameters for appreciate service conditions.

Keywords: Composite; polymer; solid particle erosion

GİRİŞ

Katı partikül erozyonu, malzemelere katı partiküllerin çarpmasıyla ortaya çıkan bir aşınma şeklidir. Diğer tribolojik süreçlerde olduğu gibi katı partikül erozyonu da kompleks bir süreçtir.[1] Tribolojik etkileşimde bulunan unsurlar arasındaki termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar erozyon şekli ve miktarını yakından etkiler. Erozyon mekanizmalarının temel ilkelerini anlamaya çalışma girişimleri 20. yüzyılın son yarısında başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bütün bu yıllar boyunca bilim adamlarının ilgileri geleneksel malzemelere, özellikle de metallere odaklanmıştır. Partikül erozyonuyla kırk yıllık uğraşından sonra Finnie 1995'te partikül erozyonunun geçmişi ve geleceği ile ilgili bir makale sunmuştur [2]. Bu makalede katı partikül erozyonunun etki parametreleri, mekanizmaları, metal ve seramik malzemelerin erozyonu esnasındaki davranış prensipleri gözden geçirilmiştir. Aynı yıl Meng tarafından yayımlanan bir başka makalede geçerli aşınma modelleri ve bu modelleri temsil eden denklemler hakkında bilgi verilmiştir [3].

Günümüzde polimerler ve kompozitleri mükemmel spesifik özelliklerinden dolayı çeşitli makina elemanlarında ve mühendislik sistemlerinde yapısal malzemeler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Metallerle karşılaştırıldığında bazı avantajlar sunarlar. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, kolay işlenebilirlik ve şekillendirmede tasarımcıya kolay şekil verme özgürlüğü gibi (özellikle termoplastiklerde). Bununla beraber metallerle karşılaştırıldığında kompozitlerin çok karmaşık hasar ve hata mekanizmalarının olması hasar analizlerini karmaşık hale getirmektedir. Polimer kompozitlerin uygulama örnekleri olarak kum taşıyan boru hatları, petrol rafinerisindeki çamur taşıma hatları, helikopter rotor palleri, pompa tahrik kanatçıkları, yüksek hızlı taşıtlar ve uçaklar, su türbinleri, uçak motor kanatçıkları, füze bileşenleri verilebilir. Bu tür uygulamalarda partikül erozyonu direnci önemli bir özelliktir çünkü bu parçalar sıklıkla aşındırıcı partikülle etkileşen ortamlarda çalışırlar [4-7].

Son otuz yıldır polimerlerin ve polimer kompozitlerin erozyon davranışları yoğun şekilde araştırılmaktadır. Deneysel koşullarına ve hedef malzeme özelliklerine bağlı olarak erozyonda değişik eğilimler gözlemlenmektedir. Polimerlerin ve polimer kompozitlerin oldukça zayıf erozyon direnci gösterdikleri yaygın olarak bilinmektedir. Polimerlerin aşınma dirençleri metallerden 2 ile 3 kat daha azdır. Daha da ötesi sıradan malzemelerde kullanılan modellerin hiçbirisi polimer ve polimer malzemelerin aşınma davranışlarına güvenilir şekilde adapte edilememektedir [3].

Geçerli tatmin modellerinin olmaması polimerlerin ve polimer kompozitlerin eroziv aşınma davranışları hakkında bilgi veren bir bilgi bankasının oluşturulmasına olan ihtiyaç oldukça fazladır. Bu konu hakkında yayımlanan makaleler henüz yeterince fazla değildir. Bu çalışmada, polimerlerin ve polimer kompozitlerin katı partikül erozyonu mekanizmaları ve bunları etkileyen parametreler ile ilgili literatür özetlenmiştir.

1. Katı Partikül Erozyonu Süreci

Aşındırıcının darbe yüzeyindeki bölgesel enerji yoğunluğu erozyon aşınması için çok önemli bir etkidir [1,8,9,12]. Diğer yandan hedef malzemenin özellikleri de (boyut, yüzey topografyası, sertlik vb.) son derece önemlidir. Bu faktörler dışında, çarpma açısı, çarpma hızı

ve partikül debisi kritik etkiye sahiptir. Bir partikülün çarpması, malzeme yüzeyine büyük bir darbe kuvvetinin uygulanması anlamına gelir. Çarpışma boyunca, partikülün kinetik enerjisi çeşitli şekillerde harcanır.

1.1. Dik açılı, esnek çarpma

Partikülün kinetik enerjisi çarpma sonrası malzeme içerisinde elastik deformasyonlar şeklinde biriktirilir ve geri sekme safhasında tekrar partikül kinetik enerjisine dönüşür. Partikül erozyonunun gözlemlenmediği bazı kauçuk esaslı malzemeler dik çarpma açılarındaki buna benzer davranış gösterirler. Partikül erozyonu aşınması bu durumda elastomerlerde ancak termal bozulmanın ortaya çıktığı uzun erozyon süreçlerinden sonra ortaya çıkar. Keskin kenarlı partikül darbelerinin sonucunda kesme/yırtılma ve malzeme parçalarının kopması gerçekleşir. Yüksek dayanımlı sert malzemelere, düşük darbe enerjili (düşük hızlı ve/veya küçük kütleli aşındırıcı) partiküller çarptığında hemen hemen elastik darbe etkisi baskın gelir.

1.2. Dik açılı, plastik çarpma

Metal ve seramik esaslı malzemelerde bütün enerjinin plastik deformasyona dönüşmesi genelde daha nadir rastlanmaktadır. Diğer yandan polimer esaslı malzemelerde ise yüksek enerjili partikülün malzeme içerisine penetre etmesi ve bu esnada malzemede plastik deformasyonlara yol açması gözlemlenmektedir. Özellikle polimer esaslı malzemelerde aşınma sürecinin ilk safhalarında yüzeye saplanıp kalan partiküllerin ağırlıkça malzemenin ağırlaşmasına neden olan bir etki gösterdikleri bilinmektedir.

1.3. Dik açılı, esnek/plastik çarpma

En sık rastlanan çarpma türüdür. İlk çarpma enerjisinin büyük kısmı iç sürtünmeyle ısı enerjisine çevrilirken enerjinin kalanı plastik deformasyonlara harcanır. Partikülün geri sekme kinetik enerjisi göreceli olarak azalır. Tek bir çarpma genellikle malzemede kırılma ve deformasyona neden olmazken çarpma alanında tekrarlanan darbeler malzemenin aşınmasına sebep olur. Malzemenin içerisinde, malzemenin aşınmasına yol açan küçük mikro-çatlaklar ortaya çıkabilir.

Çarpışan malzemelerin sünekliğinin az olması; daha az sayıda gerilme çevrimiyle (zorlanma tekrarı) hatanın ortaya çıkması ve daha fazla miktarda enerjinin kırılmaya (bu yüzden erozyona) sebep olması anlamına gelir.

1.4. Eğik, esnek/plastik çarpma

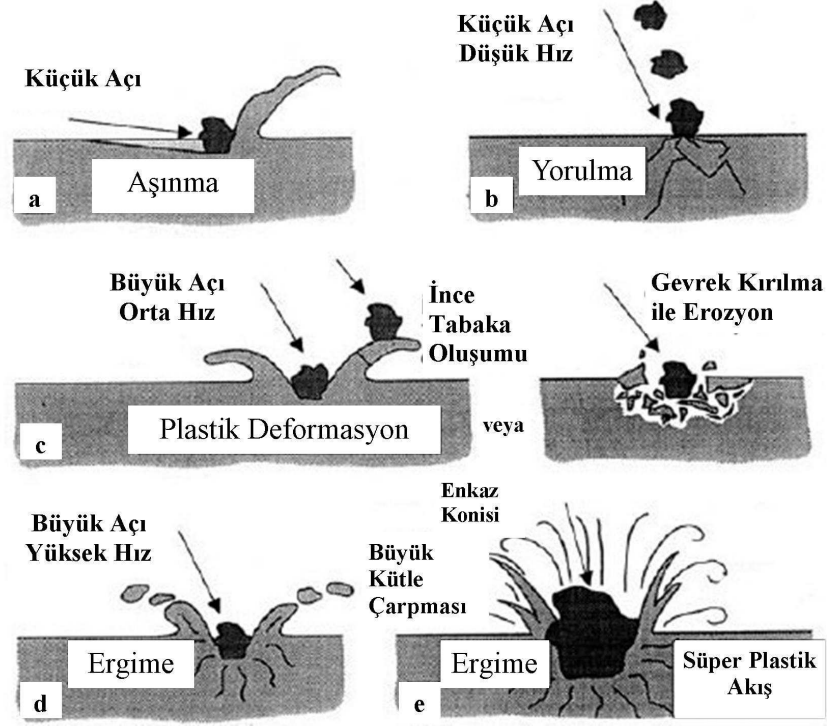
Bu çok genel bir tip çarpışma şeklidir. Başlangıçtaki mikro-kesme ve mikro yarı (mikro sürülme) mekanizmalarından dolayı dik çarpmadan farklıdır. Malzeme dik çarpmadakine benzer şekilde deforme olur fakat ek olarak özellikle keskin kenarlı aşındırıcı partiküller tarafından kesilir ve yarılr. Mikro kesilme ve mikro yarıma olayları, hedef yüzeylerin içine nüfuz edebilen partiküllerin sertliği ile ilgilidir

Kırılmalan malzemelerin yüzeylerinde partiküller tarafından kesilme türü bir deformasyon çok fazla beklenmez. Aşındırıcı partikül/malzeme etkileşimi ve aradaki enerji transferi sünek malzemelerdekine göre daha küçüktür. Eğer çarpışan malzemelerin sürtünme katsayısı yüksekse o zaman malzeme üzerine daha fazla enerji transfer edilir. Orta büyüklükteki açılardan yüksek çarpma açılarına kadar iç gerilmelerin artışının sonucu maksimum erozyon aşınması ortaya çıkar.

Düşük çarpma açılarındaki aşınan elastomerlerde partikül hareket yönüne dik doğrultuda yırtık ve çatlak oluşumu gözlemlenir. Çarpma yönüne paralel doğrultuda uzanan bir dizi oluk, erozyonun başlangıç safhasında ortaya çıkar. Çarpan partiküller yüzey üstünde kayar ve her

oluğun tabanında oluşan yorulma çatlaklarının büyümesine sebep olarak olukları deforme eder. Bu yorulma çatlaklarının büyümesi, gerilme zorlanmaları tarafından sürülen erozyon aşınması sürecinde bir basamak olarak varsayılabilir [13].

Stachwiak erozyon aşınmasının bilinen mekanizmalarını şematik olarak özetlemiştir [14]. Bu gösterimin bir kısmı aşağıdaki Şekil – 1’dir.



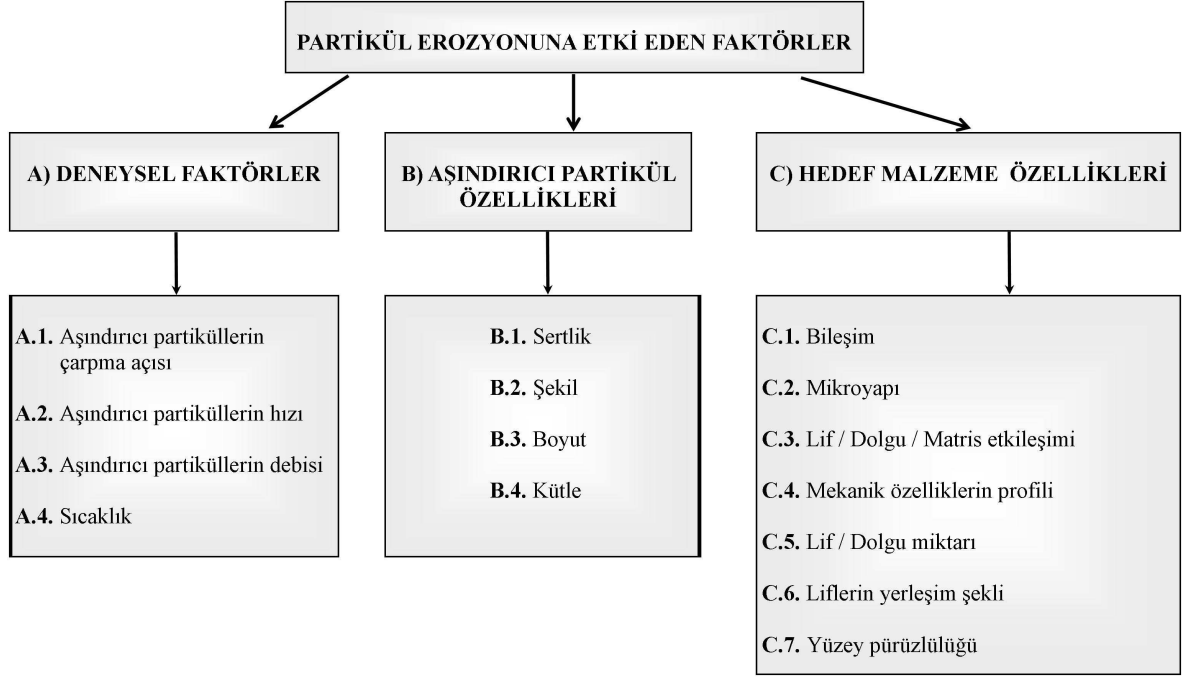
Şekil 1. Katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları

(a) küçük çarpma açılarında aşınma, (b) düşük hız, büyük çarpma açısında yüzey yorulması, (c) orta hız, büyük çarpma açısı boyunca gevrek kırılma veya çoklu plastik deformasyon, (d) yüksek çarpma hızlarında yüzey ergimesi, ikincil etkilerle makroskopik erozyon [39]

2. Partikül Erozyonu Mekanizmaları

Erozyon boyunca malzeme kopmaları; birbiriyle bağıntılı birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörleri üç ana başlık altında toplamak mümkündür:

Tablo 1. Partikül erozyonuna etki eden faktörler



Bütün bu faktörlerin bileşimi, aşınmanın meydana geldiği çevresel şartlarında özellikleri ile birleşerek karmaşık bir yapı oluşturur.

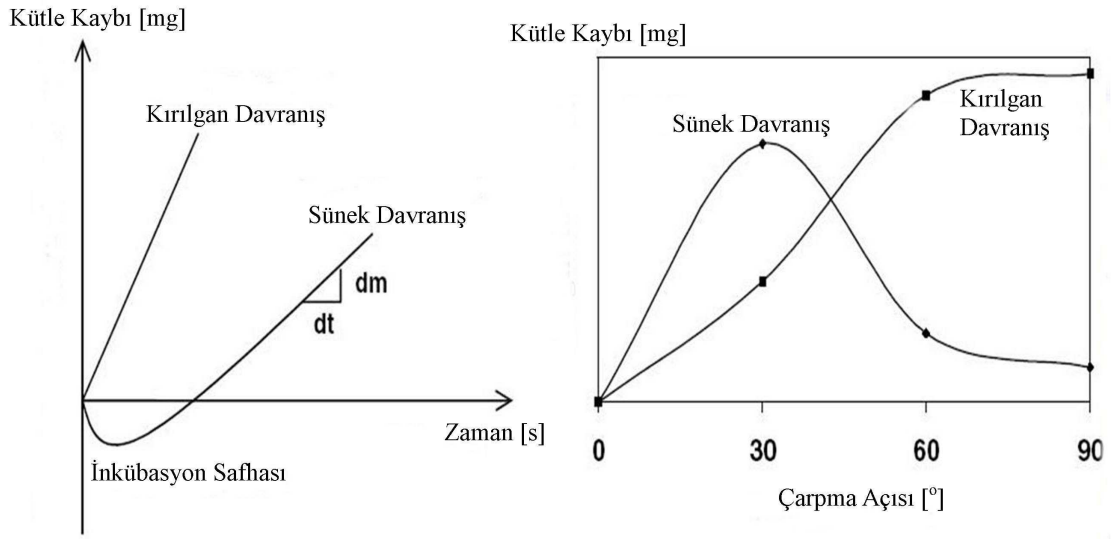
2.1. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

Çarpma açısına (a) bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki biçimde incelenebilir [15]:

- Dik çarpma açılarındaki erozyon ($a \approx 90^\circ$)
- Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^\circ < a < 90^\circ$)

Partikül erozyonu, düşük çarpma açılarındaki iki cismin sürtünmesine benzer bir mekanizmaya sahiptir çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlerler. Yüksek çarpma açılarındaki ise aşınma mekanizması tipik çarpma şeklinde katı partikül erozyonu şeklindedir.

Çarpma açısı ve çarpma sürelerinin değişimi, farklı malzemelerde farklı karakteristiklerde sonuçlanırlar. Şekil 2 sünek ve gevrek (kırılgan) malzemelerde erozyon zamanının ve süresinin bir fonksiyonu olarak tipik erozyon diyagramlarını (kütle kaybı) göstermektedir. Polimerlerin ve kompozitlerinin erozyon mekanizmaları polimerlerin ve takviye malzemelerinin sünek ve gevrek olmaları neticesinde değişkenlik göstermektedir [4].



Şekil 2. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri[22]

Şekil – 2’de tasvir edildiği gibi kırılgen malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarındaki ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarındaki ortaya çıktığı görülmektedir. Malzeme kaybının çarpma zamanıyla değişimi dikkate alındığında ise sünek davranış gösteren malzemelerde aşınma zamanla lineer orantılı hale gelmeden önce hedef malzeme ağırlığında artışın olduğu bir gelişim safhasının (inkübasyon periyodu) varlığı net olarak görülmektedir. Bu periyod aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye gömülmesiyle ortaya çıkar. Bu partiküllerin ardışık olarak hedef malzeme yüzeyinden ayrılmasından sonra kararlı erozyon davranışı gözlemlenir [4,5,17,18]. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [5,19-21]. Hedef malzeme olan polimer veya kompozitin partikülün çarpması sonrası ortaya çıkan etkileşim oldukça karmaşık bir alt yapıya sahiptir. Katı partikül tüm enerjisi ile polimer esaslı malzemeye çarptığında enerjisini malzemeyi elastik ve plastik deformasyona uğratmaya, sürtünme ile ortaya çıkan ısı oluşumu ile de yapıyı moleküler anlamda deforme etmeye harcarlar.

Elastomerler sünek karakteristikli malzemelere benzer şekilde en fazla erozyon aşınmasını düşük çarpma açılarındaki gösterirler. Fakat bu aşınma miktarı sünek termoplastiklere kıyasla çok düşüktür. Dik çarpma açılarındaki malzemedeki erozyon davranışı kararlı bir yapıya ulaşmayabilir. Elastomer kütlelerinde bir azalma oluşmasa bile bozulma devam edebilir. Malzeme yüzeyinde partikülün çarpması ile yırtılan veya kısmen kopan parça küçük bir kısmının ana malzeme ile bağlı olması nedeniyle yerinden ayrılmayabilir. Bu ağırlık kaybının ölçülmesinde net bir aşınma olarak görülmesi de gerçekte fonksiyonelliğini kaybetmiş, deformasyona uğramış ve yüzey özelliklerini yitirmiş bir malzemedir [21]. Erozyon davranışlarındaki farklılıklar; kauçuklar için yırtılma ve yorulma; sünek metaller ve polimerler için kesme ve sürülme; seramikler, camlar ve gevrek polimerler için çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme taşınması mekanizmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır [22].

Partiküllerin hareket hızı bileşenlerini yatay ve düşey bileşenler olarak ayırmak mümkündür. Sert partiküller özellikle sünek malzemeleri aşındırırken düşük çarpma açılarındaki daha az çarpma, ağırlıklı olarak yatay hız bileşeni ile malzeme yüzeyini çizme ve kesme mekanizmalarını harekete geçirmektedir. Açı büyüdükçe partikül hızının dikey bileşeni

artmakta ve daha ağırlıkla çarpma etkisine benzer bir etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır. Bu mekanizmaların etkisi ile sünek malzemelerde çarpma açısının küçük açılardan başlayarak giderek artması orta dereceli çarpma açılarındaki aşınmanın maksimuma erişmesi gözlenmektedir. Partiküllerin malzeme ile temas etmeleri sonrası kaymaları ve dönmeleri de malzeme ile etkileşimde farklı sonuçlar doğurmaktadır.

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılmalı malzemeler farklı özellikler gösterir [23]. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarındaki (15°-30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılmalı malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarındaki (90°) gösterirler. Takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun 45°-60° arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [24-26]. Karbon-fiber ve cam-fiber takviyeli epoksilerin her çeşit fiber yerleşim şeklinde maksimum kütle kaybı 60° çarpma açısında gözlenmiştir [22-24]. Takviye edilmemiş polimerlerin büyük kısmı sünek özelliğe sahiptir ve sünek malzemelerin erozyonunda kesme mekanizmalarının baskın olmasından dolayı 30° civarında en yüksek erozyon oranına sahiptirler [27,28].

2.2 Aşındırıcı partiküllerin hızı

Aşındırıcı partikül hızı (v) aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Eğer hız çok düşükse, çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder [29]. Hız arttığında, aşınan malzeme partikül çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir. Bu sistemde, aşınma tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Kırılmalı aşınma davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelir. Çok yüksek partikül çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeyde ergime ortaya çıkabilir.

Ortadan yüksek hızlara doğru, aşınma oranıyla çarpma hızı arasındaki ilişkiyi bir güç kanunu açıklayabilir [29]:

$$-\frac{dm}{dt} = kv^n \quad (1)$$

burada “m” aşınan numunenin kütlesi, “t” işlemin devam etme süresini, “k” deneysel bir sabit, “v” hız değeridir.

Aşındırıcı ve hedef malzemenin karakteristik özellikleri ‘n’ üssünün değerini tanımlar. Kırılmalı özelliğe sahip polimer kompozit malzemeler için ‘n’ değeri 3-5 arasında değişirken; sünek özellikteki polimerik malzemeler için ‘n’ değerinin 2-3 arasında değiştiği belirlenmiştir [6,30].

2.3 Aşındırıcı partiküllerin debisi

Partikül akış debisi (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi) erozyon aşınmasını yakından etkileyen parametrelerden biridir. Teorik olarak, bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin akış debisinden bağımsız olmalıdır. Ancak pratikte, ölçülen aşınma oranı üzerinde partikül debisinin önemli etkileri vardır [20,29,31,32].

Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Bu limit değerın gelen ve geri seken aşındırıcı partiküller arasındaki girişimin bir sonucu olduğuna inanılır [12]. Bu etki, çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir [32]. Bu çarpışma teorisi çok düşük değerli akış debi değerlerinde bile önemli role sahip olabilir. Partikül akış oranı sınırı elastomerler için 100 kg/m^2 kadar düşük olduğu gibi büyük ve hızlı parçalarla metallerde oluşan erozyon için 10000 kg/m^2 kadar yüksek olabilir. Sınır akış debisi değeri geçildiğinde aşınma oranı çok az düşer [12,20].

Her ne kadar aşındırıcı akış debisinin etkisi temelde yukarıda bahsedilen etkileşimlere bağlansada, farklı mekanizmalar da oluşabilir ve erozyon aşınmasını etkileyebilir. Süreç, her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Akış debisi arttığında, ilgili yüzeydeki çarpmalar arası zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [20].

Yukarıdaki analizlerden; seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesi gereklidir sonucu çıkarılabilir.

2.4. Sıcaklık

Termal ve termomekanik açıdan bakıldığında, termal iletkenlik ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) katı partikül erozyonunu kontrol eden faktörlerden iki tanesidir. Hedef malzemeye bir aşındırıcı partikülün çarpması sonucu oluşan bölgesel deformasyon ve düşük termal iletkenliğe sahip bir malzemedeki yüksek gerinim oranlarında baş gösteren adyabatik şartlar yüksek sıcaklıklar ortaya çıkarabilir. Maksimum sıcaklık, hedef malzeme üzerinde yapılan iş ve malzemenin özgül ısıyla yoğunluğuna bağlıdır. Yapılan iş çarpma boyuncaki maksimum basıncın bir fonksiyonudur ve sırasıyla hedef malzemenin ve aşındırıcı partikülün sertliğine bağlıdır. Sıcaklık, çarpma bölgesinden, oluşum zamanından daha kısa sürede uzağa akabiliyorsa sıcaklık artışı küçük olur [33,34]. Yüksek sıcaklıklar kısaca malzemeyi yumuşatabilir [33,35,36]. Özellikle polimerlerin düşük ısı iletme yeteneklerinin olması malzemelerin ısının etkisiyle yumuşayıp kolay deforme olur hale gelmesi riskini ortaya çıkarmaktadır. Artan sıcaklıkla polimerlerin mekanik özelliklerinin düşmesi bozulma ve malzeme kaybını açıklayacaklardır [33].

Camsı geçiş sıcaklığının (T_g), polimerlerin erozyon aşınması direncine etkilerine dayanılarak aşağıdaki yönelimler gözlemlenmiştir:

- (i) Oda sıcaklığından (T_o) daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahip olan polimerlerin erozyon aşınması; oda sıcaklığından (T_o) daha düşük camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahip olanlardan daha yüksektir [13].
- (ii) Oda sıcaklığından (T_o) daha düşük camsı geçiş sıcaklığı (T_g) için, deneysel sıcaklıkla camsı geçiş sıcaklığı (T_c) arasındaki fark büyüdükçe aşınma oranı azalır [13,19].

2.5. Aşındırıcı partikül Sertliği

Erozyon süreci, eğik açılarda ve kırılğan erozyon mekanizması baskın olduğunda ortaya çıkarsa; artan sertlik, erozyonu arttıran bir etkiye sahip olur. [36].

2.6. Aşındırıcı partikül Şekli

Aşındırıcı partiküller eğer keskin olmayan veya küresele yakın şekle sahipse erozyon plastik deformasyona ağırlıklı; eğer partiküller keskin kenarlı ise kesme, kırılma ve parçalanmaya daha çok benzer. Keskin olmayan partikül küresel şekle benzeyen bir dairesel yüzeye sahipken keskin partikül aşınma süreci için kritik olan küçük yarıçaplı köşelerle birbirine bağlanan düzlemsel alanlardan oluşur [12].

2.7. Aşındırıcı partikül boyutu

Erozyon miktarının, kritik bir değer üzerinde partikül büyüklüğünden bağımsız olduğu kabul edilir [13,37]. Bu kritik değer 100-200 µm arasında gözlemlenmiştir, bununla beraber bu değer etki şartlarına ve partikül-hedef etkileşimine bağlıdır [13,37]. Bu kritik değere kadar, deneysel sonuçlar aşındırıcı büyüklüğü arttıkça erozyon miktarının arttığını rapor etmişlerdir.

2.8. Aşındırıcı partikül kütlesi

Aşındırıcı partikül kütlesi diğer etki parametreleri göz önüne alındığında daha az etkiye sahiptir. Kütle, seçilen aşındırıcı malzemeye ait karakteristik bir özelliktir.

2.9. Hedef malzeme özellikleri

Malzemenin karakteristik özelliklerinin erozyon aşınmasının üzerinde çok önemli etkileri vardır ve yaygın olarak incelenmiştir.

Polimer kompozitler erozyon aşınmasının ortaya çıktığı yerlerde genellikle yapısal bileşenler olarak kullanılırlar. Farklı tipteki kompozit malzemelerin farklı erozyon aşınması davranışlarının kaynağı bir tarafta takviye elemanının miktarı, tipi, yerleşimi ve özellikleri iken diğer tarafta matris elemanın tipi ve özellikleri ile beraber fiber/dolgu maddelerine yapışma özellikleridir.

Kompozitlerin erozyon aşınmasıyla ilgili çalışmalarını partikül takviyeli sistemlerden çok fiber takviyeli polimerler (FTP) üzerinde yapılmıştır.

Fiber takviyeli polimerlerdeki erozyon oranlarını etkileyen faktörler kısaca şunlardır:

- (a) matrisin termoset veya termoplastik olması
- (b) fiberlerin kırılma dayanıklılığı
- (c) fiberler ve matris arasındaki arayüzey bağ kuvveti [6]

Fiber takviyeli kompozitlerin erozyon davranışı için aşağıdaki sıralama rapor edilmiştir [38]:

- (i) reçine zengini bölgelerde erozyon ve lokal malzeme kaybı
- (ii) fiber bölgelerinde fiber kırılmasına bağlı erozyon
- (iii) fiberler ve bitişiklerindeki matrislerin arayüzey bölgelerinde erozyon

Öncelikle matrisin kopup uzaklaşmasından dolayı, matris malzemelerinin erozyon karakteristikleri kompozitlerin mukavemetine etki eden birinci dereceden önemli faktörlerdir.

Sonuç olarak termoset veya termoplastik matrislerin içine kırılma dayanıklı fiberlerin dahil edilmesi kompozitlerin erozyon direncini azaltır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada polimerlerin ve kompozitlerinin katı partikül erozyonu mekanizmalarını açıklamak, bu mekanizmalara etki eden faktörler hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır.

Katı partikül erozyonunda diğer malzemeler için de geçerli olan hemen her parametre polimer ve kompozitlerinin de aşınmasında etkili olmaktadır. Bunun yanı sıra polimer esaslı malzemelerin yapısal özelliklerinden kaynaklanan faktörler bu malzemelerin aşınma karakteristiklerini de etkilemektedir. Tek fazlı katkısız polimerler ile katkılı kompozitlerin eroziv aşınması arasında önemli farklılıklar söz konusudur. Partikül, kısa yada sürekli fiber takviyesinin partikül ile etkileşimi ve aşınma esnasında aldığı rol oldukça önemli ve belirleyicidir.

Genelde takviye edici fazlar polimere kıyasla daha rijit olduklarından ağırlık oranları arttıkça erozyon karakteristiği gevrek malzeme aşınma karakteristiği haline dönüşmektedir. Diğer yandan takviye edici fazların erozyon karakteristikleri de son derece önemlidir. Cam gibi oldukça kırılğan olan bir takviye malzemesinin kullanımı erozyon etkisi ile camın kırılarak malzeme içinde 3 cisimli abraziv aşınmaya benzer bir etki yaratması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Fiber oryantasyonu da diğer önemli bir parametredir. Partikül hareket yönüne göre fiberlerin aldıkları konumun paralel veya dik olması halinde kırılma ve aşınma karakteristikleri önemli ölçüde değişmektedir.

Sonuç olarak partikül erozyonu pek çok parametreye bağlı olarak değişen karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bu aşınma davranışının modellenmesi de oldukça karmaşık olabilmektedir. Polimer esaslı malzemeler düşük mekanik özelliklere sahip, termal iletkenlik katsayılarının düşük olması nedeniyle partikül erozyonu esnasında ısınıp yumuşayan, çevresel etkiler ve proses parametrelerine bağlı olarak çok değişken özellikler gösteren malzemelerdir. Bu malzemelere yapıyı modifiye etmek amacıyla eklenen takviye edici malzemeler ile yapı 2 veya çok fazlı malzeme haline gelmektedir. Çok fazlı malzemelerin eroziv aşınması ise malzemeyi karakterize eden fazla sayıdaki parametrelerinde devreye girmesi ile önceden kestirilmesi ve aşınma karakteristiklerinin incelenmesi daha karmaşıktır. Bu nedenle geniş bir malzeme grubunu içeren polimer ve polimer kompozitlerin eroziv aşınma karakteristiklerinin incelenmesi son derece popüler ve üzerinde sık çalışılan konulardan biridir.

Kaynaklar

1. VDI 3822, Schadensanalyse, Schädigungen durch tribologische Beanspruchungen, in "VDI Handbuch Werkstofftechnik, Konstruktion, Betriebstechnik Teil 4" (VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989) Blatt 5.2.
2. I. FINNIE, Wear 186/187 (1995) 1.
3. H. C. MENG and K. C. LUDEMA, ibid. 181–183 (1995) 443.
4. T. -H. TSIANG, Journal of Composite Technology and Research 8(4) (1986) 154.
5. G. P. TILLY, Wear 14 (1969) 63.
6. K. V. POOL, C. K. H. DHARAN and I. FINNIE, ibid. 107 (1986) 1.
7. C. E. SMELTZER, M. E. GULDEN and W. A. COMPTON, Journal of Basic Engineering 19 (1970) 639.
8. D. R. ANDREWS, J. Phys.: Appl. Phys. 14 (1981) 1979.
9. I. M. HUTCHINGS, J. Phys. D: Appl. Phys. 25 (1992) A212.
10. A. I. MAREI and P. V. IZVOZCHIKOV, in "Abrasion of Rubber" (MacLaren, London, 1967) p. 274.
11. J. G. A. BITTER, Wear 6 (1963) 169.
12. J. C. ARNOLD and I. M. HUTCHINGS, J. Mater. Sci. 248 (1989) 833.
13. K. FRIEDRICH, J. Mater. Sci. 21(3) (1986) 3317.
14. J. K. LANCASTER, Wear 141 (1990) 159.

15. H. CZICHOS and K. -H. HABIG, in "Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß, Systemanalyse, Prüftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselement" (Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, Wiesbaden, 1992) p. 128.
16. G. W. STACHOWIAK and A. W. BATCHELOR, in "Engineering Tribology Tribology Series 24" (Elsevier, Amsterdam, 1993) p. 586.
17. RAO P. VEERABHADRA and D. H. BUCKLEY, ASLE Transactions 29(3) (1985) 283.
18. J. C. ARNOLD and I. M. HUTCHINGS, Wear 138 (1990) 33.
19. A. BRANDSTÄDTER, K. C. GORETTA, J. L. ROUTBORT, D. P. GROPPI and K. R. KARASEK, *ibid.* 147 (1991) 155.
20. K. - J. GROß, Dissertation, Universität Stuttgart, 1988, p. 3.
21. *Idem.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 25 (1992) A222.
22. U.S. Tewari, A.P. Harsha, A.M. Hager, K. Friedrich, Solid particle erosion of carbon fibre and glass fibre epoxy composites, Composites Science and Technology 63 (2003) 549-557.
23. Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion. Wear 1995;186-187:1-10.
24. Hager A, Friedrich K, Dzenis YA, Paipetis SA. Study of erosion wear of advanced polymer composites. In: Street K, editor. ICCM-10 Conference Proceedings, Whistler, BC, Canada. Cambridge (UK): Woodhead Publishing; 1995. p. 155-62.
25. Zahavi J, Schmitt Jr GF. Solid particle erosion of reinforced composite materials. Wear 1981;71:179-90.
26. Miyazaki N, Takeda N. Solid particle erosion of fibre reinforced plastics. Journal of Composite Materials 1993;27:21-31.
27. Bitter JGA. A study of erosion phenomenon, part-I. Wear 1963; 13:5-21.
28. Bitter JGA. A study of erosion phenomenon, part-II. Wear 1963; 13:169-90.
29. G. W. STACHOWIAK and A. W. BATCHELOR, in "Engineering Tribology Tribology Series 24" (Elsevier, Amsterdam, 1993) p. 586.
30. M. ROY, B. VISHVANATHAN and G. SUNDARARAJAN, Wear 171 (1994) 149.
31. P. H. SHIPWAY and I. M. HUTCHINGS, Wear 174 (1994) 169.
32. K. ANAND, S. K. HOVIS, H. CONRAD and R. O. SCATTERGOOD, *ibid.* 118 (1987) 243.
33. R. A. DOYLE and A. BALL, *ibid.* 151 (1991) 87.
34. S. M. WALLEY and J. E. FIELD, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 321 (1987) 277.
35. B. J. BRISCOE, P. D. EVANS, E. PELILLO and S. K. SINHA, Wear 200 (1996) 137.
36. Y. I. OKA, M. MATSUMURA and T. KAWABATA, *ibid.* 162-167 (1993) 688.
37. M. M. STACK and N. PUNGWIWAT, Materials Science and Technology 15 (1999) 337.
38. J. ZAHAVI and G. F. SCHMITT, Wear 71 (1981) 179.
39. N.M. Barkoula, J.Karger Kocsis, Journal of Materials Science 37 (2002) 3807-3820.