




**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Mehmet BAĞCI**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kasım–2010**
**KONYA**
**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

## CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Mehmet BAĞCI**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK**

**2010, 167 Sayfa**

**Jüri**
**Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK**
**Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR**
**Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**
**Prof. Dr. Mehmet ÇELİK**
**Yrd. Doç. Dr. Yusuf YILMAZ**

Bu çalışmada, günümüzde hızlı bir gelişme gösteren, yüksek mukavemet, iyi kalıplama ve düşük maliyet özelliklerine sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Deneylerde çarpma açıları, çarpma hızları, aşındırıcı partikül boyutları ve fiber doğrultuları değiştirilerek erozyon oranlarındaki değişimler araştırılmıştır.

Çalışmalar, kuru ve basınçlı hava ile aşındırıcı partiküllerin deney numunesi yüzeyine çarptırıldığı ve ASTM G76–95 standart test metoduyla uyumlu olan özel tasarlanmış erozyon aşınma deney tesisatında yapılmıştır. Ayrıca aşındırıcı partikül hızının tespiti için literatürdeki çift disk metodu düzeneği oluşturulmuş ve bu düzenek vasıtasıyla çarpma hızları tespit edilmiştir.

Deneylerde saf haldeki cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler ana deney numunesi olarak seçilmiş olup bu saf yapı içerisine reçinenin %15'i oranında ayrı ayrı Borik Asit ($B_2O_3$), Borax ($B_2O_3$), Silisyum Oksit ($SiO_2$) ve Alüminyum Oksit ($Al_2O_3$) dolgu maddeleri ilave edilerek yeni cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler elde edilmiştir. Üç farklı çarpma açısı ($30^o$, $60^o$ ve $90^o$), üç farklı çarpma hızı (≈23, 34 ve 53 m/s), iki farklı alümina aşındırıcı partikül boyutu (≈200 ve 400 μm) ve iki farklı fiber doğrultusu ($0^o$ ve $45^o$) için erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları ile deney numunelerindeki ağırlık kayıplarına bağlı olarak çarpma açısının, çarpma hızının, aşındırıcı partikül boyutunun ve fiber doğrultusunun bir fonksiyonu olarak erozyon oranı değerleri hesaplanmış ve bu değerlere bağlı olarak grafikler çizilmiş ve yorumlar yapılmıştır. Ayrıca deneye tabi tutulan deney numunelerinin aşınan yüzeylerinin mikroskop ve SEM görüntüleri incelenmiş olup deneysel sonuçların Çok Faktörlü Varyans Analizi (MANOVA) ile istatistikî değerlendirmesi yapılmış ve deney numunelerindeki hacimsel kayıplar tespit edilerek ağırlık kayıpları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneyler sonunda saf GF/EP deney numunelerinin erozyon aşınması ile bu saf yapı içerisine katılan dört farklı katkı maddesinin oluşturduğu deney numunelerinin erozyon aşınmaları incelendiğinde Alüminyum Oksit ve Silisyum Oksit ilaveleri birbirine yakın sonuçlar vermekle birlikte erozyon oranını azaltmıştır. Borik Asit katkı maddesi saf GF/EP numunelerle karşılaştırıldığında erozyon direncinin azalmasına sebep olmuştur. Borax ilavesi ise yapıya ilave edilen diğer maddelerle kıyaslandığında en olumsuz etkiyi ortaya çıkarmıştır. Ayrıca çarpma açısındaki, çarpma hızındaki,

aşındırıcı partikül boyutundaki ve fiber doğrultusundaki değişikliklerin erozyon oranında dikkate değer farklılıklar oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Erozyon Aşınması, Cam Elyaf Takviyeli Epoksi, Çarpma Açısı, Çarpma Hızı, Alümina Aşındırıcı Partikül, Fiber Doğrultusu, SEM, Çok Faktörlü Varyans Analizi (MANOVA), Hacimsel Kayıp.

# ABSTRACT

## Ph.D THESIS

## INVESTIGATION OF EROSION WEAR BEHAVIOUR OF GLASS FIBRE REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

**Mehmet BAĞCI**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Selcuk University**
**The Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin İMREK**

**2010, 167 Pages**

**Jury**
**Asst. Prof. Dr. Hüseyin İMREK**
**Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR**
**Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**
**Prof. Dr. Mehmet ÇELİK**
**Asst. Prof. Dr. Yusuf YILMAZ**

In this study, erosion behaviors of glass-fiber reinforced composite materials that are nowadays showing increasing applications due their high strengths, good molding features and relatively low costs are investigated. The study was conducted by varying parameters like impingement angles, impact velocities and sizes of the abrasive particles as well as the fiber directions in order to study corresponding wear rates of the specimen material.

The tests were conducted on a special test device designed for the purpose and based on ASTM G76–95 standard test method where the test specimens were subjected to abrasive particles bombardments from dry and pressurized air. In addition, the impact velocities of the particles were determined by using the disc method explained in the literature.

Pure glass fiber reinforced epoxy composite materials were selected as the main specimen and then Boric Acid ($B_2O_3$), Borax ($B_2O_3$), Silicon Oxide ($SiO_2$) and Aluminium Oxide ($Al_2O_3$) were added into this pure structure as filler materials at 15% of resin and thereby new glass fiber reinforced epoxy composite materials were formed. The tests where the wear behavior was investigated, were conducted at three impingement angles, ($30^o$, $60^o$ and $90^o$), three different impact velocities (≈23, 34 and 53 m/s), and at two different fiber directions ($0^o$ and $45^o$) by using two different alumina abrasive particle sizes (≈200 and 400 μm). Based on the weight losses of the specimens, the results obtained were used to evaluate wear rates as a function of impingement angle, impact velocity, particle size and fiber direction. With these values, graphs were drawn and comments made too. In addition; microscopic and SEM views of the worn out specimen surfaces that were subjected to erosive wear tests were investigated, then evaluation of the Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) of the experimental results with their statistical analysis were made and finally the volumetric losses obtained in the specimens during the tests were determined and compared with the weight losses.

The results of the tests conducted show that the erosive wear rates of pure GF/EP test specimens and that of the specimens made by adding four different materials into this pure GF/EP specimen are close to each other when the added material is either Aluminium Oxide or Silicon Oxide and that erosion rates tend to decrease. Comparison of wear resistances of specimens filled with Boric Acid and that of pure GF/EP specimens shows that the addition of the filler material has caused reduction in the erosion

resistance. Addition of Borax into the main structure of the material has induced the worst effects in the material as compared to other filler materials. Moreover, it was also found that changes in impingement angles of the particles, their impact velocities and sizes together with the fiber directions cause remarkable differences in erosion rates of a material.

**Keywords:** Erosive wear, Glass fiber reinforced epoxy, Impingement angle, Impact velocity, Alumina abrasive particles, Fiber direction, SEM, Multivariate Analysis of Variance (MANOVA), Volumetric loss.

# ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, tezin her aşamasında bana yardımcı olan ve destek veren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin İMREK'e, deney numunelerinin oluşturulması aşamasında bilgilerinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ'a, deney numunelerinin incelenmesi hususunda Selçuk Üniversitesi İSOMER bünyesindeki ekipmanları kullanmamda gerekli izni veren ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR'a, aynı zamanda deney numunelerinin hazırlandığı ve deney için gerekli ölçüsüne getirilmesi işlemlerinin yapıldığı İZOREEL Ltd. Şti. yetkililerine, mekanik testlerin yapıldığı Pul–Tech FRP çalışanlarına ve aşındırıcı partiküllerin temin edildiği ÇELİKTAŞ firması elemanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam süresince bana her zaman moral veren ve destek olan sevgili eşim Beyza BAĞCI'ya ve bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mehmet BAĞCI
KONYA–2010

# İÇİNDEKİLER

**TEZ BİLDİRİMİ** ..... **iii**

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **vi**

**ÖNSÖZ** ..... **viii**

**İÇİNDEKİLER** ..... **ix**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **xi**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **4**

**3. TEORİK ESASLAR** ..... **19**

3.1.Aşınma ..... 19
3.1.1. Adhezif aşınma ..... 19
3.1.2. Abrazif aşınma ..... 21
3.1.3. Korozif aşınma ..... 22
3.1.4. Kazımalı (fretting) aşınma ..... 22
3.1.5. Yorulma aşınması (pitting) ..... 23
3.1.6. Erozyon aşınması ..... 24
3.1.6.1. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler ..... 24
3.1.6.2. Erozyon aşınma mekanizmaları ..... 27
3.1.6.3. Aşındırıcı partikülün kuvvet analizi ve yüzeye etkisi ..... 28
3.1.6.4. Plastik deformasyona bağlı erozyon aşınması ..... 30
3.1.6.5. Metallerin erozyonu ve tipik K değerleri ..... 33
3.1.6.6. Erozyon aşınması test metotları ..... 35
3.2. Kompozit Malzemeler ..... 38
3.2.1. Kompozit malzemelerin özellikleri ..... 39
3.2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ..... 41
3.2.3. Kompozit malzeme yapısındaki temel maddeler ..... 43
3.2.3.1. Matris malzemeleri ..... 43
3.2.3.1.1. Epoksi reçine matrisler ..... 44
3.2.3.1.2. Polyester reçine matrisler ..... 44
3.2.3.1.3. Vinilester reçine matrisler ..... 44
3.2.3.1.4. Fenolik reçine matrisler ..... 45
3.2.3.1.5. Silikon reçineler ..... 45
3.2.3.1.6. Metal matrisler ..... 45
3.2.3.2. Elyaf çeşitleri ve özellikleri ..... 46
3.2.3.2.1. Cam elyaflar ..... 46
3.2.3.2.2. Bor elyaflar ..... 47
3.2.3.2.3. Silisyum karbür elyaflar ..... 48
3.2.3.2.4. Alumina elyaflar ..... 48
3.2.3.2.5. Grafit (karbon) elyaflar ..... 49

3.2.3.2.6. Aramid elyaflar....49
3.2.4. Kompozit malzeme üretim yöntemleri....50
3.2.4.1. Elle yatırma....50
3.2.4.2. Püskürtme....50
3.2.4.3. Elyaf sarma....50
3.2.4.4. Reçine transfer kalıplama (RTM)....51
3.2.4.5. Hazır kalıplama (SMC, BMC)....51
3.2.4.5.1. Hazır kalıplama pestili / SMC....52
3.2.4.5.2. Hazır kalıplama hamuru / BMC....52
3.2.4.6. Vakum bağlaması....52
3.2.4.7. Otoklav bağlaması....53
3.2.5. Kompozit malzeme kullanım alanları....53

**4. MATERYAL VE METOT....59**

4.1. Test Metodu....59
4.2. Deney Tesisatı....60
4.3. Numune Tutucu....62
4.4. Nozul Çapı Seçimi....63
4.5. Aşındırıcı Partikül Özellikleri....63
4.6. Çarpma Hızının Tespiti....65
4.7. Deney Numuneleri....68
4.8. Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri....75
4.9. Deney Numunelerindeki Hacimsel Kaybın Tespit Edilmesi....78
4.10. Deney Prosedürü....81

**5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA....84**

5.1. Çarpma Açısının Etkisi....110
5.2. Çarpma Hızının Etkisi....111
5.3. Elyaf Yönlenmesinin Etkisi....111
5.4. Sertlik ve Çekme Mukavemetinin Etkisi....112
5.5. Aşınmış Yüzeylerin SEM Analizi....113
5.6. İstatistiksel Değerlendirme....125

**6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....127**

**KAYNAKLAR....130**

**EKLER....135**

**ÖZGEÇMİŞ....167**

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

| | |
|---|---|
| $A(x)$ | : Yüzeydeki çentiğin kesit alanı ($mm^2$) |
| E | : Elastisite modülü (MPa) |
| $E_{max}$ | : Maksimum erozyon oranı (mg/kg) |
| $F_n$ | : Normal kuvvet (N) |
| $F_t$ | : Teğetsel kuvvet (N) |
| H | : Malzemenin sertliği ($N/mm^2$) |
| $K$ | : Boyutsuz aşınma faktörü |
| L | : Diskler arasındaki mesafe (mm) |
| n | : Disklerin devir sayısını (d/d) |
| Q | : Toplam aşınma oranı ($mm^3/m$) |
| r | : Erozyon izlerinin ortalama yarıçapı (mm) |
| t | : Aşındırıcı partiküllerin hareket süresi (s) |
| $T_g$ | : Camsı geçiş sıcaklığı (°C) |
| U | : Başlangıç hızı (m/s) |
| $V$ | : Çentiğin son hacmi ($mm^3$) |
| $V_f$ | : Elyaf hacim oranı |
| W | : Uygulanan toplam normal yük (N) |
| $W_c$ | : Kompozitin ağırlığı (g) |
| $W_f$ | : Elyafın ağırlığı (g) |
| $\varepsilon_{kopma}$ | : Kopma uzaması (%) |
| $\eta$ | : Erozyon verimliliği |
| $\theta$ | : Açısal yer değişimi (rad) |
| $\Theta$ | : Aşındırıcı partikül çarpma açısı ($^o$) |
| $\rho$ | : Erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu ($g/cm^3$) |
| $\rho_c$ | : Kompozitin yoğunluğu ($g/cm^3$) |
| $\rho_f$ | : Elyafın yoğunluğu ($g/cm^3$) |
| $\sigma_{Basma}$ | : Basma gerilmesi (MPa) |
| $\sigma_{Eğilme}$ | : Eğilme gerilmesi (MPa) |
| $\upsilon$ | : Aşındırıcı partikül çarpma hızı (m/s) |
| $\omega$ | : Açısal hız (rad/s) |

### Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| GF/EP | : Glass Fibre Reinforced Epoxy<br>Cam Elyaf Takviyeli Epoksi |
| DIN | : Deutsches Institut für Normung<br>(Alman Norm Enstitüsü) |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials<br>(Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu) |
| SEM | : Scanning Electron Microscope<br>(Taramalı Elektron Mikroskobu) |
| MANOVA | : Multivariate Analysis of Variance<br>(Çok Faktörlü Varyans Analizi) |
| SPSS | : Statistical Packages for the Social Sciences<br>(Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi) |

# 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisiyle üretilip farklı sektörlerde hizmet veren makine sistem ve ekipmanları, son derece mükemmel tasarlanmış olsalar bile, gerek malzemeden gerekse işletme şartlarından kaynaklanan olumsuz faktörler sebebiyle zamanla iş yapabilme fonksiyonlarını yitirmektedirler. Bu sonucu hazırlayan en önemli etkenlerden biri aşınmadır. Aşınma, DIN 50320 ve ASTM G40–05 standartlarına göre; kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır. 1982 yılında Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü, korozyon ve aşınmadan kaynaklanan zararın gayri safi milli hâsılanın %6'sını (178,5 milyar dolar) oluşturduğunu beyan etmiştir. Dünya çapında yapılan istatistiklerde de makine elemanlarının yaklaşık yüzde yetmişinin işe yaramaz duruma gelmesinin sebebi aşınma olarak gösterilmektedir.

Aşınma; malzeme, yüzeylerin biçimi, kullanılan yağlayıcılar, sisteme etki eden hız, sıcaklık, kayma yüzeyleri arasındaki temas basıncı, çalışma süresi, aşındırıcıların yüzeye temas etme durumu, sertlik vs. gibi birçok parametreye bağlıdır. Karmaşık bir olay olduğundan dolayı laboratuar koşullarından elde edilen sonuçlara dayanarak uygulamadaki aşınma miktarını tahmin edecek net bir bağıntı henüz geliştirilememiştir. Bu sebeple aşınma üzerine birçok çalışma yapılmış ve belli sonuçlar elde edilmiş olmakla birlikte bu konuda yapılan çalışmalar daha da derinlemesine devam etmektedir. Temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte bir aşınma hali değil birden fazla aşınma hali ile karşılaşılmaktadır. Adezyon, abrazyon, yorulma (pitting, fretting), mekanik korozyon ve erozyon aşınması en yaygın karşılaşılan aşınma türleridir.

Bu aşınma türlerinden erozyon aşınması, belirli bir hıza sahip olan katı parçacıkların bir yüzeye çarpması durumunda yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi sonucu oluşmaktadır. Yüzeyin üst tabakasından malzeme kaybının devam etmesi halinde kullanım yerine bağlı olarak ciddi mekanik olumsuzluklar ortaya çıkmakla birlikte makine elemanlarının ömürlerinde de azalmalar meydana gelmektedir. Erozyon aşınması kendi içerisinde yıkama, erozyon–korozyon, erozyon–kavitasyon, yağma, termal erozyon ve püskürtme (katı parçacık erozyonu) aşınması çeşitlerine

ayrılmaktadır. Katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpmasıyla oluşan katı parçacık erozyonu, erozif aşınma proseslerinin en yaygın olanıdır ve son yıllarda giderek artan ilgi görmektedir. Çarpma hızı, çarpma açısı, parçacık tipi, parçacık şekli, parçacık boyutu, aşındırıcı parçacıkların sertliği, aşındırıcı parçacık akış oranı, hedef malzeme özellikleri ve çevresel parametreler katı parçacık erozyon aşınmasını etkileyen en önemli parametrelerdir.

Uzay–havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, türbinlerde ve kömür dönüştürme santrallerinde bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür. Burada aşındırıcı partiküller hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak şiddetli aşınmalar meydana getirmektedir.

Makine parçalarının katı parçacık erozyon aşınmasına karşı davranışı iyi bir şekilde bilinirse bu aşınmaya maruz kalan sistemlerin ve parçaların en uygun ve en ekonomik şekilde bu aşınmadan korunma yöntemleri belirlenebilir. Böylece önleyici sistemler geliştirilebilir, parçaların ömrü arttırılabilir ve ekonomik açıdan kazanımlar sağlanabilir.

Günümüz teknolojisinin de katkısıyla iki veya daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin yeni ve tek bir malzemede makro seviyede toplanmasıyla oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denilmektedir. Malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olması, bu malzemeler için önemli bir avantaj sağlamasının yanında bu özellik sayesinde malzeme özellikleri istenildiği gibi değiştirilme imkânına sahip olmaktadır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yorulma dayanımı, aşınmaya direnç, korozyon dayanımı, estetik görünüm, boyutsal stabilite, elektriki iletkenlik ve rijitlik gibi özellikler kazandırılabilmektedir.

Kompozit malzemelerde matrise katılan takviyeler sayesinde malzemenin bir veya birkaç çalışma özelliği önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Takviye malzemesi olarak kullanılan elyafların yönlendiriliş şekli, mekanik özellikleri ve matris malzemenin özellikleri oluşturdukları kompozitin tüm özelliklerini belirlemektedir. Bu sayede cam elyafla takviye edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

iyileşmekte, yük karşısında şekil değiştirmesi azalmakta, boyutsal kararlılığı iyileşmekte, yüzde uzama ve termal genişleme özellikleri azalmaktadır. Çeşitli organik matris malzemelerle kullanılmaya başlayarak bu alanda bir çığır açan cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, %96–98'lik pazar payı ile kompozit endüstrisine hâkim konumda olup uçak–uzay ve savunma sanayinde, otomotiv ve kimya endüstrisinde, yapı–inşaat sektöründe, elektrik–elektronik uygulamalarında, kara taşıtlarında, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda ve denizcilik sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca bu malzemelerden dişli, kam, tekerlek, fren ve debriyaj balataları, yataklar ve muylular gibi aşınmaya maruz kalabilecek parçaların imalatı da gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Bu deneysel çalışmada deney numunesi olarak saf haldeki cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler ile bu saf yapı içerisine reçinenin %15'i oranında ayrı ayrı ilave edilen Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit parçacıkların oluşturduğu yeni cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu deney numuneleri üç farklı çarpma açısında, üç farklı çarpma hızında, iki farklı aşındırıcı partikül boyutunda ve iki farklı fiber doğrultusunda erozyon aşınmasına tabi tutulmuştur. Deneyler, özel olarak tasarlanmış erozyon aşınma deney setinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler sonunda çarpma açısının, çarpma hızının, aşındırıcı partikül boyutunun ve fiber doğrultusunun bir fonksiyonu olarak erozyon oranındaki değişime ait grafikler oluşturulmuş olup deney numunelerinin aşınan yüzeylerinin mikroskop görüntüleri incelenmiş ve bu görüntüler yorumlanmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Finnie (1960), akış esnasında katı parçacıklar tarafından aşınan malzeme yüzey miktarının akışın şartlarına ve aşınma mekanizmasına bağlı olduğunu belirtmiş olup gevrek ve sünek malzemeler için aşınma mekanizmasının analizini yapmış ve sıvı akış şartları hususundaki bazı görüşlerin ilk kez tartışılmasını sağlamıştır. Sünek malzemeler için aşındırıcı parçacıkların hızına ve yönüne bağlı olarak aşınma değişimlerini tahmin etmenin mümkün olduğunu göstermiş fakat erozyonun sayısal büyüklüğü hassas bir şekilde tahmin edilememiştir. Elde edilen değerlerin metal kesme testlerindeki verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Gevrek malzemeler için ise başlangıçtaki çatlağın yol açtığı şartlar üzerinde çalışılmış ve kaldırılan malzemeyi tahmin edilme yolları araştırılmıştır. Fakat sünek malzemelerdeki kadar detaylı bir analiz yapılmamıştır. Ayrıca erozyon üzerine abrasif parçacıkların özelliklerinin etkisi de kısaca değerlendirilmiştir.

Tilly ve Sage (1970), kum erozyonu üzerine hız ve aşındırıcı karakteristiklerinin etkisini belirlemek için yaptıkları ilk çalışmanın sonuçlarını özetlemişler ve yeni veriler sunmuşlardır. Metal, plastik ve seramik gibi çeşitli malzemelerin erozyon dirençleri karşılaştırıldığında aşınmanın, gerilme ve sertlik gibi mekanik özelliklerle basit bir ilişkiden ziyade çok geniş aralıkta bir bağlantısının olduğu görülmüştür. Ayrıca takviyeli plastiklerin (66 naylon ve epoksi reçine gibi) test sonuçlarında kullanılan elyaflara bağlı olarak plastiklerdeki takviye türünün, erozyon direncini iyileştirdiği veya daha da kötüleşmesini önlediği görülmüştür. Erozyonun öncelikli olarak malzemelerde pitting ve koparma etkisi oluşturduğu daha sonra ise başlangıçtaki çarpmaya göre radyal yönde zarara sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Finnie (1972) erozyon aşınması üzerine yaptığı deneysel çalışmada sünek metaller üzerine etki eden faktörleri (çarpma açısı, partikül dönmesi, partikül hızı, parçacık boyutu, yüzey özellikleri, yüzeyin şekli, yüzeydeki gerilme seviyesi, parçacık şekli ve mukavemeti, sıvı akışındaki partikül yoğunluğu, taşıyıcı gaz ve onun sıcaklığının etkisi) listelemiş ve bu değişkenlerin bazılarının etkilerini detaylandırmıştır. Numune yüzeyinde sıyırma etkisi oluşturan açılarda sert abrasif taneler tarafından sünek metallerin erozyonu için nicel tahminler yapmıştır.

Tilly (1969), kum taneleri gibi katı parçacıkların sebep olduğu erozyonun, servis şartlarının çeşitliliği sonucu meydana geldiğini belirtmiştir. Erozyonu etkileyen parametrelerin, çarpma şartları, çarpan parçacıkların özellikleri ve hedef yüzeyle ilişkili olduğu sonucuna varmıştır. Bu parametrelerin etkilerini kısaca gözden geçirerek erozyon direnci ile ilgili malzeme özelliklerini ve erozyon mekanizmasını açığa çıkarmak için gerekli daha fazla çalışmanın yapılması gerekliliğini belirtmiştir.

Friedrich (1986) yaptığı çalışmada çeşitli polimerik malzemeler için hava püskürtmeli deney düzeneği üzerinde çelik küreler kullanarak, 57 m/s hızda erozyon davranışını incelemiştir. Yumuşak polimerlerin (polyethylene, polypropylene, polybutene–1) lineer bir erozyon oranına sahip olmadan önce bir inkübasyon periyodu sergilediğini göstermiştir. Daha gevrek polimerlerde (polystyrene) ise inkübasyon periyodu görülmemiş ve daha yüksek erozyon oranı gerçekleşmiştir. Test sıcaklığındaki azalma genellikle aşınma oranında artışa sebep olmuştur. Polimerik malzemelerin erozyon direncini iyi bir şekilde tanımlayacak göstergenin [sertlik (H) / kırılma enerjisi ($G_{Ic}$)] "gevreklik indeksi" olacağı sonucuna varmıştır.

Harsha ve Jha (2008) yaptıkları deneysel çalışmada öncelikli olarak saf epoksinin erozyon davranışını belirlemişlerdir. Daha sonra tek yönlü cam elyaf takviyeli ve tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin durumlarını incelemişlerdir. Bunlara ilave olarak çift yönlü E-cam dokuma takviyeli epoksi kompozit malzemelerin de erozyon aşınma dirençlerini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak çift yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerden daha iyi erozif aşınma direnci gösterdiğini bulmuşlardır. Bu durum çift yönlü olan kompozit malzemelerin daha fazla çarpma enerjisini absorbe etmesi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca epoksi ve kompozitlerinin yaygın olarak yarı sünek erozyon davranışı sergilediği sonucuna varılmıştır.

Srivastava (2006), E–cam fiber takviyeli epoksi reçine (GFRP) kompozitlerin $30^o$ ve $90^o$ çarpma açıları ile üç farklı hız bileşenindeki (24, 35 ve 52 $m.s^{-1}$) duruma ait erozyon aşınmasını incelemiştir. 150–250 μm nominal çapa sahip silis kumu aşındırıcı partikül olarak kullanılmıştır. Dolgu maddesi (2 g buğday nişastası) ilave edilerek oluşturulan kompozit malzemelerde en düşük erozyon oranı değeri elde edilmiştir. Saf

haldeki yani herhangi bir dolgu maddesi bulunmayan epoksi malzemelerde ise, zayıf bağ kuvvetlerinden dolayı en yüksek erozyon oranı değerleri elde edilmiştir.

Tewari ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada tek yönlü karbon ve cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışını karakterize etmişlerdir. Bu kompozitlerin deneyleri $15^o$–$90^o$ aralığındaki farklı çarpma açılarında ve $0^o$ – $45^o$ ve $90^o$ gibi üç farklı fiber doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 300–500 μm çapındaki çelik küreler seçilmiş ve çarpma hızı da 45 m/s olarak alınmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, tek yönlü karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde $60^o$ lik çarpma açısında maksimum erozyon oranı elde edilmiş olup yarı sünek erozyon davranışı göstermiştir. Ayrıca fiber doğrultularının da erozyon aşınması üzerine önemli etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Barkoula ve Karger-Kocsis (2002), tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi (EP) kompozitlerin üç farklı çarpma açısında ($30^o$, $60^o$ ve $90^o$) ve izafi elyaf yönlenmesinin (paralel ve dik) ara yüzey modifikasyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aşınan kompozitlerin yüzey topografyaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D lazer profilometresi ile incelenmiştir. Yapılan deneylerde erozyon aşınması üzerine çarpma açısının güçlü bir etkisinin olduğu gösterilmiştir. GF/EP sistemlerinde gevrek erozyon davranışı ortaya çıkmış olup maksimum ağırlık kaybı $90^o$ lik çarpma açısında gerçekleşmiştir. Erozyon aşınma direncinin artırılmasında iyi bir fiber/matris dağılımının önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca $30^o$ lik çarpma açısında gerçekleşen erozyon hariç tutulduğu zaman izafi elyaf yönlenmesinin ihmal edilebilir bir etki ortaya çıkardığı görülmüştür.

Srivastava ve Pawar (2006) yaptıkları çalışmada E–cam fiber takviyeli flyash (silisyum oksit, alüminyum oksit, kalsiyum oksit, demir oksit ve magnezyum oksit gibi kimyasal bileşenler içerir) katkı maddeli epoksi kompozitlerde (GFRP) partikül hızı ve çarpma açısını değiştirerek katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Flyash katkı maddeli kompozitlerin erozyon aşınması $30^o$ ile $90^o$ arasında farklı çarpma açılarında gerçekleştirilmiş ve 24, 35 ve 52 m/s gibi üç farklı çarpma hızı kullanılmıştır. 150–250 μm aralığında düzensiz bir boyut dağılımına sahip silis kumları, aşındırıcı partikül olarak kullanılmıştır. $60^o$ lik çarpma açısında maksimum erozyon oranı elde edildiği sonucuna varılmış ve kompozitlerin yarı sünek bir erozyon davranışı gösterdiği

belirlenmiştir. Ayrıca herhangi bir dolgu maddesinin kullanılmadığı saf cam epoksi kompozit malzeme ise zayıf bağ kuvvetinden dolayı max. erozyon oranı göstermiştir.

Pool ve ark. (1986) tarafından bir erozyon aşınma test cihazı kullanılarak seçilmiş polimer matriks kompozit malzemelerin erozif aşınma davranışı araştırılmıştır. Bu malzemelerin erozif aşınma oranlarının düşük karbon çeliklerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Sürekli grafit fiber–epoksi kompozitler, tipik olarak gevrek malzemelerdeki erozyon oranına benzer (yüzeye normal çarpma esnasında max. aşınma oranı) eğilim sergilemiş olmakla birlikte aramid fiber–epoksi ve doğranmış grafit fiber–polyphenylenesulfide malzemeler ise sünek malzemeler gibi (max. aşınma oranı 25°–45° çarpma açısında) davranmıştır.

Patnaik ve ark. (2008) çalışmalarında çoklu çarpma erozyonundan yola çıkarak partikülün kinetik enerjisinin korunumu kanununa dayanarak cam takviyeli polyester kompozitlerin aşınma oranını belirlemek için teorik bir model üzerinde yoğunlaşmışlardır. Erozyon testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup bu kompozitlerin erozyon davranışına, etkileşimde oldukları çevre şartlarının ve çeşitli kontrol faktörlerinin etkisi incelenmiştir. Deneysel yaklaşımın tasarımında, en iyi parametre kurulumunu sağlayan Taguchi'nin dikey dizilerinden yararlanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; aşındırıcı boyutu, takviye elyaf oranı, çarpma açısı ve çarpma hızı, aşınma oranı üzerine etki eden önemli faktörler arasında yer almaktadır. Malzemelerin yarı sünek özellik gösterdiği yani maksimum erozyon oranının 60º lik çarpma açısında gerçekleştiği sonucu bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kompozitlerin yüzeylerindeki kırılma formları, elyaf parçalanmaları ve matriks bozulmasına ait görüntüler incelenmiştir. Yapılan deneyler ve teorik çalışma sonucunda minimum aşınma oranına etki eden en önemli faktörün ne olduğunun belirlenmesinde genetik algoritma (GA) yaklaşımının en doğru sonucu verdiği belirlenmiştir.

Rajesh ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada PA 6, PA 66, PA 66/610, PA 11, PA 12 ve içeriğinde farklı metilen amit ($CH_2$/CONH) bulunan aromatik PA gibi çeşitli poliamitlerin (PAs), iki farklı çarpma açısında (30° ve 90°), iki farklı çarpma hızında (80 ve 140 m/s) ve aşındırıcı olarak silis kumunun kullanıldığı durumdaki erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. 30° lik çarpma açısındaki çarpma hızının erozyon

oranı üzerine etkisinin 90° lik çarpma açısındaki duruma göre daha çarpıcı sonuçlar verdiği görülmüştür. Poliamitlerin hepsinde normal çarpma açısında gevrek kırılma meydana gelirken meyilli çarpmada ise mikro boyutta kesilme ve sert plastik deformasyonlar ortaya çıkmıştır.

Patnaik ve ark. (2008), üç farklı ağırlık bileşeni ile takviye edilmiş polyester kompozitleri, dokuma E-cam elyaf ile takviye etmişlerdir. Çevre ile etkileşimde olan bu kompozitlerin çeşitli işletimsel ve malzeme parametrelerinin erozyon aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, hava jet tipi erozyon test düzeneği tasarlanmış ve Taguchi'nin dikey dizisi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucu aşındırıcı boyutunun, elyaf oranının, çarpma açısının ve çarpma hızının aşınma oranı üzerine etki eden önemli faktörler arasında yer aldığını bulmuşlardır. Cam takviyeli polyester kompozitler, erozyon aşınması üzerine yaygın olarak yarı sünek özellik göstermiştir. Ayrıca Taguchi deneysel tasarımından yola çıkılarak yapılan değerlendirmede deneysel değerlerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Barkoula ve Karger-Kocsis (2002) yaptıkları çalışmada cam fiber (GF) takviyeli termoplastik polipropilen (PP) kompozitlerin $30^o$, $60^o$ ve $90^o$ çarpma açılarındaki erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deney numunelerinde cam fiberler paralel ve dik olmak üzere iki farklı doğrultuda yerleştirilmiştir. Ayrıca fiberler ana matris boyunca sürekli ve kesintili yerleştirilmiş olmakla birlikte yapı içerisindeki yoğunlukları ise %40–60 arasında değiştirilmiştir. Deneyler sonucunda, $30^o$ gibi düşük çarpma açılarında erozyon aşınması üzerine fiberlerin yerleştirildiği doğrultuların önemli etki oluşturduğu görülmüştür. Ancak $60^o$ ve $90^o$ gibi yüksek çarpma açılarında ise hemen hemen hiçbir fark ortaya çıkmadığı gözlemlenmiştir. Bunun aksine fiber uzunluğunun özellikle de yüksek çarpma açılarında erozyon aşınma davranışını etkilemediği sonucuna varılmıştır.

Rajesh ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada bir seri polyamidin (PA 6, PA 66, PA 66/610, PA 11, PA 12 ve aromatik PA) 90–180 μm'lik silis partikülleri karşısında erozyon davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda polyamidlerin bazılarının $15^o$ çarpma açısında bazılarının ise $30^o$ çarpma açısında erozyon aşınmasında maksimum aşınma sergilediği görülmüştür. Böylece bu malzemelerin sünek bir kırılma noktasının olduğu ve maksimum aşınmanın $15^o$ de oluştuğu

ispatlanmıştır. $60^o$ ve $90^o$'lik çarpma açılarında ise erozyon oranı ve gevreklik arasında iyi bir korelasyon gözlemlenmiştir.

Sınmazçelik ve Taşkıran (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mineral parçacıklarla ve rastgele yönlenmiş kısa cam fiberlerle takviye edilmiş polyphenylenesulphide (PPS) kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışları karakterize edilmiştir. Bu kompozitlerin erozyon oranları $15^o$–$90^o$ arasındaki değişik çarpma açılarında ve üç farklı partikül çarpma hızında (20, 40 ve 60 m/s) incelenmiştir. Aşındırıcı partikül olarak 150–200 μm çapında silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu 4,5 bar basınç altında deney numunesine çarpmış ve silis kumunun kütle akış hızı da 9 g/s olarak alınmıştır. PPS kompozitler, $60^o$ çarpma açısında maksimum erozyon oranı sergilemiş ve yarı sünek erozyon davranışı göstermiştir. Bu çarpma açısı erozyon oranına önemli bir etki yapmıştır. Ayrıca SEM ile aşınan yüzeylerin morfolojileri incelenmiş ve yüzeylerde nasıl bir değişim meydana geldiği araştırılmıştır.

Arjula ve ark. (2008) yaptıkları deneysel çalışmada polyetherimide (PEI) ve tek yönlü karbon elyaf takviyeli PEI (CF/PEI) malzemelerin farklı çarpma açılarındaki (15°–90°) ve hızlarındaki (25–66 m/s) erozyon aşınma davranışlarını silis kumu (200±50 μm) kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca elyaf yönlenmelerinin (0° ve 90°) CF/PEI malzemeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. PEI malzemeler max. erozyon oranını 30° çarpma açısında gösterirken CF/PEI malzemeler ise 60° çarpma açısında en yüksek erozyon oranı sergilemiştir. Elyaf yönlenmelerinin de meyilli çarpma açılarında erozyon oranı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Elyafların 90° yönlenmedeki erozyon oranının 0° deki duruma göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Sarı ve Sınmazçelik (2007) kompozit malzemelerin erozyonu hakkında yapmış oldukları çalışmada, tek yönlü güçlendirilmiş polyamit karbon fiber (PEI) kompozitleri incelemişlerdir. Bu malzemelerde yarı sünek bir durum gözlemlenmiş olup maksimum aşınma oranının da $45^o$–$55^o$ çarpma açısı aralığında gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca erozif aşınmada yüzey pürüzlülüğünün aşınma ile yakın ilişkisinin olduğu tespit edilmiştir. Hızın artması malzemelerdeki aşınmayı artırmış olmakla birlikte sert elyaf kırılmalarına sebep olmuştur.

Patnaik ve ark. (2008) erozif aşınma çalışmalarında elyaf / dolgu takviyeli polimer kompozitlerin artmasıyla erozyon karakteristiklerinin değiştiği kanaatine varmışlardır. E-cam elyaf ve SiC parçacıklarla takviye edilmiş termoplastik polyester reçine içeren çok bileşenli kompozit sistemlerin farklı operasyon şartlarında erozyon davranışını geliştirdiği belirtilmiştir. Oda sıcaklığındaki erozyon test imkânları ve Taguchi'nin dikey dizisi deneylerde kullanılmıştır. Sonuç olarak minimum aşınma oranını tespit etmek için yapılan deneyler sonunda en verimli sonuca genetik algoritma ile ulaşılmıştır.

Harsha ve Thakre'nin (2007) yaptıkları çalışmada içerisine rastgele yönlenmiş E-cam ve karbon elyafı ile katı yağlayıcılar (PTFE, grafit, $MoS_2$) doldurulmuş PEI kompozitlerin erozyon davranışını incelemişlerdir. $15^o$–$90^o$ arasındaki çarpma açıları ve 30–88 m/s püskürtme hızlarında çalışılmıştır. Çekme mukavemeti, yüzde uzama, malzeme sertliği ve kesme mukavemeti gibi mekanik özelliklerin polyetherimide ve kompozitlerin aşınma oranını kontrol ettikleri görülmüştür. PEI ve onun cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerinin yarı sünek erozyon davranışı sergilediği görülmüştür. Katı yağlayıcılar ile desteklenmiş cam elyaf takviyeli PEI kompozitlerde ise 30–88 m/s çarpma hızlarında maksimum erozyon oranı $60^o$ çarpma açısında gerçekleşirken, 52–60 m/s gibi ara değerlerdeki hızlarda ise en yüksek erozyon oranı $30^o$ lik çarpma açısında gerçekleşmiştir. Ayrıca %20' lik cam elyaf takviyesi ile saf haldeki PEI matrisinin erozyon aşınma direncinin düzeldiği görülmüştür.

Barkoula ve ark. (2002), tek yönlü (UD) cam elyaf (GF) takviyeli termoplastik polypropylene (PP) kompozitlerin $30^o$ lik çarpma açısındaki çarpma zamanının ve izafi elyaf yönlenmesinin (paralel ve dik) bir fonksiyonu olarak artık çekme gerilmeleri üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yarı ampirik bir yaklaşım yapılarak artık çekme gerilmeleri sonucu durum tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu yapılan yaklaşımın $30^o$ çarpma açısında deneysel verilere çok yakın sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. UD-GF/PP ve CF/EP kompozitlerin gerilmeli durumdaki bozulma davranışları karşılaştırıldığı zaman UD-GF/PP kompozitlerin daha erken bozulmaya uğradığı fakat bu kompozitlerin izafi olarak CF/EP kompozitlerden daha yüksek artık çekme gerilmesini absorbe ettikleri sonucuna varılmıştır.

Arjula ve ark. (2008), erozyon aşınması üzerine matris malzemenin, çarpma açısının ve çarpma hızının etkisini yedi farklı termoplastik saf polimer (i.e. polyetherimide, polyetheretherketone, polyetherketone, polyphenylenesulfide, polyethersulfone, polysulfone, yüksek molekül ağırlığındaki polyethylene) üzerinde denemişlerdir. Farklı çarpma açıları ($15^o$–$90^o$) ve çarpma hızları (22–66 m/s) referans alınarak, aşındırıcı olarak da 200±50 μm boyutunda silis kumu kullanılarak bu malzemelerin düzenli durumdaki erozyon oranı değerleri elde edilmiş olup $30^o$ lik çarpma açısında maksimum erozyon oranı ($E_{max}$) elde edilmiştir. Bu polimerlerin bazıları düşük çarpma hızlarında ve $90^o$ lik çarpma açısında inkübasyon davranışı göstermiştir. Düzenli durumdaki erozyon oranı ile mekanik özellikler ve camsı geçiş sıcaklığı ($T_g$) arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Kim ve Kim (2009), epoksi tabanlı tek yönlü ve çok yönlü karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Bu kompozitlerin erozyon oranları, 70 m/s sabit partikül hızı kullanılarak çeşitli çarpma açılarında (15°–90°) tespit edilmiştir. Deneyler, 80 μm ortalama çapa sahip düzensiz SiC partiküller ile gerçekleştirilmiştir. Erozyon aşınmasının çarpma açısına bağımlılığı geleneksel sünek malzemelerin davranışı ile uyumlu bir sonuç göstermiş ve 15°–30° çarpma açılarında maksimum erozyon oranı oluşmuştur. Tek yönlü kompozitlerin erozyon oranı 0° ve 45° fiber yönlenmesine göre 90° lik fiber yönlenmesinde daha yüksek bir değer almıştır. Diğer taraftan çok yönlü tabakalı kompozit malzemelerdeki {[0/90], [45/−45], [90/30/−30] ve [0/60/−60]} erozyon oranının ise 15° lik çarpma açısı hariç diğer çarpma açılarında fiber yönlenmesinden çok fazla etkilenmediği gözlemlenmiştir.

Harsha ve ark. (2003), çeşitli polyaryletherketone (PAEKs) malzemeler ile bunların kısa elyaf takviyeli kompozitlerinin, aşındırıcı olarak 150–212 μm aralığındaki silis kumlarını kullanarak farklı çarpma açılarındaki ve çarpma hızlarındaki erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Saf polyetheretherketone (PEEK) ve %20 cam elyaf takviyeli PEEK malzemeler $30^o$ çarpma açısında en yüksek erozyon değeri gösterirken diğer PAEK ve kompozitlerinde ise $60^o$ lik çarpma açısında en yüksek erozyon değeri elde edilmiştir.

Arjula ve Harsha (2006) polimerler ve polimerik kompozitlerin erozyon verimliliğinin (η) normal çarpma şartlarındaki katı parçacık erozyonu ile ilgili literatürden elde edilen verileri toplayarak değerlendirmişlerdir. η parametresinin değişik mekanizmaları tanımak için yararlı olabileceğini göstermek bu çalışmanın ana amacını oluşturmuştur. Erozyon verimliliği haritası çizilmiş olup bu harita çeşitli polimerlerin ve bunların kompozitlerinin sertliğinin, onların erozyon direnci üzerine etkisini göstermiştir. Polimerler ve polimerik kompozitlerin erozyon verimliliği ile uyumlu çeşitli rejimler ve sınırları haritada vurgulanmıştır. Deneyde kullanılan kompozitlerin erozyona verdikleri cevaplar, erozyon verimlilikleri ve aşınma mekanizmaları literatür ile karşılaştırılmıştır.

Mahapatra ve ark. (2008), üç farklı ağırlık dağılımına sahip dokuma E-cam elyaf takviyeli polyester kompozitleri geliştirmişlerdir. Bu kompozitlerin erozyon aşınma davranışı üzerine etki eden çeşitli işletimsel ve malzeme parametrelerinin etkisini araştırmak için çevre ile etkileşim halinde olacak şekilde erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için hava jet tipi erozyon test düzeneği hazırlanmış olup deneylerden elde edilen sonuçların yorumlanmasında Taguchi'nin dikey dizilim tekniğinden faydalanılmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular göstermiştir ki kompozitlerin erozyon oranı üzerine katı parçacıkların çarpması büyük bir etki oluşturmaktadır. Erozyon oranını minimize etmek için Taguchi deneysel tasarımı kullanılarak en uygun parametre kombinasyonu belirlenmiş olup optimum sonuca genetik algoritma kullanılarak ulaşılabileceği belirtilmiştir.

Arnold ve Hutchings (1989), beş farklı elastomerin (doğal kauçuk, epoksi ilave edilmiş doğal kauçuk, oksit giderici ilave edilen ve edilmeyen elastomerler, butil kauçuğu) 50 m/s çarpma hızındaki ve 120 μm aşındırıcı partikül boyutundaki silis parçacıklar kullanarak parçacık akışı ile erozyon oranı arasındaki değişimini incelemişlerdir. Oksit giderici ilave edilmeyen elastomerler için düşük parçacık akışında erozyon oranının arttığı bulunmuştur. Kızılaltı spektroskopisi ile yüzeyin incelenmesi sonucunda elastomer yüzeyinde oksijen oluşumu önemli dereceye ulaşmıştır. Kesikli parçacık akışında, elastomer yüzeyinde bozulmaya sebep olan çarpmanın etkisi geçici bir şekilde meydana gelmiştir.

Hutchings ve Deuchar (1987) yaptıkları çalışmada aşındırıcı olarak 150 μm ortalama çapındaki silis kumu kullanarak ve 48 m/s çarpma hızında sekiz tamamlanmamış elastomer (dört doğal kauçuk bileşiği, epoksi ilave edilmiş doğal kauçuk ENR50, butil kauçuğu, polybutadiene ve polyurethane) malzemenin erozyona verecekleri cevabı araştırmışlardır. Farklı kauçuklarla yapılan deneyler yorumlandığı zaman erozyon oranının geniş bir çeşitlilikte olduğu görülmüştür. Matris elastomerinin doğası ve camsı geçiş sıcaklığının ne mekanik özellikler (sertlik, çekme gerilmesi veya kopma gerilmesi uzaması) nede abrasif aşınma direnci ile sistematik olarak uyumlu olmadığı görülmüştür. Ancak geri tepme esnekliğinin bu durumla iyi bir ilişki sergilediği sonucuna varılmıştır.

Arnold ve Hutchings (1993), normal çarpma şartları altında elastomerlerin erozif aşınma davranışını tahmin etmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Tekrarlanan çentikten dolayı kauçuktaki yorulma çatlaklarının büyümesi normal bir etki oluşturmuştur. Erozyon aşınma mekanizması, parçacık çarpmasından dolayı artan sürtünme gerilmelerinin etkisi altında yorulma çatlaklarının yayılımına sebep olmuştur. Deneysel olarak elde edilen değerlerle teorik model sonucu oluşturulan tahminlerin düzenli kuartz kumu ve yuvarlak cam küreler kullanılması durumunda doğal kauçuk, styrene-butadiene kauçuk ve yoğun olarak çapraz bağlanmış polybutadiene kauçuk için uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Çarpma şartları (partikül hızı, boyutu ve sürtünme katsayısı) ve malzeme özellikleri (elastiklik modülü ve yorulma özellikleri) arasında iyi bir niteliksel uyum elde edilmiştir.

Brandstädter ve ark. (1991), bismaleimide (BMI) polimerlerin birkaç değişik kompoziti üzerinde katı parçacık erozyonunu incelemiş ve mekanik özelliklerini ölçerek kıyaslamışlardır. Deneyler 60 m/s püskürtme hızında 42, 63, 143 ve 390 μm nominal çapa sahip açısal alüminyum oksit aşındırıcı partiküller kullanarak normal çarpma durumda gerçekleştirilmiş olup yüzeye çarpan parçacıkların boyutunun erozyon oranı üzerinde önemli bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Yüzeyden malzemelerin kaldırılması esnasında öncelikli olarak gevrek kırılma görülmekle birlikte buna ek olarak yüzeyde bozulma ve plastisite durumu ile de karşılaşılmıştır.

Suresh ve ark. (2009), saf PEEK matrisin, tek yönlü cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli polyetheretherketone (PEEK) ve polyetherketoneketone (PEKK) kompozit

malzemelerin katı parçacık erozyon davranışını incelemişlerdir. Deneylerde silis kumu (200±50 μm) kullanılmış olup farklı çarpma açıları ve çarpma hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Saf PEEK, 30° çarpma açısında maksimum erozyon oranı sergilemiş olsa da kompozitler yarı sünek davranış göstererek 60° çarpma açısında maksimum erozyon oranı göstermiştir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin erozyon oranı karbon elyaf takviyeli kompozitlerden daha yüksek bulunmuştur. Elyaf yönlenmesi ise erozyon oranı üzerine sadece düşük çarpma açılarında önemli etki oluşturmuştur. Ayrıca dik yönlenmiş elyaflar paralel yönlenmiş elyaflara göre daha fazla erozyon oranı sergilemiştir.

Tsuda ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada çeşitli tipteki cam elyaf takviyeli plastiklerin (GFRP) aşınma mekanizmalarını ve kum erozyon davranışını araştırmışlardır. Elyaf takviyeli plastiklerin (FRP) erozyon davranışının, cam elyaf içeriğinin artmasıyla sünek davranıştan gevrek davranışa geçtiği görülmüştür. Düşük çarpma açısında FRP malzeme, erozyon zararına karşı reçineden daha dirençli davranmıştır. Daha yüksek çarpma açlarında ise ters bir eğilim gözlenmiştir. Ayrıca geliştirilen bir metot vasıtasıyla sadece matristeki reçinenin oranı bilinerek tüm GFRP malzemelerin çeşitli çarpma açıları ve hızlarındaki erozyon oranı değerlerinin bulunabileceği iddia edilmiştir.

Arnold ve Hutchings (1990), iki tamamlanmamış elastomerin (doğal kauçuk ve epoksi ilave edilmiş doğal kauçuk) erozyonu esnasında kaldırılan malzemenin mekanizması üzerine çalışmışlardır. Silikon yağı tarafından yağlamanın ve çarpma hızının etkisi araştırılmıştır. 30° ve 90° çarpma açısında ortaya çıkan temel malzeme kaldırma mekanizması, çarpma sonucu meydana gelen çekme yüzey gerilmeleri altında ince yorulma çatlaklarının oluşumunu ve büyümesini sağlamıştır. Tek çarpma sonucu hiçbir zarar gözlemlenmemiş olup malzeme kaldırmanın gerçekleşmesi için ardışık çarpmalara gerek duyulmuştur. Ayrıca erozyon oranının 70 $m.s^{-1}$ nin üzerindeki hız değerlerine çok güçlü bir şekilde bağlı olduğu bulunmuştur.

Sinmazçelik ve ark. (2008), çapraz kat yönlenmiş karbon elyaf takviyeli polyphenylenesulphide (C-PPS) kompozitlerin erozyon aşınması sonrasındaki artık mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada 50 mm hızlanma bölümü olan 5 mm çapındaki seramik nozul kullanılmış olup 150–200 μm nominal çapında açısal

silis kumu aşındırıcı olarak seçilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin hızlandırılmasında basınç değerlerinden faydalanılmış olup 1,5; 3 ve 4,5 bar'lık basınçlar kullanılmıştır. Bu basınç değerleri de ortalama olarak 20, 40 ve 60 m/s hızlara karşılık gelmektedir. Kompozit malzemeler numune tutucuya yerleştirilerek $15^o$–$90^o$ arasındaki çarpma açılarında deneyler yapılarak 0,1 mg hassasiyetteki hassas terazi ile ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Malzemeler yarı sünek davranış sergileyerek $45^o$ çarpma açısında maksimum erozyon oranı göstermiş olup minimum artık gerilme değeri elde edilmiştir.

Manish ve ark. (1994) tarafından cam elyaf takviyeli polimer matriks kompozitin dört farklı tipinin katı parçacık erozyon davranışı karakterize edilmiştir. Bu kompozitlerin erozyon oranı iki çarpma açısı (90° – 30°) ve iki çarpma hızında (38 ve 45 $m.s^{-1}$) değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin yapılan deneyler sonunda erozyona verdiği cevap, erozyon verimliliği ve mekanizmanın durumu detaylarıyla literatürdeki benzer malzemelerle karşılaştırılmıştır.

Tewari ve ark. (2002) deneysel çalışmalarında tek yönlü karbon elyaf takviyeli polyetheretherketone (PEEK) kompozitlerin $15^o$–$90^o$ aralığındaki çarpma açılarında ve $0^o$–$45^o$ ve $90^o$ gibi üç farklı elyaf doğrultularındaki erozyonunu incelemişlerdir. Aşındırıcı partiküller 300–500 μm aralığındaki çelik kürelerden oluşmakta olup çarpma hızları 45 ve 85 m/s olarak ayarlanmıştır. Tek yönlü CF takviyeli PEEK kompozitler yarı sünek erozyon davranışı sergilemiş olmakla beraber elyaf doğrultularının da erozyon oranı üzerine önemli etkiye sahip olduğu yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

Li ve Hutchings (1990), geniş çapta değişiklik gösteren mekanik özelliklere sahip dökülebilir polyurethane elastomer bileşen temelli sekiz polyesterin erozif aşınma oranlarını ölçmüşlerdir. Erozyon testleri 120 μm partikül boyutunda silis kumları kullanılarak 50 m/s çarpma hızında 30°–90° lik çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin tümü geri tepme esnekliği açısından benzer değerler sergilemiş olup erozyon oranının artmasıyla sertlik, çekme modülü ve çekme gerilmesi artmıştır. Abrazyon ve erozyon esnasında elastomerin maruz kaldığı uzama oranı ve uzama seviyesi farklı olduğundan dolayı birbirinden farklı bir aşınma ortaya çıkmıştır.

Bijwe ve Rattan (2007) çalışmalarında polyetherimide (PEI) gibi mekanik ve termal özellikleri çok iyi olan termo plastik polimerlerin iki yöndeki mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla oluşturulan çift yönlü takviyeli kompozit malzemelerin iyi bir tribolojik potansiyele sahip olabilecekleri ile ilgili konu üzerinde yoğunlaşmışlardır. %55 hacim kaplayacak şekilde düz, kabarık ve saten dokuma biçimlerinde olmak kaydıyla üç farklı karbon elyafı oluşturulmuştur. Dört farklı kuru aşınma modu için deneyler yapılmış olmakla birlikte erozif aşınma için kabarık dokumada elde edilen erozyon oranının en yüksek olduğu bulunmuştur. Saten dokumada ise düz dokumaya göre daha fazla erozyon oranı gerçekleşmiştir.

Zhang ve ark. (2003), polyethylene (PE), polyurethane (PUR) ve epoksi ile modifiye edilerek hidrotermal işlemi ile bileşenlerine ayrılmış polyurethane (EP-PUR) malzemelerin Yapay Sinir Ağı (YSA) yaklaşımını kullanarak erozif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çarpma açısı ve bazı karakteristik özellikler ile malzeme kompozisyonu sistem için giriş değeri olarak kabul edilmiştir. Bu giriş değerlerine bağlı olarak erozyon oranı çıkış değeri olarak elde edilmiştir. YSA yaklaşımı kullanılarak sonuçların bulunması ve erozyon aşınması üzerinde yorumların yapılması görüngüsel bir metot olarak karşımıza çıkmakla birlikte elde edilen sonuçların artırılması ve daha net bir sonuca varılması açısından yeteri kadar tatmin edici bulunmuştur.

Rattan ve Bijwe (2007) yaptıkları çalışmada düz örülmüş karbon yapı (CF) (matriste %40) ile takviye edilmiş polyetherimide (PEI) kompozit malzemeler oluşturarak bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini karakterize etmişler ve erozyon aşınma davranışını incelemişlerdir. PEI ve kompozitinin çeşitli çarpma açılarındaki erozyon aşınma davranışı, sabit çarpma hızında ve aşındırıcı partikül olarak da silis kumu kullanılarak incelenmiştir. Her iki malzeme de incelendiği zaman minimum aşınma $90^o$ lik çarpma açısında meydana gelmiştir. PEI çok sünek bir polimer (kırılma uzaması %60) olmamasına rağmen sünek ve yarı sünek malzemelerde olduğu gibi maksimum aşınma $15^o$ de gerçekleşmiştir. Kompozit ise (kırılma uzaması %1) en yüksek aşınmayı $30^o$ de göstermiştir. SEM kullanılarak yüzeylerde oluşan aşınma durumları incelenmiştir.

Getu ve ark. (2007) yaptıkları deneysel çalışmada polymethylmethacrylate (PMMA) malzemeler üzerinde çarpma açısının bir fonksiyonu olarak erozyon oranı

değerlerini incelemişlerdir. Aşındırıcı partikül olarak 25 μm nominal çapında $Al_2O_3$ partikülleri kullanmışlardır. Sünek bir erozyon mekanizması incelendiği zaman maksimum erozyon oranının küçük çarpma açılarında gerçekleştiği literatürden bilinmekle birlikte yapılan çalışma sonucunda ise polymethylmethacrylate malzemelerinde 25º lik çarpma açısında maksimum erozyon oranı değerlerine sahip olduğu bulunmuş ve sünek malzemelerde karşılaşılan duruma benzer bir durumla karşılaşılmıştır.

Chen ve Li (2003) yaptıkları çalışmada katı parçacık erozyonunun karmaşık bir zarar verme süreci olduğunu ve bu duruma mekanik ve metalurjik faktörlerin önemli etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Kompozit malzemelerdeki karşılaşılan katı parçacık erozyonunun neden olduğu yüzey hasarını yorumlamak için Newton'un hareket kanunu esas alınarak hesaba dayalı dinamik bir model oluşturmuşlardır. Malzemenin mekanik özellikleri referans alınarak yapılan inceleme sonucunda çarpmanın etkisine bağlı olarak malzeme yüzeyinden kopan partiküllerin komşu partikülleri de etkilediği sonucuna varılmıştır. Kompozit malzemenin erozyon davranışı üzerine takviye faz ile matris ara yüzeyindeki bağ kuvvetlerinin önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çarpma hızının, katı parçacık boyutunun ve boyut oranının da önemli değişkenler olduğu belirlenmiştir.

Rattan ve Bijwe (2006), emdirme tekniği ile üç farklı örgü tipi (düz, kabarık ve saten) oluşturarak %55 hacimsel dağılıma sahip karbon takviyeli dokuma polyetherimide (PEI) kompozit malzeme imal etmişlerdir. Benzer özelliklere sahip toplam yedi kompozit malzeme imal edildikten sonra fiziksel ve mekanik özellikler (çekme gerilmesi ve modülü, kırılma uzaması, eğilme gerilmesi ve modülü, tabakalar arası kayma gerilmesi vs.) açısından değerlendirilmiş ve özdeş şartlarda erozyona tabi tutulmuştur. Düz dokunmuş kompozitlerin saten dokunmuş kompozitlere kıyasla biraz daha iyi bir özellik sergiledikleri görülmüştür. Bununla birlikte, kabarık dokunmuş kompozitler ise en zayıf performansa sahip olmuştur. Ayrıca uzama ile sertlik gibi özellikler aşınma direnci üzerine en önemli etkiyi oluşturmuştur.

Ruff ve Ives (1975) erozyon aşınmasında katı partiküllerin hızının bulunması üzerine çalışma yapmışlardır. Basit bir mekanik yapılandırma ile değişik durumlarda ölçü alma imkânının olduğu gösterilmiştir. Çalışma sonucunda deney aparatları

üzerinde yapılan ölçümlerin örnekleri sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada nozul tasarımının öneminden de bahsedilmiş ve parçacık ile gaz akış hızları arasındaki mukayeseye de yer verilmiştir.

Stevenson ve Hutchings (1995), erozyon testlerinde numunenin aşınma oranının güçlü bir şekilde partikül çarpma hızına bağlı olduğunu düşünerek partikül hızına etki eden faktörlerin anlaşılması için bir test aparatının oluşturulmasının zorunlu olduğu kanaatine varmışlardır. Bu çalışmada partikül hızının kesin bir şekilde ölçülmesi, paralel bir silindirik nozul ile hava püskürten erozyon test düzeneği kullanarak optoelektronik metot vasıtasıyla sağlanmıştır. Hız ölçümünde çift disk metodu yaygın bir kullanıma sahip olmakla birlikte optoelektronik metot kullanılarak bulunan çarpma hızı değerleri daha kesin sonuçlar vermiştir. Partikül boyutu 63 μm'den 730 μm'ye, partikül malzeme yoğunluğu 2500 kg/$m^3$ ile 7980 kg/$m^3$ arasında, partikül çarpma hızı ise 16 m/s ile 85 m/s arasında değiştirilmiştir. Ayrıca nozul geometrisi de modifiye edilmiştir.

# 3. TEORİK ESASLAR

## 3.1. Aşınma

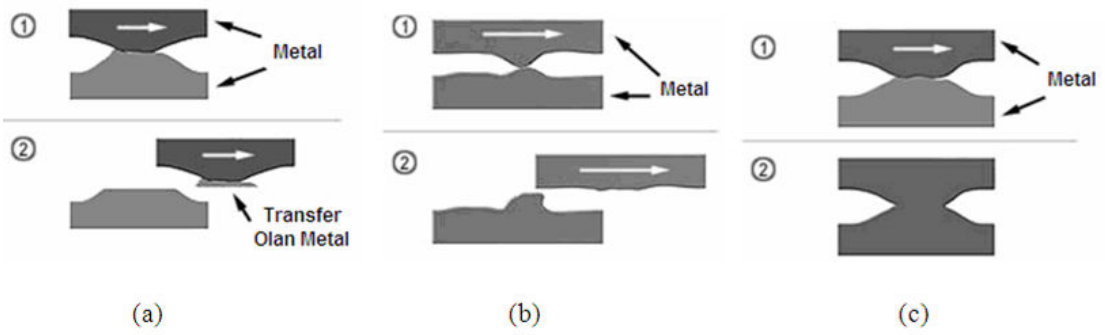
Aşınma; katı cisimlerin yüzeylerinden ufak parçacıkların veya tabakalar halinde ince parçaların ayrılması ile sonuçlanan bir malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu olay sonucu malzemede meydana gelen yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla doğrudan ilgilidir. Mekanik bir etkinin görülmesi, sürtünmenin oluşması (izafi hareket), yavaş ve sürekli bir hareketin gerçekleşmesi (ani hareket ve darbe olmamalı), malzeme yüzeyinde değişiklik oluşturması ve istenmediği halde meydana gelmesi aşınma olayının ortaya çıkması için gerek ve yeter şartlar olarak kabul edilmektedir (Ludema, 1996).

Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termik sebeplerle aşınma oluştuğu gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir. Aşınmayı makine elemanları, ulaşım araçları, giysi ve ayakkabılar, kullanılan eşya ve mobilyalar dâhil gündelik yaşamın hemen her alanında gözlemlemek mümkündür. Aşınma sonucu makine elemanlarının şekillerinde, yüzey kalitelerinde ve boyutlarında değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler sonucu makine parçaları fonksiyonlarını yerine getiremez hale gelmektedir. Makine, Gemi, İnşaat, Tekstil ve Uçak mühendisleri tasarladıkları makine ve cihazlarda aşınmanın etkisini mutlaka dikkate almak zorundadırlar. Ayrıca aşınma doğanın kendisinde de mevcuttur. Yağmur ve sel nedeniyle olan toprak erozyonu, deniz kenarında dalgalar nedeniyle olan kıyı erozyonu, çöllerde rüzgâr nedeniyle olan rüzgâr erozyonu doğada kendiliğinden meydana gelen aşınmaya örnek olarak gösterilmektedir. Bu kadar geniş bir etki alanına sahip olan aşınma, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle kendi içerisinde birden fazla çeşide ayrılmaktadır. Adhezif aşınma, abrazif aşınma, korozif aşınma, kazımalı (fretting) aşınma, yorulma aşınması (pitting) ve erozyon aşınması en çok karşılaşılan aşınma türleri olarak sınıflandırılmaktadır.

### 3.1.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma en yaygın karşılaşılan aşınma türüdür ve kaynak bağı teorisi ile açıklanmaktadır. Özellikle kayma sürtünmesi yapan ve metalografik yapıları birbirine benzeyen metallerin kaynaklaşmasıdır (Gürleyik, 1986).

Çok iyi parlatılmış yüzeylerin bile çok küçükte olsa bazı bölgeleri birbirine temas eder. Çok küçük yüklemeler altında bile bu noktalardaki gerilmeler malzemenin akma sınırını geçebilir. Yüzeydeki oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktaların kesilmesi sonucu yenme ve aşınma olayı gerçekleşir (Şekil 3.1.).



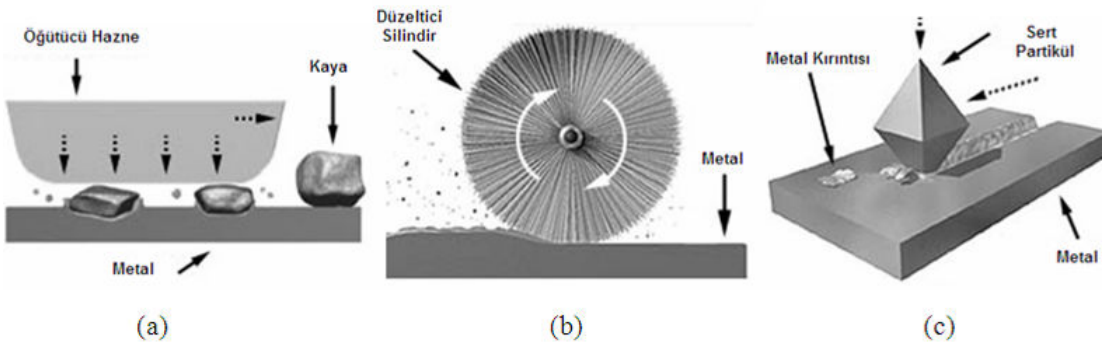

**Şekil 3.1.** Adhezif aşınma; (a) metal–metal etkileşimi sonucu yüzeyler arası malzeme transferi, (b) metallerin izafi hareketine bağlı olarak pürüzlülük tepelerinin ortadan kaldırılması, (c) metallerdeki çıkıntıların teması ile gerçekleşen bağ oluşumu

Geniş bir etki alanına sahip olan adhezif aşınmayı önlemek için;

- Sistemdeki malzemelerin benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasından seçilmemesi gerekmektedir. Malzeme çiftinin birinin sert diğerinin yumuşak olarak seçilmesi bu aşınmanın etkisini azaltmaktadır.
- Metal–metal yüzeylerinde kimyasal filmler oluşturmak (fosfat kaplama gibi) aşınmayı engellemektedir.
- Birbiri içerisinde çözünmeyen iki metal bir arada kullanılırsa mikro kaynaklanma engellenmiş olmakta ve aşınma geciktirilmektedir fakat pratikte bu durumun kullanımı çok sınırlıdır.
- Sistemde iyi bir yağlama yönteminin kullanılması sürtünmeyi azaltmakta, ısıyı uzaklaştırmakta ve böylece mikro kaynak bölgeleri önlenerek aşınma yavaşlatılmaktadır.
- Birbirine temas eden yüzeylerde pürüzlülük tepeleri yoksa aşınma meydana gelmemektedir. Dolayısıyla parçaların yüzeylerinin pürüzlülükleri düşürülmeye çalışılmalıdır fakat bu da sistemin maliyetini artırmaktadır.

### 3.1.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, yırtılma veya çizilme aşınması olarak da adlandırılmaktadır. Bu aşınma genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşip sert partiküllerin malzeme yüzeyinden parça koparması şeklinde gerçekleşmektedir (Akkurt, 1990). Bu sert partiküller, yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğeleme ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olmaktadırlar (Şekil 3.2.).



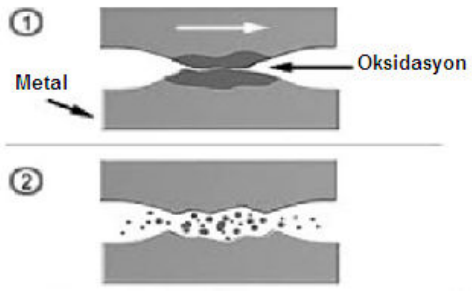

**Şekil 3.2.** Abrazif aşınma; (a) iki ve üç elemanlı aşınmanın oluşumu, (b) yüzey taşlama işleminde yüzeyden kaldırılan partiküllerin aşınma etkisi, (c) sert partiküllerin yüzeyde oluşturduğu kazıyıcı etki

Abrazif aşınmayı önlemek için;

- Yüzeyler ısıl işlem veya sert malzeme kaplama ile sertleştirilmelidir. Bu işlem abrazif aşınmanın engellenmesinde en etkili yoldur. Ancak bu durumda da malzemenin gevrek olarak kırılma riski artacaktır.
- Dışarıdan sert malzemelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır. Hava, su ve yağlarda kullanılan partiküller filtre edilerek sistemden uzaklaştırılmalıdır.
- Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir. Ancak bu temizleme işi oldukça zor bir iş olduğu için bazen aşınma kaçınılmaz olabilmektedir.
- Aşınmaya maruz parçaların kolay bir şekilde değiştirilmesine imkân verecek tasarımlar yapılmalı ve bu şekilde aşınma azaltılmalıdır.

### 3.1.3. Korozif aşınma

Yüzeyler, hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddelerin bulunduğu ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince ve sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da gerçekleşir. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılır ve kırılan parçacıklar yerinden ayrılarak aşınma parçacıklarını oluştururlar. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar sert bir tabaka oluşur, yük altında bu tabaka tekrar kırılır ve bu şekilde tekrarlı olarak devam eden olay oksidasyon aşınması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.3.). Ayrıca hava rutubetinin de korozif aşınma üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.

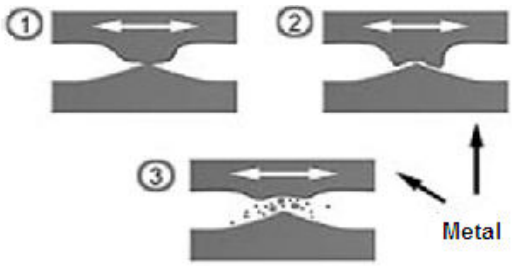



**Şekil 3.3.** Korozif aşınma

Bu aşınmanın oluşmasında en önemli faktör pastır. Bu ise okside neden olmaktadır. Oksitten korunmak için yüzeyler fosfat veya sülfit ile kaplanmalı veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca birbiriyle reaksiyona girmeyecek alaşım elemanları seçilmelidir.

### 3.1.4. Kazımalı (fretting) aşınma

Bu aşınma tipi mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhezif aşınmaya benzer, farkı ise adhezif aşınma birbiri üzerinde kayan yüzeylerde gerçekleşirken kazımalı aşınma ise birbirine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Titreşimli ortamda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanları ve otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarında çok rastlanılan bir hasar tipidir (Şekil 3.4.).

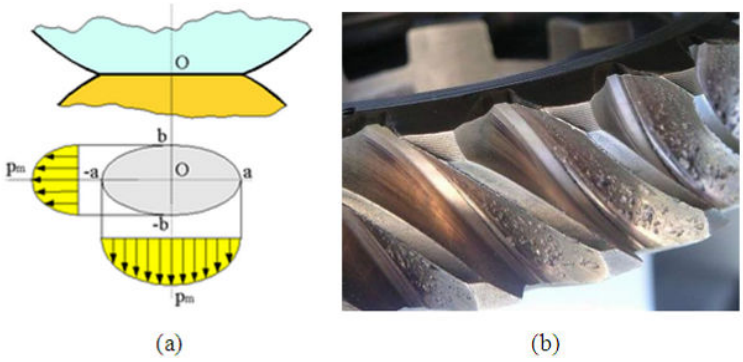



**Şekil 3.4.** Kazımalı (fretting) aşınma

Titreşimi azaltmak veya gidermek, bağlantı noktalarında elastomer malzeme kullanmak, bağlantı noktalarını yağlamak ve ara yüzeylerdeki kaymaları azaltmak bu aşınmayı önlemek için çözüm yolu olarak kabul görmektedir.

### 3.1.5. Yorulma aşınması (pitting)

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir (Ay, 2008). Özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması olayıdır. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz basınçları meydana gelir (Şekil 3.5.).




**Şekil 3.5.** Yorulma (pitting) aşınması; (a) temas yüzeyinde oluşan Hertz basınçları, (b) yüzeyin aşınma sonrası görüntüsü

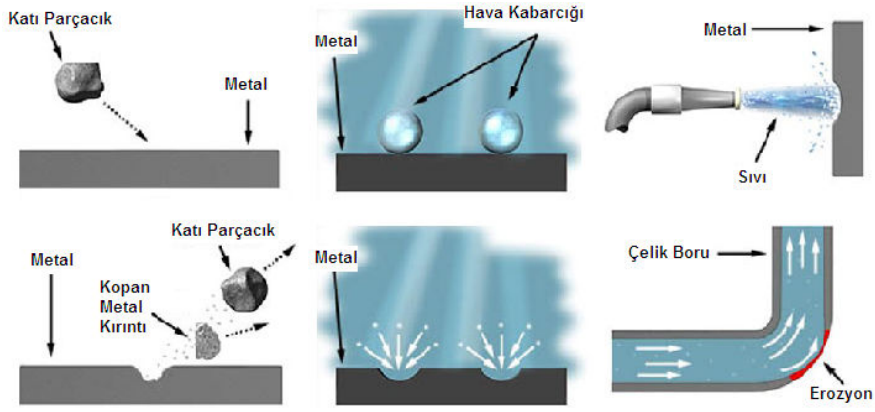
Hertz basıncının etkisinde yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur ve değişken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket eder, büyür ve yüzeyde küçük çukurlar meydana getirerek olay sonlanır. Çukurcukların çok küçük olup büyümediği ve yüzeye yayılmadığı durum ilkel

pitting, çukurcukların zamanla büyüdüğü ve yayıldığı durum ise tahripkâr pitting olarak tanımlanır. İlkel pitting'de parçanın normal çalışması genellikle etkilenmezken tahripkâr pitting'de parça işe yaramaz hale gelir.

Yorulma aşınmasının (pitting) oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynamaktadır. Doğal sertlikteki malzemelerde örneğin çeliklerde pitting meydana gelmektedir ancak çeliğin yüzeyi sertleştirilirse pitting oluşumu geciktirilebilir. Ayrıca bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir.

### 3.1.6. Erozyon aşınması

ASTM G76–95 standardına göre; belirli bir hıza sahip olan katı parçacıkların, bir yüzeye çarpması durumunda yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi ile sonuçlanan olay erozyon aşınması olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bir sıvı içerisinde hareket eden sert partiküllerin, malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kaymasına ve yuvarlanmasına bağlı olarak çok sayıda parça koparması sonucunda da erozyon aşınması meydana gelebilmektedir (Şekil 3.6.).

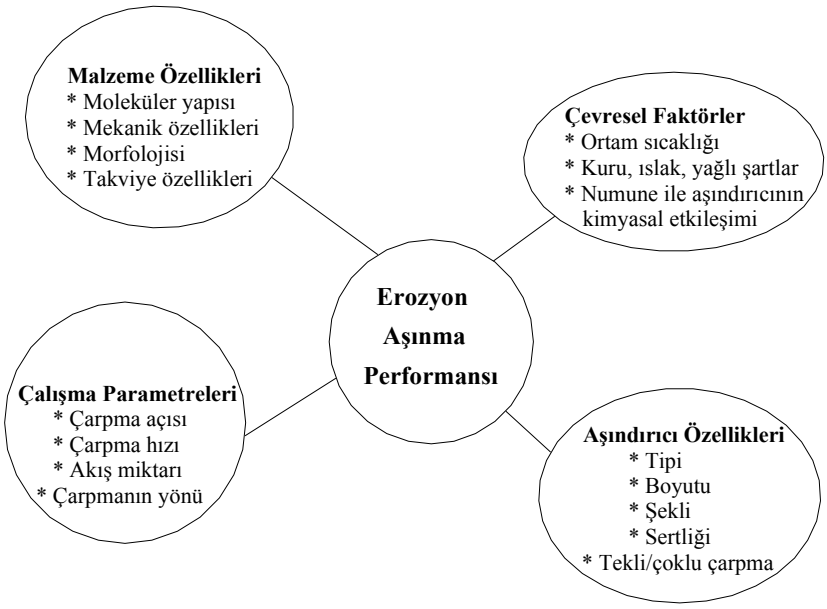



**Şekil 3.6.** Erozyon aşınması türleri

#### 3.1.6.1. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler

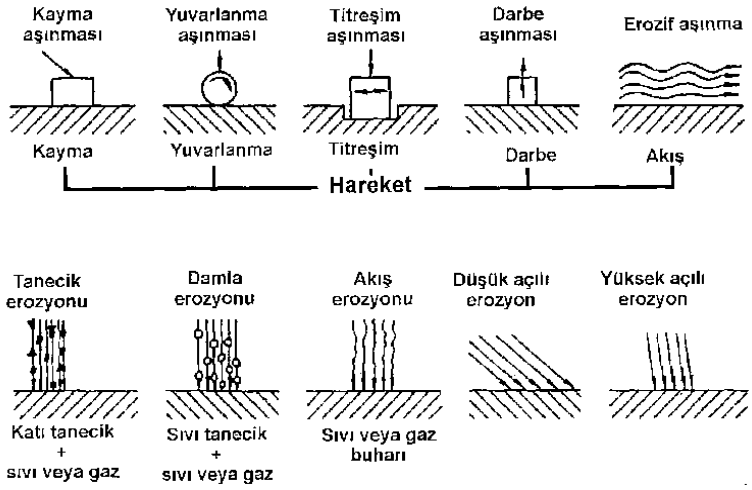
Katı, sıvı, gaz veya bu maddelerin birleşimi sonucunda makine elemanlarının yüzeylerinde meydana gelen çizik, çatlak, oyuk ve çukurcuk şeklindeki olumsuzluklarda erozyon aşınması önemli etkiye sahiptir. Yüzeylerde bu olumsuzlukların ortaya çıkmasında esas malzeme özellikleri, aşındırıcı partikül

özellikleri, çalışma parametreleri ve çevresel faktörler aktif rol oynamaktadır. Erozyon aşınma performansını etkileyen faktörler Şekil 3.7.'de detaylandırılmıştır (Hutchings, 1996).




**Şekil 3.7.** Erozyon aşınma performansına etki eden faktörler

Erozyon aşınma performansını etkileyen bu faktörlerin hepsi her malzeme için aynı etkiyi oluşturmamaktadır. Çünkü bu faktörlerin farklı kombinasyonları sonucu günlük hayatta birden fazla erozyon aşınma türü ile karşılaşılmakta olup buna bağlı olarak da aşınmanın seyri değişiklik göstermektedir. Şekil 3.8.'de genel olarak karşılaşılan aşınma türleri şematik olarak sınıflandırılmış olup farklı değişkenlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan erozyon aşınma türleri de detaylandırılmıştır.




**Şekil 3.8.** Erozyon aşınma türlerinin şematik gösterimi

Katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpmasıyla meydana gelen malzeme kaybı, erozyon proseslerinin en yaygın olanıdır ve katı parçacık erozyonu olarak tanımlanmakta olup son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu ilgi, kömür dönüştürme santralleri üzerine yapılan araştırmalardan, bu sistemlerde elde edilen gelişmelerden ve santrallerin değişik ekipmanlarında katı parçacıkların akışını sağlamak amacıyla oluşan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır.

Katı parçacıkların hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantıları ile dirseklerine ve diğer yüzeylere çarpmasıyla şiddetli erozyon aşınmaları oluşmaktadır.

Deniz araçlarının pervaneleri devamlı kum, taş vb. katı parçacıklara maruz kaldığı için zamanla bu pervaneler aşınmakta ve görevini tam olarak yapamaz hale gelmektedir. Kömür tozu ve un gibi pnömatik iletim hatlarında, türbin çarklarında, hidrolik pompalarda, kumlama makineleri ekipmanlarında ve püskürtme lülelerinde de benzer etkiler görülmektedir. Bu sebeple, bu ve benzeri sistemlerde erozyon aşınmasının önlenmesi için gerekli çalışmalar yoğunlaşarak devam etmektedir.

Enerji dönüşüm sistemlerinde kömürün küçük tanecikler halinde yaygın kullanılması da erozyona yol açmaktadır. Jet motorlarına ve helikopter rotor kanatlarına katı parçacıkların çarpması, yine benzer bir durum da büyük türbinlerde oksit tabakalarının kopması ve ardından kanatlara ve yüzeylere çarpması sonucunda da katı parçacık erozyonunun oluşması söz konusu olmaktadır.

Ayrıca katı parçacık erozyonu yıllardır uzay havacılık sistemlerinde sorun olmuştur. Helikopterlerin ve uçakların kanatlarında oluşan deformasyonlar erozyon aşınması kapsamında değerlendirilmektedir.

Kömür dönüşüm sistemleri gibi yüksek sıcaklıkta ve erozif ortamda çalışan yerlerde korozyon ve çarpma erozyonu gibi çift etkili yüzey bozulma türleri ile de karşı karşıya kalınmaktadır. Uzay araçlarının ve füzelerin atmosfere tekrar girdiklerinde burun kısımlarında ve ısı muhafazalarında ise abrazyon ve erozyona bağlı çift etkili bozulma örneği meydana gelmektedir.

Makine parçalarının katı parçacık erozyon aşınmasına karşı davranışı iyi bir şekilde bilinirse bu aşınmaya maruz kalan sistemlerin ve parçaların en uygun ve en ekonomik şekilde bu aşınmadan korunma metotları oluşturulabilir. Böylece önleyici sistemler geliştirilebilir, parçaların ömrü arttırılabilir ve ekonomik açıdan kazanımlar sağlanabilir.

Tüm bu olumsuz etkilerinin yanında erozif proseslerin faydaları da az olmakla birlikte önemli bir yere sahiptir. Bunlardan kum püskürtme metodu bilinen bir metottur. Ama sıvı jeti ile kesme işlemlerinin, madencilikte, tünel açma, kaya kesme, ahşap, grafit ve epoksi kompozit malzemelerin kesme işlemlerinde kullanıldığı çok fazla bilinmemektedir. Ayrıca ev tesisatında, delik açma işleri için sıvı jeti kullanılabileceği araştırılmış ve bu uygulamadan olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

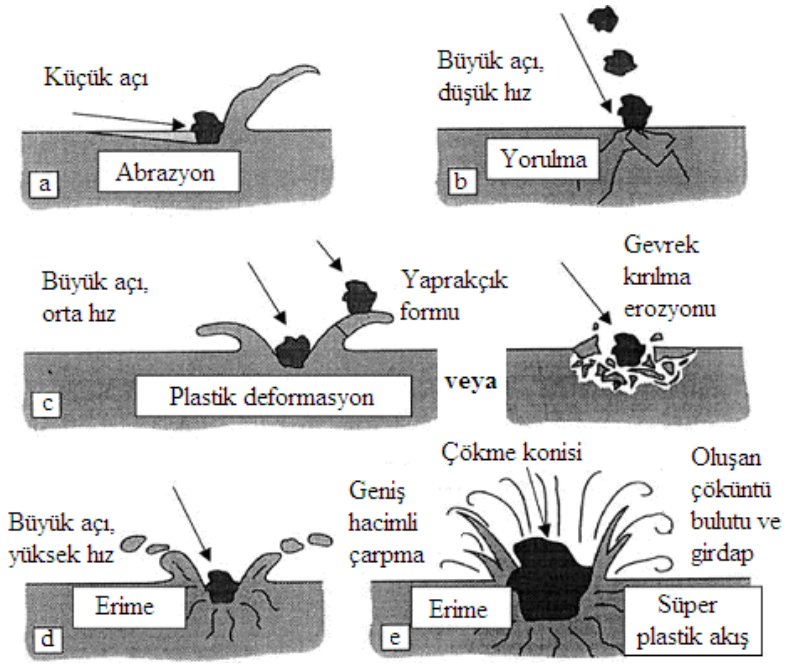
### 3.1.6.2. Erozyon aşınma mekanizmaları

Erozyon aşınmasının yorumlanmasında temel olarak tekli çarpma olayı aktif görülmekle birlikte çoklu çarpma sonucu partiküllerin etkileşimleri ve bu etkileşim sonucu yüzeydeki değişim, kompleks olayları da beraberinde getirmektedir.

Yüksek hıza sahip tanecikler kinetik bir enerji oluşturarak çarptıkları yüzeylerde değişiklik meydana getirirler. Bu değişimler esas malzemede adezif ve abrazif etkiye yol açmakta bu ise yüzeyde plastik deformasyon oluşturmakta ve ısıyı artırmaktadır. Böylece erozyon aşınması artış göstermektedir.

Tekli veya çoklu çarpma sonucunda malzeme yüzeyinde mikro çatlama, mikro çizilme ve mikro kesilme olayları meydana gelmektedir. Bununla birlikte sürekli darbelerin tesiriyle yüzeyde ve yüzeyin altında yorulma çatlakları ortaya çıkmakta daha sonrada yüzeyde oyuklar ve çukurcuklar meydana gelmektedir.

Bu durumlara ait şematik gösterim Şekil 3.9.'da verilmiştir.



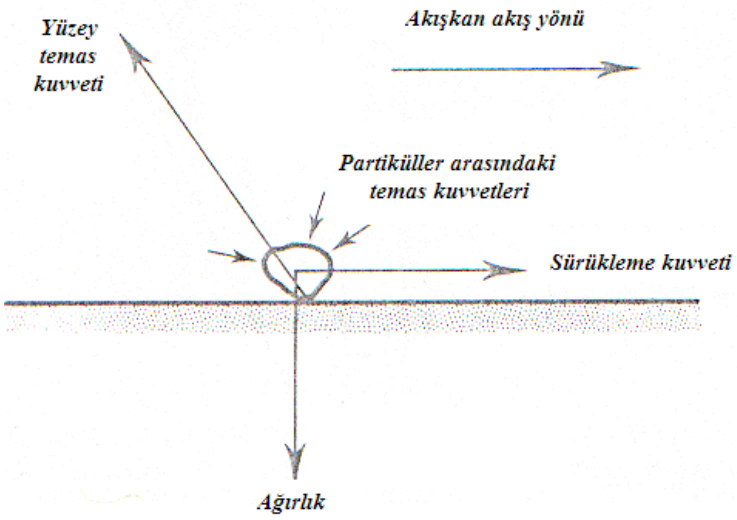

**Şekil 3.9.** Katı parçacık erozyonunda karşılaşılan muhtemel mekanizmalar; (a) küçük çarpma açılarındaki abrazyon, (b) düşük hız ve büyük çarpma açısındaki yüzey yorulması, (c) orta hız ve büyük çarpma açısındaki gevrek kırılma veya çoklu plastik deformasyon, (d) yüksek çarpma hızlarındaki yüzey erimesi, (e) ikincil etkiler sonucu oluşan makroskopik erozyon (Zum Gahr, 1987)

### 3.1.6.3. Aşındırıcı partikülün kuvvet analizi ve yüzeye etkisi

Erozyonda farklı kaynaklardan gelen birçok kuvvet, katı yüzey ile temas halinde olan partikül üzerinde etkili olmaktadır (Şekil 3.10.). Birbiri ile temas eden parçacıklar temas kuvvetlerine neden olurlar ve akan bir sıvının varlığı halinde sürüklenme durumu görülebilir.

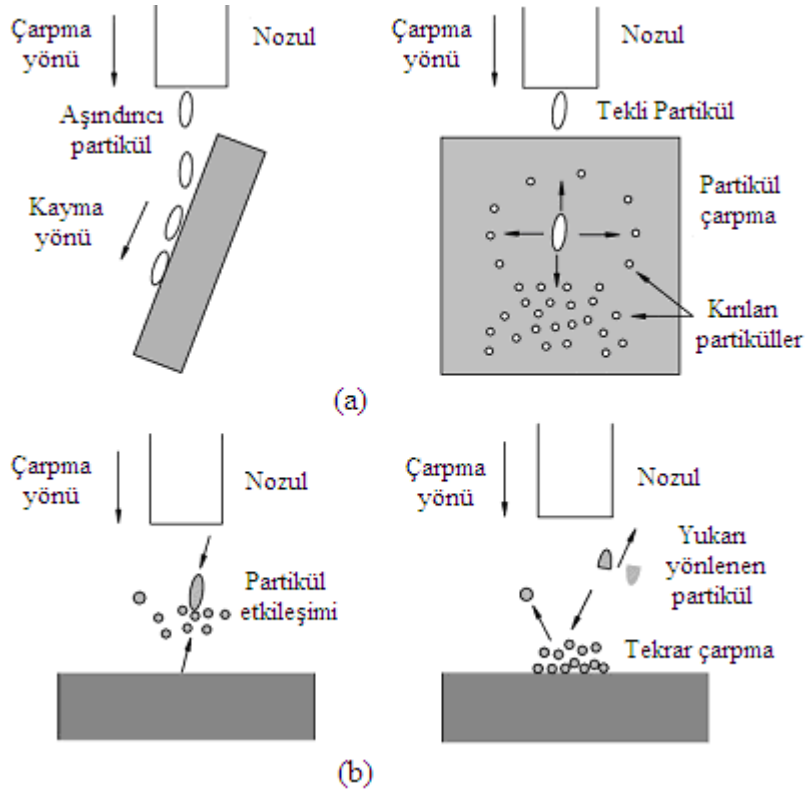
Bazı koşullarda, yerçekimi önemli olabilir. Bununla birlikte erozif parçacık üzerinde bulunan ve temel olarak bu parçacığın başlangıçtaki hızının azalmasına neden olan baskın kuvvet çarpma esnasındaki yüzeyin tepki kuvvetidir.

Abrazif aşınmada aşınan malzemenin miktarı, kayma mesafesine ve normal kuvvetin şiddetine bağlıdır. Erozyonda ise aşınma miktarı, yüzeye çarpmakta olan parçacıkların sayısına, kütlesine ve bunların etki hızına bağlıdır.




**Şekil 3.10.** Yüzeyle temastaki bir partiküle etki eden kuvvetler (Hutchings, 1987)

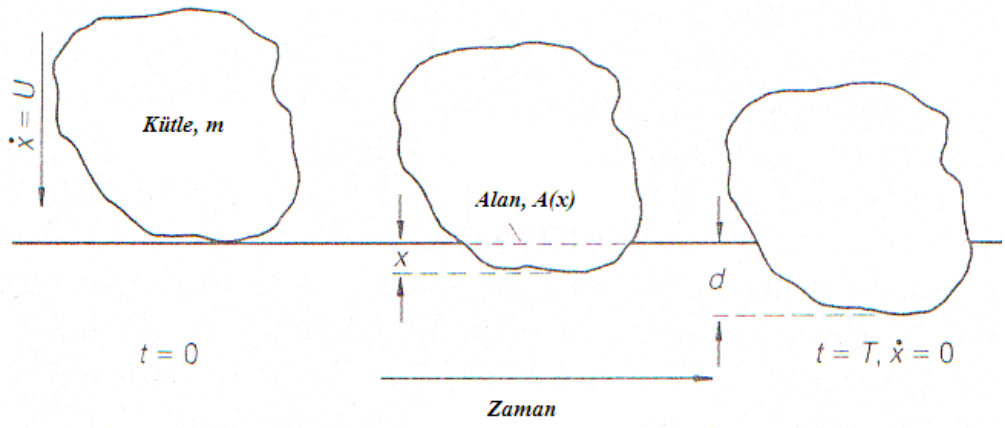
Partikül üzerinde bu kuvvetler oluşmakta iken bu partiküllerin numunelerde oluşturduğu değişim ise Şekil 3.11.'de şematik olarak gösterilmiştir.




**Şekil 3.11.** Aşındırıcı partikülün yüzeyde oluşturduğu değişim; (a) eğik çarpma durumunda tekli çarpma etkisi ve partikül kırılması, (b) dik çarpma durumunda çoklu çarpmaya bağlı olarak partiküller arası etkileşim (Camacho ve ark., 2009)

### 3.1.6.4. Plastik deformasyona bağlı erozyon aşınması

Plastik deformasyonla ilgili erozyon mekanizmalarını incelemeden önce daha yumuşak bir yüzeye dik olarak çarpan tek bir parçacığın davranışı incelenmelidir (Hutchings, 1996). Aşındıran parçacığın deforme olmadığını ve problemin yarı statik olarak ele alınabileceği (örneğin dalga yayılması ve gerilme oranı hassasiyeti gibi dinamik etkileri göz ardı ederek) kabul edilebilir. Etkili olduğu varsayılan tek kuvvet yüzey tarafından uygulanan tepki kuvvetidir. Buna ek olarak yüzey üzerindeki deformasyonun tamamen plastik olduğu ve bir basınca (H sertliğine) sahip olduğu kabul edilir. Erozif parçacık ilk temastan sonra t zamanında, m kütlesine sahip olan parçacık yüzeye $x$ derinliğine kadar girmiş olacaktır; yüzeydeki çentiğin kesit alanı A($x$) olacaktır. Şekil 3.12.'de ilk temas, t = 0 anında gerçekleşmiş iken parçacık, t = T anında iken durma noktasına gelmiştir.




**Şekil 3.12.** Parçacığın plastik deforme edilebilen yüzeye batma prosesleri

Burada A($x$) alanı, parçacığın şekliyle belirlenmektedir. Parçacığın hızını kesen kuvvet, A($x$) alanı üzerinde etki sahibi olan plastik akış basıncının sonucunda ortaya çıkan kuvvettir. Ve parçacığın hareketine ait denklem aşağıdaki şekilde yazılır:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -HA(x) \tag{3.1}$$

Basit parçacık şekilleri için bu eşitlik analitik olarak hemen çözülebilir. Ancak bizim amaçlarımız için erozif parçacığın parçanın $d$ derinliğinde iken son hacminin bilinmesi gereklidir. Bu noktada, yavaşlatıcı kuvvet tarafından yapılan iş, U değerinde

bir başlangıç hızına sahip olduğu varsayılan parçacığın başlangıçtaki kinetik enerjisine eşit olacaktır.

$$\int_0^d HA(x)dx = \frac{1}{2}mU^2 \tag{3.2}$$

Çentiğin son hacmi olan $V$ aşağıdaki denklemle belirlenebilir,

$$V = \int_0^d A(x)dx \tag{3.3}$$

ve bu yüzden $H$'nin sabit olduğu varsayıldığından,

$$V = \frac{mU^2}{2H} \tag{3.4}$$

şeklinde yazılabilir. Çentikten uzaklaştırılan malzeme birkaç olası durumla karşı karşıyadır. Bunlar:

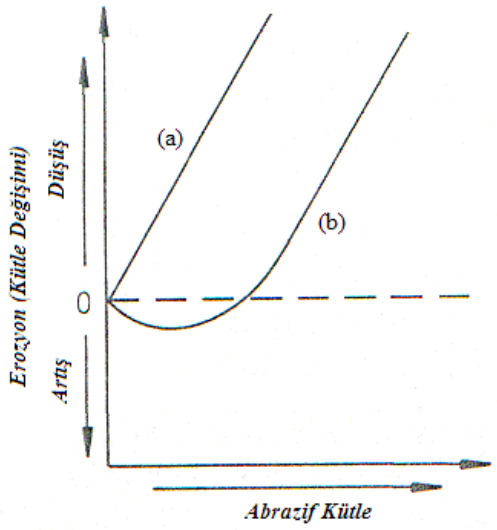
- Elastik deformasyon meydana gelebilir.
- Çentik etrafında plastik olarak deforme olmuş bir şekil oluşabilir.
- Malzeme tamamen ortadan kaldırılıp boşluk oluşabilir.

Burada yalnızca çentikten uzaklaştırılmış malzemenin $K$ büyüklüğündeki bir bölümü aşınma çukuru olarak kabul edilirse:

$$\text{Kaldırılan Malzeme Kütlesi} = K\rho\frac{mU^2}{2H} \tag{3.5}$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde $\rho$, erozyona maruz kalan malzemenin yoğunluğu, $K$ ise boyutsuz bir faktördür.

(3.4) denklemi birçok etki bakımından yüzeyden kaldırılan malzemenin toplam kütlesinin yüzeye çarpan erozif parçacıkların toplam kütlesiyle orantılı olması gerektiğini ifade etmektedir. Şekil 3.13. ise bir yüzeyden kaldırılan kütlenin yüzeye çarpan parçacıkların toplam kütlesi ile değiştiğini göstermektedir.




**Şekil 3.13.** Kütle kaybının aşındırıcı parçacıkların toplam kütlesine bağımlılığı (Hutchings, 1996)

Bazı malzemelerde parçacıklar yüzeye gömülebilir ve (b) eğrisi ile gösterildiği şekilde başlangıçta bir kütle kazancı oluşturabilir. Temel olarak yumuşak hedef malzemelerle gözlenen ve yüksek geliş açıları ile daha belirgin hale gelme eğiliminde olan bu inkübasyon süresi sonrasında erozyon yüzeye çarpan iri taneli aşındırıcı kütlesi ile doğrusal bir şekilde artar. Birçok yumuşak hedef madde için ve çoğu erozyon parçacığı için bir inkübasyon süresinin varlığı ihmal edilebilir ve yüzeyden kaybedilen kütle, yüzeye çarpan erozyon parçacıklarının toplam kütlesi ile orantılı bir hal alır ve Şekil 3.13.'deki (a) hattı takip edilir.

Sabit durum erozyonunda gözlenen doğrusal ilişki basit bir E, erozyon tanımının elde edilmesini sağlar;

$$E = \frac{\text{Kaldirilan Malzeme Kütlesi}}{\text{Yüzeye Çarpan Asindirici Parcacik Kütlesi}} \tag{3.6}$$

$E$ boyutsuzdur ve (3.6) denklemi;

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \tag{3.7}$$

ifadesiyle tanımlanabilir.

Denklem (3.7)'nin sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınma ile ilgili olarak çıkarılan { Q = ( K * W ) / *H* } denklemi ile karşılaştırılması faydalıdır. Bunların her ikisi de *H* ile ters orantılı olan aşınma oranlarını göstermektedir.

Sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınma denkleminde W; uygulanan toplam normal yükü, Q; birim kayma mesafesinde uzaklaştırılan parçacıkların toplam hacmini, K ise sürtünme parçasının geometrisine ve uzaklaştırılan materyalin oranı η'ya bağlı bir sabiti tanımlamaktadır.

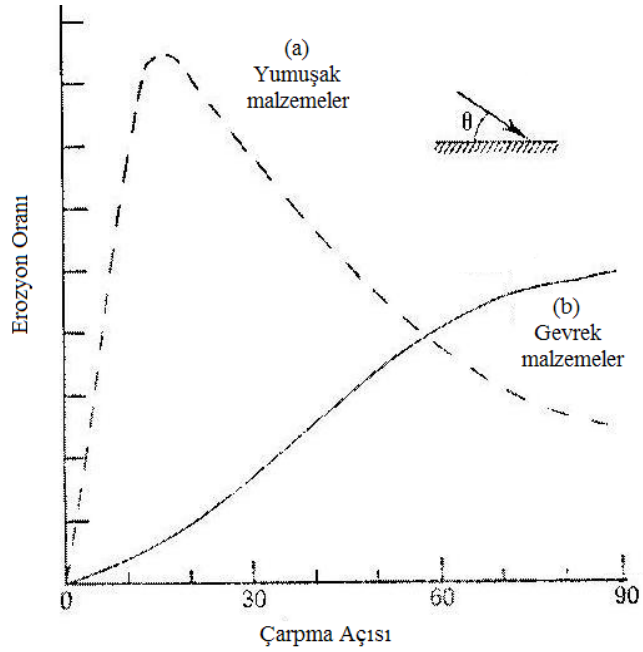
Uygulanan normal yükün rolü erozyonda { $\rho * U^2 / 2$ } miktarı ile ifade edilir. Her iki durumda, aşınmanın şiddeti boyutsuz aşınma katsayısı K ile belirlenir. K malzeme temizleme işleminin etkinliğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir; erozyon parçacıkları tarafından yeri değiştirilen tüm malzemenin temizlenmesi durumunda K birim değere sahip olacaktır.

### 3.1.6.5. Metallerin erozyonu ve tipik K değerleri

Metallerin erozyonu için K tipik olarak $5.10^{-3}$ ile $10^{-1}$ arasındadır ve bu değerler iki cisimli sürtünme için gözlenen değerlere benzerdir.

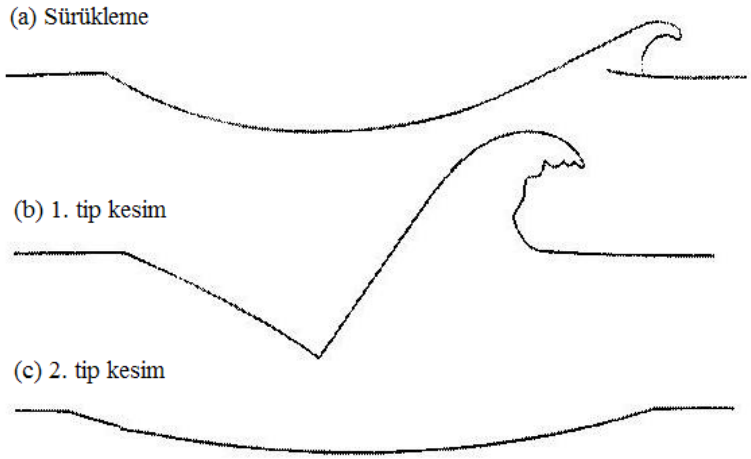
(3.7) denklemi yalnızca erozyon aşınmasını kontrol eden faktörlere ait kaba bir tahmin sağlamaktadır; örneğin etki açısı sonucunda erozyonda ortaya çıkan herhangi bir değişikliği ihmal eder. Bu konunun daha iyi anlaşılabilmesi için sert bir parçacık ile yumuşak malzemenin yüzeyi arasındaki etkileşiminin daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Sert bir parçacığın etkisine bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonun geometrisi etki hızına, parçacığın biçimine ve yönüne ve etki açısına bağlı olarak değişir. Erozyondaki etki açıları genellikle Şekil 3.14.'de görüldüğü üzere yüzey düzlemine bağlı olarak tanımlanır. Normal etki için $\theta = 90^o$ lik geliş açısında iken θ sıfıra gitme eğilimindedir.




**Şekil 3.14.** Erozyonun çarpma açısına olan bağımlılığı (Finnie, 1958)

Yumuşak malzemelerin erozyonu (örneğin çoğu metaller) etki açısına bağlı olarak belirgin biçimde değişir ve bu durum Şekil 3.14.'de (a eğrisi ile) gösterilmiştir. Maksimum değer $20^o$ ila $30^o$ arasındadır ve normal geliş açısındaki maksimum aşınma oranının yarısı ile üçte biri arasında değişen bir miktardır. Tek taneciklerin metaller üzerindeki etkisi üzerine $30^o$ lik etki açısında yapılan çalışmalar üç temel etki hasarı göstermektedir ve bu türler Şekil 3.15.'de gösterilmiştir (Hutchings, 1979).




**Şekil 3.15.** Sert parçacıkların yumuşak malzemeye çarpması sonucu oluşan şekiller

Yuvarlak parçacıklar malzemeyi kenara doğru iterek ve parçacığın önünde sürükleyerek yüzeyi deforme ederler [Şekil 3.15.(a)]. Komşu alanlardaki diğer etkiler ağır şekilde zorlanmış malzemenin kraterin ağzından ya da bağlantı dudağından kopmasına yol açarlar. Açısal bir aşındırıcı parçacığın neden olduğu deformasyon, parçacığın yüzeye çarptığı sıradaki yönü ve parçacığın temas sırasında öne doğru mu yoksa arkaya doğru mu hareket ettiğine bağlıdır. 1. tip kesim [Şekil 3.15.(b)] olarak adlandırılan modda parçacık öne doğru hareket eder ve yüzey üzerinde çentikler oluşturur ve malzemeyi öne doğru bir dudak biçiminde kabartır ve bu durum daha sonraki vuruş etkileri nedeniyle yok olabilir. Parçacığın geriye doğru hareket etmesi halinde [Şekil 3.15.(c)], aşındırıcı parçacığın keskin köşesinin yüzeyden bir parça kesip aldığı gerçek bir mekanizma hareketi ortaya çıkabilir. Bu 2. tip kesimdir ve yalnızca dar bir parçacık geometrisi yelpazesinde ve etki yönünde ortaya çıkar.

### 3.1.6.6. Erozyon aşınması test metotları

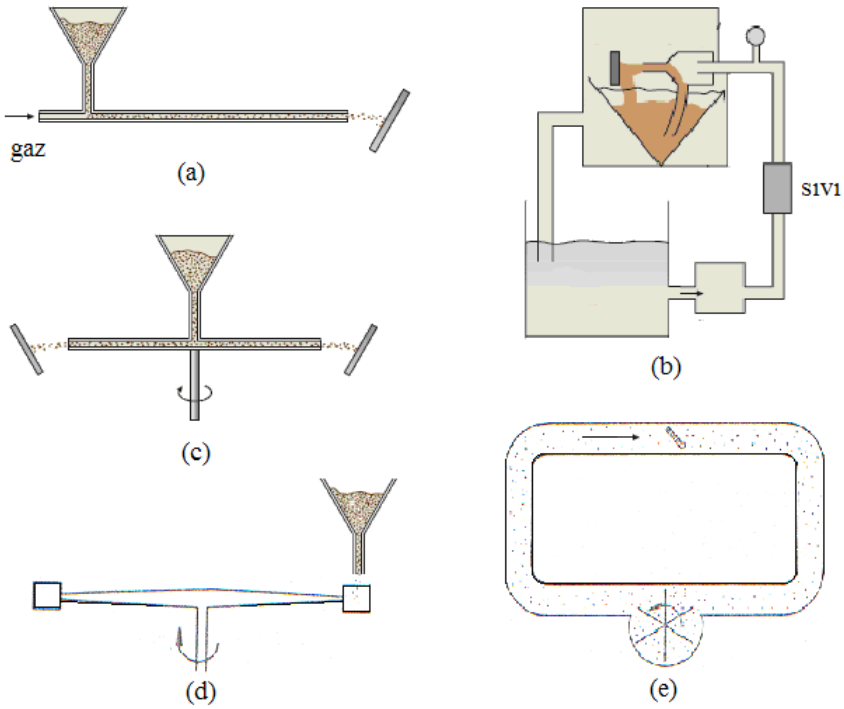
Laboratuar ölçekli aşınma testleri; belli koşullarda mutlak ve izafi aşınma oranları konusunda veri temin etme, teorik modellerin geçerliliğini araştırma ve aşınma mekanizmalarını inceleme amaçlarıyla uygulanmaktadır. Bu hedeflerin ilki tasarım mühendisine direkt değerler verirken, diğerleri sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınmanın anlaşılmasını kolaylaştırmada daha fazla değer taşır. Bir test sonucunun faydalı olabilmesi için çarpma koşulları (parçacık hızı, akış ve çarpma açısı) tanımlanmalı ve test edilen parçacıklar ve materyal iyice karakterize edilmelidir.

Laboratuar aşınma testi için yaygın olarak kullanılan metotlar, parçacıkların bir hava ya da sıvı akıntısında ivme kazandırıldığı metotlar ve çarpma hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanıldığı metotlar olarak gruplara ayrılmaktadır. Beş tür test metodu Şekil 3.16.'da şematik olarak verilmiştir.

Şekil 3.16.(a) ve (b)'de parçacıklara paralel kenarlı ya da daha kompleks şekle sahip bir nozul boyunca gaz veya sıvı akıntısında ivme kazandırılır. Daha sonra bu parçacıklar sabit bir açıda nozul sonunda tutulan hedef materyale çarpar. Çoğunlukla jet vuruş ya da gaz akışı metodu adı verilen bu test, gazdaki parçacıklar ya da sıvı ile birlikte kullanılabilir.

Şekil 3.16.(c)'de gösterilen ve bazen açık merkez hızlandırıcı adı verilen metot, parçacıkların sürekli akışını sağlamak için dairesel hareket kullanır ve genellikle havada ya da vakumda kullanılır. Aşındırıcı parçacıklar rotorun merkezi üzerinden beslenir ve radyal tüpler ya da kanallar boyunca dışarıya doğru hareket ederler. Rotorun çevresel hızıyla eşit değerdeki hızda rotoru terk eder. Merkezden dışarıya akan hareketler rotora teğetsel değildir. Bazı tasarımlarda radyal hızı düşürmek için tedbirler alınsa da dairesel kenara ulaştıkları anda radyal hız kazanmışlardır. Sabit numuneler rotorun dairesel kenarının etrafına yerleştirilmiştir ve metot yirmi adet ya da çok farklı örneklerin aşınma hareketlerini aynı anda karşılaştırabilmek için kullanılabilir.

Şekil 3.16.(d)'de gösterilen aparatta, dengelenmiş bir rotorun iki ucundaki iki numune parçacıkların yavaşça düştüğü akış yoluyla, rotorun çevre hızında ve numunelerin yönü ile belirlenen bir açıda bunlara çarparak yüksek hızda hareket eder. Bu dönen kol testi genellikle parçacıklar üzerindeki aerodinamik etkiyi önlemek ve rotoru döndürmek için gereken gücü azaltmak için vakumda kullanılır. Bu metotta numuneleri taşıyan bir rotorun sıvı ve parçacık dolu bir konteynır'a batırıldığı çimento pot testinde kullanılır ancak bu tür testte vuruş açısı ve hızını tanımlamak zordur.



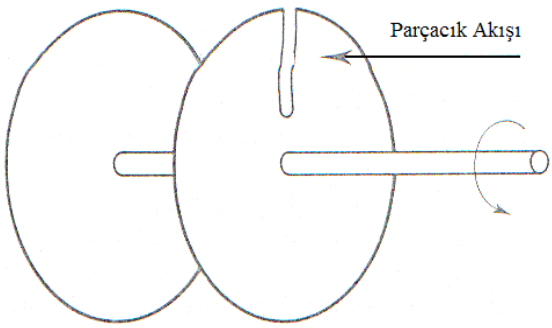

**Şekil 3.16.** Erozyon aşınması test metotlarının şematik gösterilişi; (a) katı parçacık erozyonu, (b) sıvı–çamur erozyonu, (c) santrifüj hızlandırıcı, (d) dönen kol metodu, (e) sirkülasyon metodu

Parçacık aşınma problemleri Şekil 3.16.(e)'de gösterilen pompa devresi ya da yeniden sirkülasyon devresinde de ortaya çıkar. Burada iki fazlı parçacık ve sıvı akışı (gaz veya sıvı) bir boru devresi etrafında gerçekleştirilir. Bu metot, pnömatik ve hidrolik iletim sistemlerinde valfler gibi parçaların aşınma oranlarını belirlemede oldukça önemlidir. Bu metot aynı zamanda numune örneklerini tamamen akış içerisine bırakarak materyallerin durumunu doğrudan incelemek için kullanılır. Şematik diyagram akışın pompa içerisinden geçtiğini gösterse de bazı uygulamalı tasarımlarda parçacıkları sıvıdan ayırıp daha sonra sıvıyı pompaladıktan sonra tekrar birleştirme yoluyla pompadaki aşınma önlenebilmektedir.

Parçacık çarpma hızı, aşınma oranını etkileyen en önemli değişkenlerden birisidir. Aşınma testinde, hızın sabit tutulması ve tam olarak bilinmesi önemlidir. Aşınma testlerinde, basit metotlarla ölçülebilecek olan parçacık hızının sıvının hızıyla aynı olduğunu farz etmek bazen uygun olabilir. Örneğin jet vuruş testinde, belli bir zaman içinde nozuldan çıkan çimento hacmi, çimento jetinin çıkış hızı için direkt bir ölçüm sağlar. Ancak havadaki parçacıklar için uygulanan çoğu test metodunda parçacık hızı için bağımsız bir ölçüm gereklidir.

Çoklu flaş fotoğraf çekim metodu, Lazer Doppler Hızölçeri (LDV) ve çift disk metodu potansiyel olarak kullanılan metotlardır. Ekonomik nedenlerden dolayı çoğunlukla Şekil 3.17.'de şematik olarak gösterilen bu metotların üçüncüsü kullanılmaktadır.

Parçacıkların akışı ortak bir şaft üzerinde birlikte dönen ikili düzeneğin bir diskindeki kanaldan geçer.




**Şekil 3.17.** Çift disk metodu ile hız ölçüm düzeneği (Ruff ve Ives, 1975)

Parçacıklar diğer diske çarpar ve bir işaret bırakır. İkinci bir işaret, parçacık akışının mile sabitlenen diskler üzerindeki kanaldan geçmesine izin verilerek elde edilir. İlk işaretin çıkarılması, disklerin dönme hızı ve parçacıkların diskler arasındaki mesafe boyunca geçişi ile ilgilidir. Dönen disklerin parçacık akışına olan aerodinamik etkisinden dolayı sistematik hata olabilse de, bu şekilde ölçülen hızlarda rastgele hata, ±% 10'dur. Bu hata ~%10 ya da daha üzeri olabilir; küçük parçacıklarda ve düşük yoğunluklarda hata oranı daha büyük değerlere ulaşacaktır.

Yüzeye çarpan parçacıkların akıntısı erozyon aşınmasında önemli olmasına rağmen bazen göz ardı edilen bir değişken olarak işlem görmektedir. Aşınma testleri belirli bir süre içerisinde ya da belirli bir aşındırıcı parçacık kütlesi ile gerçekleştiriliyor olduğundan, akış, yüzeyde bir noktanın maruz kaldığı vuruşların sayısını ve ardışık vuruşlar arasındaki zaman aralıklarını belirleyecektir. Bazı uygulamalı durumlarda, akış düşük olabilir, makul bir süre içinde ölçülebilir aşınma elde etmek için daha yüksek akışta bir laboratuar testi yapılabilir. Bu tür teste hızlandırılmış test adı verilir. Eğer hızlandırılmış testin sonuçları aşınmayı tahmin etmek için kullanılacaksa, parçacık akışının aşınma üzerindeki etkisinin önemli olmadığı kabul edilmelidir. Normal akışlardaki çoğu materyaller için bu doğrudur. Ancak, çok yüksek akışlarda, aşınma yüzeye çarpan parçacıklar arasındaki etkileşmelerden ya da yüzey, yüksek orandaki kinetik enerji ile ısınacağından termal unsurlardan etkilenebilir. Bu tür etkiler, çelik üzerinde 1 $kg.m^{-2}.s^{-1}$ üzerindeki akışlarda ve düşük termal yayılımı olan materyallerdeki düşük akışlarda önemli hale gelebilir. Laboratuar aşınma testilerinde bu yüzden yüksek akışlardan kaçınılmalıdır.

### 3.2. Kompozit Malzemeler

Günümüz teknolojisinin de katkısıyla iki veya daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede makro seviyede toplamak artık mümkün olabilmektedir. Bu şekilde oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler adı verilmektedir.

İnsan yapısı olmaması, dolayısıyla doğal bir malzeme olması, kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemeden oluşması, farklı malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilmesi, bileşenlerin hiç

birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması kompozit malzemelerde genel olarak aranan koşullardır. Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekle birlikte makroskobik açıdan da homojen bir malzeme gibi davranmaktadır (Askeland, 1998).

### 3.2.1. Kompozit malzemelerin özellikleri

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkânı tanımaktadır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen aşağıdaki özelikler kazandırılabilmektedir.

Yüksek Mukavemet: Doğada yüksek mukavemet değerleri sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir.

Hafiflik: Kompozitler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastiklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadır.

Tasarım Esnekliği: Tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilir.

Boyutsal Stabilite: Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar.

Yüksek Dielektrik Direnimi: Kompozitlerin göze çarpan elektrik yalıtım özellikleri, birçok komponent'in üretimi konusunda açık bir tercih nedenidir.

Korozyon Dayanımı: Antikorozif özelliği, diğer üretim malzemelerinden üstün olan niteliklerinden biridir.

Kalıplama Kolaylığı: Çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırmaktadır.

Yüzey Uygulamaları: Kompozit ürünlerde kullanılan polyester reçine, özel pigment katkıları ile renklendirilmek suretiyle, amaca uygun kendinden renkli olarak da üretilebilir.

Şeffaflık Özelliği: Cam kadar ışık geçirgenliğine sahip olabilir. Tam şeffaf olması nedeni ile ışığı yayması sayesinde, diffüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantaj sağlar.

Beton Yüzeylere Uygulama İmkânı: Beton yüzeylere, kompozitler mükemmel yapışır. Özellikle, betonun gözenekli olması nedeniyle, kompozit'i oluşturan ana malzemelerden polyester reçinenin beton gözeneklerinden sızması ve beton kütle içinde sertleşmesinden dolayı mükemmel bir yapışma sağlanır.

Ahşap Yüzeylere Uygulama İmkânı: Kompozitler ahşap yüzeylere yapışma özelliğine sahiptir. Ancak ahşabın kuru olması ve stiren ihtiva eden polyester reçine ile iyi bir şekilde emdirilmesi gerekir.

Demir Yüzeylere Uygulama İmkânı: Demir yüzeydeki pas ve yağ kalıntıları temizlendikten sonra kompozitlerle kaplanabilir. Bu sayede demir ve çelik yüzeyler, kompozitlerle kaplanarak korozyon etkilerinden korunmaktadır.

Yanmazlık Özelliği: Kompozitlerin alev dayanımı, kullanılan polyesterin özelliğine bağlıdır. Alev dayanım özelliğinin arandığı yerlerde "Alev dayanımlı" polyester kullanılmalıdır.

Kompozitler Sıcaklıktan Etkilenmez: Kompozit ürünler, termoset plastikler grubundan polyester reçineler ile yapıldığı için yumuşamaz ve şekil değiştirmez. Isı dayanıklılığı kullanılan polyester reçinenin cinsine bağlıdır.

Kompozitler İçine Farklı Malzemeler Gömülebilir: Kompozitlerin içine demir, ahşap, halat, tel, mukavva, poliüretan sert köpük gibi malzemeler gömülerek mekanik özellikleri farklılaştırılabilir.

Tamir Edilebilirlik Özelliği: Tamir izlerinin görünmemesi için onarımın bir kalıp üzerinde yapılması ya da onarımdan sonra zımpara veya boya yapılması gerekir.

Kompozitler Kesilip Delinebilir: Kompozitler, tahta gibi kolayca kesilir, delinir, zımparalanır. Bu amaçla kullanılan aletlerin sert çelik veya elmas uçlu olması halinde daha iyi sonuç alınmaktadır.

### 3.2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

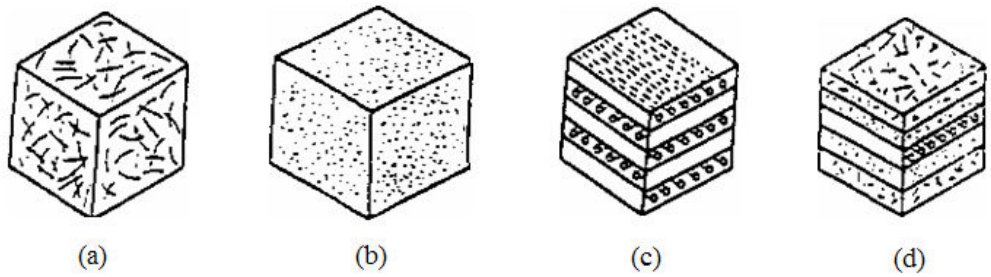
Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte yapıdaki malzemelerin formuna göre sınıflandıracak olursak;

a. Elyaf takviyeli kompozitler,

b. Parçacık takviyeli kompozitler,

c. Tabakalı kompozitler,

d. Karma (hibrid) kompozitler olarak sınıflandırmak mümkündür (Şekil 3.18.).




**Şekil 3.18.** Kompozitlerin sınıflandırılması; (a) elyaf takviyeli, (b) parçacık takviyeli, (c) tabakalı, (d) karma (hibrid)

***a. Elyaf Takviyeli Kompozitler***

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı

arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorbsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

***b. Parçacık Takviyeli Kompozitler***

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

***c. Tabakalı Kompozitler***

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit tipidir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. Ayrıca uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

***d. Karma (Hibrid) Kompozitler***

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması mümkündür. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır. Ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyaflı kompozitden daha yüksek olmaktadır.

### 3.2.3. Kompozit malzeme yapısındaki temel maddeler

#### 3.2.3.1. Matris malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir (Milton, 2004).

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır. Ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçinelerdir. Yüksek mukavemet göstermeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Matris iyileştirmesi çalışmaları özellikle yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun ve düşük nem duyarlılığına sahip yapıların üretilmesi doğrultusundadır.

#### 3.2.3.1.1. Epoksi reçine matrisler

Epoksiler iki ya da daha fazla epoksit içeren bileşenden oluşmaktadır. Polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımı 150–200 °C'ye kadar arttırılabilir. Ayrıca büzülmesi %2'den azdır.

Epoksi reçine matrislerin kopma mukavemetleri yüksek olup elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar ve yüksek aşınma direncine sahiptirler. Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir. Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler. Bununla birlikte, polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdır. Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur. Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilme nedeniyle, uçak yapımında da yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

#### 3.2.3.1.2. Polyester reçine matrisler

Polyester matrisler dibazik asitlerin, dihidrik alkoller (glikol) ya da dihidrik fenollerle karışımının yoğuşması ile şekil alırlar. Polyesterlerin ana tipleri polyester bileşeninin doymuş asitle ya da alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi arttırılabilir.

Polyester reçine matrisler, takviyelerin nemini dışarı kolayca atabilmesini sağlayan düşük viskoziteye, düşük maliyete ve iyi çevresel dayanıma sahiptir.

#### 3.2.3.1.3. Vinilester reçine matrisler

Vinilester reçine matrisler polyester reçine matrislere benzemektedirler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Polyesterle glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler. Korozif ortamlardaki kullanımlar için donatılı plastik bileşenlerin üretiminde yararlanılmaktadır. Bu polimerler kimyasal dayanım gerektiren kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında kullanılmaktadır.

#### 3.2.3.1.4. Fenolik reçine matrisler

Yaklaşık yüz yıldır kullanılmaktadır. Sertleşme, ısı enerjisiyle gerçekleşmekte iken laminant ve kalıplama için basınç gerekmektedir. Fenolik reçinelerin ısı stabiliteleri, elektrik özellikleri, suya ve alkaliler dışındaki kimyasal maddelere dayanımları çok iyidir. Bu reçineler 300 °C'ye kadar sürekli, asbest elyaflarıyla donatılmaları halinde ise kısa süreli olarak 1000 °C'ye kadar kullanılabilmektedirler.

#### 3.2.3.1.5. Silikon reçineler

Silikon reçineler, diğerlerinden farklı olarak yapılarında karbon yerine inorganik esaslı silikonlar bulunan malzemelerdir. Mekanik ve elektriksel özelliklerini çok az değişikliklerle 300 °C'ye kadar koruyabilen silikon esaslı reçinelerin kullanımları, mekanik dayanımlarının diğer reçinelere göre daha düşük ve maliyetinin de genelde daha yüksek olması nedeniyle kısıtlıdır. Süpersonik arabalarda kullanılırlar.

#### 3.2.3.1.6. Metal matrisler

Kompoziti sürekli bir arada tutan ve bu bütünlük içinde elyafla birlikte malzemenin özelliklerini belirleyen matris malzemesi olarak metaller, taşıyıcılık açısından, özellikle polimer matris malzemesine kıyasla yüksek dayanıma sahiptirler. Üretimleri zor olup maliyeti yüksek olmasına karşın, metal matris malzemesi kompozitin tokluğunu önemli ölçüde arttırmakta ve yüksek sıcaklık etkisindeki uygulamalara olanak vermektedir. Metallerin matris malzemesi olarak kullanılması yine metal olan birçok ince elyafların üretimiyle başlamıştır. Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak bakır, alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi metaller başta gelmektedir. Matris malzemesi erimiş halde, moleküler yapıda, levha veya ince tabaka şeklinde olabilmekte ve kullanılan üretim teknolojisine bağlı olarak dökme, karıştırma, presleme, elektroliz yoluyla kaplama, haddeleme yöntemleriyle elyaflarla birleştirilmektedir. Bu birleşmede kullanılacak yüksek dayanımlı elyaf tel ve kılların zedelenmemesi ve tahrip olmaması sağlanmalıdır. Metal matris içinde en kolay kullanılabilen elyaflar, bor ve borik elyaftır. Bu kompozit malzeme 300 °C sıcaklığa kadar oda sıcaklığında özelliğini koruyabilmektedir. Bu kompozitin üretimi 450–500 °C sıcaklıkta sıcak presleme yöntemiyle yapılmaktadır.

### 3.2.3.2. Elyaf çeşitleri ve özellikleri

Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyaflar teknolojide kullanılan en eski elyaf tipleridir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan diğer elyaf tipleridir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütlesel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca üstün mikro yapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri, boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması ve elastisite modülünün çok yüksek olması elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemesi olmasını beraberinde getirmektedir (Ashby ve ark., 1998).

#### 3.2.3.2.1. Cam elyaflar

Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir. Doğada genellikle oksijenle birlikte silis ($SiO_2$) şeklinde bulunur. Camın elde edilmesi için silis kumu, katkı malzemelerle birlikte kuru halde iken 1260 °C civarına kadar ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir. Cam elyafların bazı özellikleri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1. Birim ağırlık başına düşen çekme mukavemeti çelikten yüksektir.
2. Isıl dirençleri düşük olduğu için yanmazlar ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
3. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
4. Nem absorbe etme özellikleri yoktur. Ancak cam elyaflı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
5. Elektriksel yalıtımın önemli olduğu uygulamalarda güvenle kullanılmaktadır.

Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur. Bunlar;

***a. A (Alkali) Camı:*** Yüksek oranda alkali içerir. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek olup en yaygın cam tipidir.

***b. C (Korozyon) Camı:*** Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

***c. E (Elektrik) Camı:*** Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

***d. S (Mukavemet) Camı:*** Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle birlikte kullanılıyor olup mekanik özellikleri ve bileşimleri ise Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri

| ***Özellikler*** | ***Cam Tipi*** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **A** | **C** | **E** | **S** |
| Özgül ağırlık (gr/cm$^3$) | 2,50 | 2,49 | 2,54 | 2,48 |
| Elastiklik modülü (GPa) | - | 69,0 | 72,4 | 85,5 |
| Çekme mukavemeti (MPa) | 3033 | 3033 | 3448 | 4585 |
| Isıl genleşme katsayısı | 8,6 | 7,2 | 5,0 | 5,6 |
| Yumuşama sıcaklığı (°C) | 727 | 749 | 841 | 970 |
| ***Katkı Malzemeleri (%)*** | | | | |
| $SiO_2$ | 72 | 64,4 | 52,4 | 64,4 |
| $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ | 0,6 | 4,1 | 14,4 | 25 |
| CaO | 10 | 13,4 | 17,2 | - |
| MgO | 2,5 | 3,3 | 4,6 | 10,3 |
| $Na_2O$, $K_2O$ | 14,2 | 9,6 | 0,8 | 0,3 |
| $B_2O_3$ | - | 4,7 | 10,6 | - |
| BaO | - | 0,9 | - | - |

### 3.2.3.2.2. Bor elyaflar

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle

tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır. Bor-Tungsten elyaflar, sıcak Tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür ($BC1_3$) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda (0,05 mm ila 0,2 mm) üretilebilirler. Tungsten çekirdek ise daima 0,01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastiklik modülüne sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ila 3447 MPa arasındadır. Elastite modülü ise 400 GPa' dır. Bu değer S camının elastisite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür ($B_4C$) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040 °C civarındadır.

#### 3.2.3.2.3. Silisyum karbür elyaflar

Bor gibi Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0,1 mm ila 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370 °C'de mukavemetinin sadece %30'unu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640 °C'dir. Bu elyaflar genellikle Titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında Titanyum, Alüminyum ve Vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak Silisyum karbür elyaflar Bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür.

#### 3.2.3.2.4. Alumina elyaflar

Alumina, Alüminyum Oksitin ($A1_2O_3$) kısaltılmış hali olarak tanımlanabilir. Elyaf formundaki alumina, 0,02 mm çapındaki alumina flamanın Silisyum dioksit ($SiO_2$) kaplanması ile elde edilir. Alumina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir. Ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alumina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ila 2413 MPa arasındadır. Yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

### 3.2.3.2.5. Grafit (karbon) elyaflar

Karbon, yoğunluğu 2,268 gr/cm$^3$ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hem de grafit elyaflar aynı esaslı malzemeden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000–3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler. Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN esaslı elyaflar 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift esaslı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN esaslı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Bu elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca alüminyum ve magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılır.

### 3.2.3.2.6. Aramid elyaflar

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında ise altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmıştır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf ekseni doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.

### 3.2.4. Kompozit malzeme üretim yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıda açıklanmıştır.

#### 3.2.4.1. Elle yatırma

Dokuma veya kırpılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılır sonrasında da sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce, kalıplar temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok polyester ve epoksi ile birlikte vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.

#### 3.2.4.2. Püskürtme

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırpılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

#### 3.2.4.3. Elyaf sarma

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler arasında silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri ve dairesel basınç tankları sayılabilir.

### 3.2.4.4. Reçine transfer kalıplama (RTM)

Bu kompozit üretim yöntemi, elle yatırma sistemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi, çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğunu dolduracak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaflar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir.

Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 ºC'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. CONCORDE uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır.

### 3.2.4.5. Hazır kalıplama (SMC, BMC)

Hazır kalıplama bünyesinde cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin (SMC, BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karışık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları; kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanma gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır. Bu yöntemde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır

#### 3.2.4.5.1. Hazır kalıplama pestili (SMC)

SMC takviye malzemesi olarak kırpılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25–50 mm kırpılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25–30'u oranında kullanılır. Genellikle 1 m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilir.

#### 3.2.4.5.2. Hazır kalıplama hamuru (BMC)

BMC takviye malzemesi olarak kırpılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir.

Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları;

- Çok geniş tasarım esnekliği,
- Düzgün yüzey,
- Kolayca laklanabilme, boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi,
- Geri dönüştürülebilme ve hazırlığında geri dönüşümlü malzeme kullanabilme
- Metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı,
- Yüksek alev dayanımı,
- Sıcaklık dayanımı,
- Soğukta kırılgan olmama, enjeksiyon kalıplama.

Bu yöntem RTM'ye benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımının kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasındadır. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar birçok ürün bu yöntemle üretilebilmektedir.

### 3.2.4.6. Vakum bağlaması

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandöviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası, en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de kullanılmaktadır.

### 3.2.4.7. Otoklav bağlaması

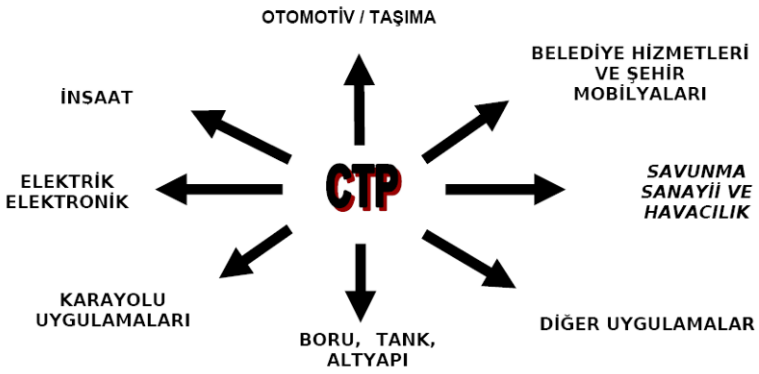
Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması, malzemenin yüksek ısı ve basınca maruz kalmasıyla sağlanabilir. Vakum bağlaması yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dış basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için otoklav bağlaması yönteminde de uygulanan ve kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir. Otoklav bağlaması yönteminde basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği bir basınçlı kap kullanılmaktadır. Vakum bağlaması yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav tankı kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.

### 3.2.5. Kompozit malzeme kullanım alanları

Ülkemizde 1960'lı yılların başından itibaren sıvı depolarında, çatı levhalarında, küçük boyda deniz teknelerinin yapımında cam elyaf kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan "ANADOL"un kaportası da bu malzemeden üretilmiştir.

Cam elyafla takviye edilmiş sentetik reçine matrisli malzemeler için dilimizde "Cam Takviyeli Plastik (CTP)" adı yerleşmiştir. Hammaddesinin, know-how'ının, kalıplarının ve üreticilerinin yerli olmasından dolayı CTP'nin kullanımı giderek artış göstermiştir.

Üretilecek malzeme niteliğine uygun cam elyafı ve reçine bir araya getirilerek uygun üretim metodu ve kalıp kullanılmak suretiyle kolayca şekillendirilebildiği için Şekil 3.19.'da detaylandırılan birçok alanda kullanılmaktadır.




**Şekil 3.19.** CTP kullanım alanları

***İnşaat Sektöründe Uygulama Örnekleri:***

CTP malzeme ile üretilmiş kaset beton kalıpları, kiremit görünümlü çatı kaplamaları ve bina alınlıkları, inşaat sektöründe en yaygın CTP uygulamaları arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, cephe kaplama panelleri, CTP malzeme uygulama alanlarının en önemlilerinden biri olup, tek cidarlı veya çift cidarlı olarak da üretilmektedir. Ayrıca, araya izolasyon malzemesi de konularak, ısı yalıtımı da sağlanabilmektedir. Cephe kaplama panelleri ile bina cepheleri korunduğu gibi, betonu korumak amacı ile köprüler de CTP panellerle kaplanmakta, metro istasyonlarının iç duvarları da dekore edilebilmektedir. Kapalı ve açık mekânlarda, CTP giydirme panelleri, özellikle eski yapıların restorasyonunda önem kazanmaktadır. Ayrıca, üstü kapalı mekânlar oluşturmak üzere, gerek ışık geçirgen, gerek opak renklerde CTP malzeme çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuda en önemli uygulama, kapalı yüzme ve spor salonlarının ışık geçirgen çatı kaplamalarının yapımıdır. Ayrıca, yüzme havuzunun kendisi de tek parçalı veya çok parçalı olarak CTP malzemeden yapılmaktadır. Aydınlık bir kapalı mekân oluşturmak için CTP ideal bir malzeme olup, hal gibi kalabalık mekânlarda aydınlık bir ortam yaratılabilmektedir. Bir diğer önemli konu, yaya yürüme yollarının tavan ve yan cidar panellerinin CTP malzeme ile yapılmasıdır. Bu panellerin üretiminde de çift cidarlı ve ısı izolasyonlu paneller kullanılabilir.



***Otomotiv ve Nakliye Sektöründe Uygulama Örnekleri:***

Komple veya kısmen yapılan otomobil gövde parçalarının yanı sıra frigorifik kamyon kasaları ile minibüs yükseltilmiş tavanları önemli bir kullanım alanını oluşturmaktadır. Ayrıca makas, amortisör yayları ve balatalar da artık CTP malzeme kullanılarak yapılmaktadır. Bir başka uygulama alanı olarak, özellikle demiryolu ve metro vagonlarının gövde parçaları CTP'den üretilmekte ve vagon tamiratı, modüler CTP parçalar kullanılarak kolaylıkla yapılabilmektedir. Özel bir uygulama örneği, tamamen CTP'den, elyaf sarma metodu ile monoblok olarak yapılmış olan bir vagon gövdesidir. Benzer şekilde, tramvay vagonları da yapılabilmektedir. Otomotiv sektöründe bir diğer önemli uygulama, otobüs ve demiryolu vagonları gibi toplu taşıma araçlarında, yolcu güvenliğini sağlayan ve CTP malzemeden yapılmış profillerden yapılmış tutamaklar ve havalandırma kanallarıdır.






***Elektrik Sektöründe Uygulama Örnekleri:***

CTP malzemenin mükemmel bir elektrik yalıtkanı olması, elektrik ve elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılmasını sağlayan en önemli faktördür. Gerek aydınlatma, gerek enerji nakil hatlarında CTP direkler başlıca uygulama alanlarıdır. Elektrik sektöründe bir diğer uygulama örneği, yeraltı kablolarının döşenmesi sırasında kullanılan CTP kılavuz çubuklarıdır. İç mekânda ve dış mekânda kullanılan elektrik armatürleri de CTP malzemeden yapılmaktadır. Elektrik sektöründe CTP kullanım alanları arasına son yıllarda katılan bir diğer önemli uygulama, rüzgâr enerjisinden elektrik üretimini sağlayan rüzgâr jeneratörleridir. Bu jeneratörlerde hem taşıyıcı direk hem de pervane kanatları CTP olabilmektedir.






***Savunma Sanayi ve Havacılık Sektörü Uygulamaları:***

Özellikle hücumbotlar ve mayın tarama gemilerinin gövdeleri CTP'den yapılmakta, manyetik alan oluşturmaması sayesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Roketatar gövdeleri de CTP'den yapılmaktadır. Havan toplarının sahradaki birliklere havadan gönderilmesinde kullanılan sandıklar da CTP malzeme kullanılarak yapılmaktadır. Bu sandıklar, paraşüt ile uçaktan atılmakta ve ihtiyacı olan birliklere lojistik destek sağlanmasında yararlı olmaktadır. Askeri uçakların birçok parçası CTP'den yapılmaktadır. Bunun yanı sıra güdümlü füzeler ve roketlerin gövdeleri ile bazı keşif uçaklarının gövdesi tamamen CTP malzemeden yapılmaktadır.






***Köprüler:***

CTP ile yapılan uygulamalar arasında köprülerde yer almaktadır. Bu konuda değişik üretim teknikleri ile yapılan birkaç köprü örneği verilecek olursa; Hollanda'da Harlingen limanında kullanılmak üzere 1997 yılında üretilmiş olan 16 metre uzunluğundaki yolcu köprüsü soldaki fotoğrafta görülmektedir. Gemi ile iskele arasında yolcu naklini sağlayan bu köprü, 2 metre enindedir ve toplam 3 ton ağırlığında olup el yatırması metodu kullanılarak yapılmıştır. 30 ton yük altında yalnızca birkaç santim sehim vermektedir. Bağlantı için kullanılan somun ve cıvatalar dışında tamamen CTP profillerden yapılan ortadaki fotoğrafta görülen köprü, Danimarka'nın Kolding kentinde, tren yolu üzerinden 520 m'lik bir aşık aralığı ile geçiyor. Sağdaki fotoğraftaki örnekte ise köprü taban tabliyeleri görülmektedir. Yüklerin homojen olarak dağıtılabilmesi ve rijitliğin sağlanabilmesi amacı ile sandviç konstrüksiyon tekniği uygulanmıştır.





***Modüler Paneller:***

CTP malzemenin önemli bir kullanım alanını da bağımsız panellerden oluşan prefabrike konutlar oluşturmaktadır. Bu uygulamanın avantajı, hazır modüllerin, somun cıvata ile kısa sürede birleştirilerek monte edilebilmesidir. Böylece, modüler yapı çok kısa bir süre sonunda kullanıma hazır hale gelebilmektedir. Depolama amaçlı barakalar da modüler olarak CTP'den yapılabilir. Ayrıca, istenildiği takdirde, paneller çift cidarlı ve ısı izolasyonlu olarak üretilebildiğinden yapılan depo frigorifik niteliğe sahip olabilir.





***CTP Profiller:***

CTP profillerin önem kazandığı bir diğer uygulamada, CTP profiller, endüstriyel inşaatların taşıyıcısı olarak kullanılmaktadır. Bu profillerle yapılan yüksek gerilim hattı direkleri, manyetik alan taşımaması nedeni ile önem taşımaktadır. CTP profiller, dış mekânda kullanıldığı gibi iç mekânlarda da yer döşemesi olarak kullanılmaktadır.






***Kapılar:***

CTP ile ahşap taklidi kapılar da yapılabilmektedir. Böylece hem sağlam bir kapı elde edilmekte hem de ağaçlar korunarak doğaya zarar verilmemektedir.





***Karayollarında Kullanım:***

CTP malzeme, şehir içi ve şehir dışı karayollarında kenar dikmesi, trafik işaret levhaları, ışık perdeleri, baş üstü levhaları ve özellikle şehir içinden geçen otoyolların kenarlarına yerleştirilerek gürültü kirliliğini önleyen ses yalıtım duvarları olarak kullanılmaktadır.




***Diğer Kullanım Yerleri:***

Bunların dışında, belediye ve şehircilik hizmetleri ile endüstriyel alanlarda, CTP için sayısız kullanım yeri bulunmaktadır. Su taşıma, isale ve kanalizasyon hatlarında kullanılan borular, binlerce metreküp hacimli büyük modüler su depoları, üstü kapalı yaya geçitlerinin kaplama panelleri, şehir içi ve parklarda kullanılan çöp kutuları, yüzme havuzları, otobüs durakları, büfeler, iletişim panoları, pazar yerleri ve haller, yaya köprüleri, köprü korkulukları, iskeleler, şantiye ve afet barınakları, toplu konutlar için saniter malzemeler, arıtma tesisleri, korozif ortamlardaki yürüme platformları, stadyum, açık hava tiyatrosu gibi toplu oturma birimleri, çocuk bahçesi ve parklar, plajlar ve tatil beldelerinde kullanılan aksesuarlar, telefon kabinleri, bunlar arasında yer almaktadır.

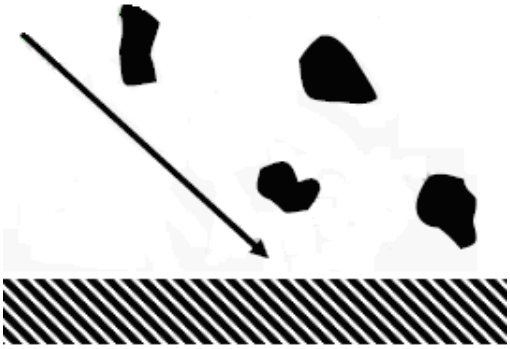
# 4. MATERYAL VE METOT

## 4.1. Test Metodu

Erozyon aşınma testleri için yaygın olarak katı parçacık, sıvı–çamur, santrifüj hızlandırıcı, dönen kol ve sirkülasyon metotları kullanılmaktadır. Bu metotlarda parçacıklara hava ya da sıvı akıntısında ivme kazandırılması ve çarpma hızını elde etmek için sirküler hareketin kullanılması amaçlanmaktadır.

Yapılan bu deneysel çalışmada kuru ve basınçlı hava yardımıyla aşındırıcı partiküllerin deney numunesi yüzeyine çarptırıldığı test metodu kullanılmıştır.

Bu metoda ait şematik gösterim ise Şekil 4.1.'de verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Erozyon aşınmasında kullanılan katı parçacık metodu

Çoğunlukla jet vuruş ya da gaz akış metodu adı verilen bu test metodu, parçacıkların, gaz ya da sıvı ile hareket ettirilerek hedefe çarptırılması ile elde edilmektedir.

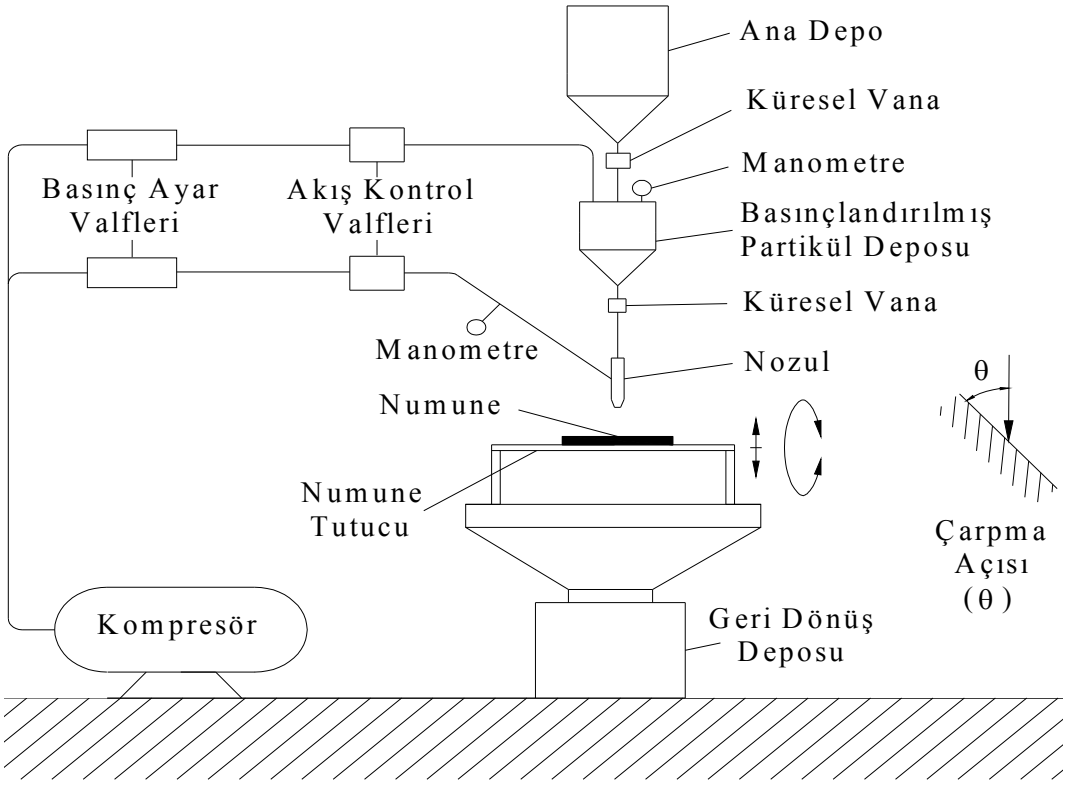
Bu test metodunda kullanılan numune geometrisinin basit ve küçük olması aşınma ölçümlerinde boyutsal değişim ve ağırlık azalmasının kolaylıkla incelenmesine imkân vermektedir (ASTM G76–95 2000).

## 4.2. Deney Tesisatı

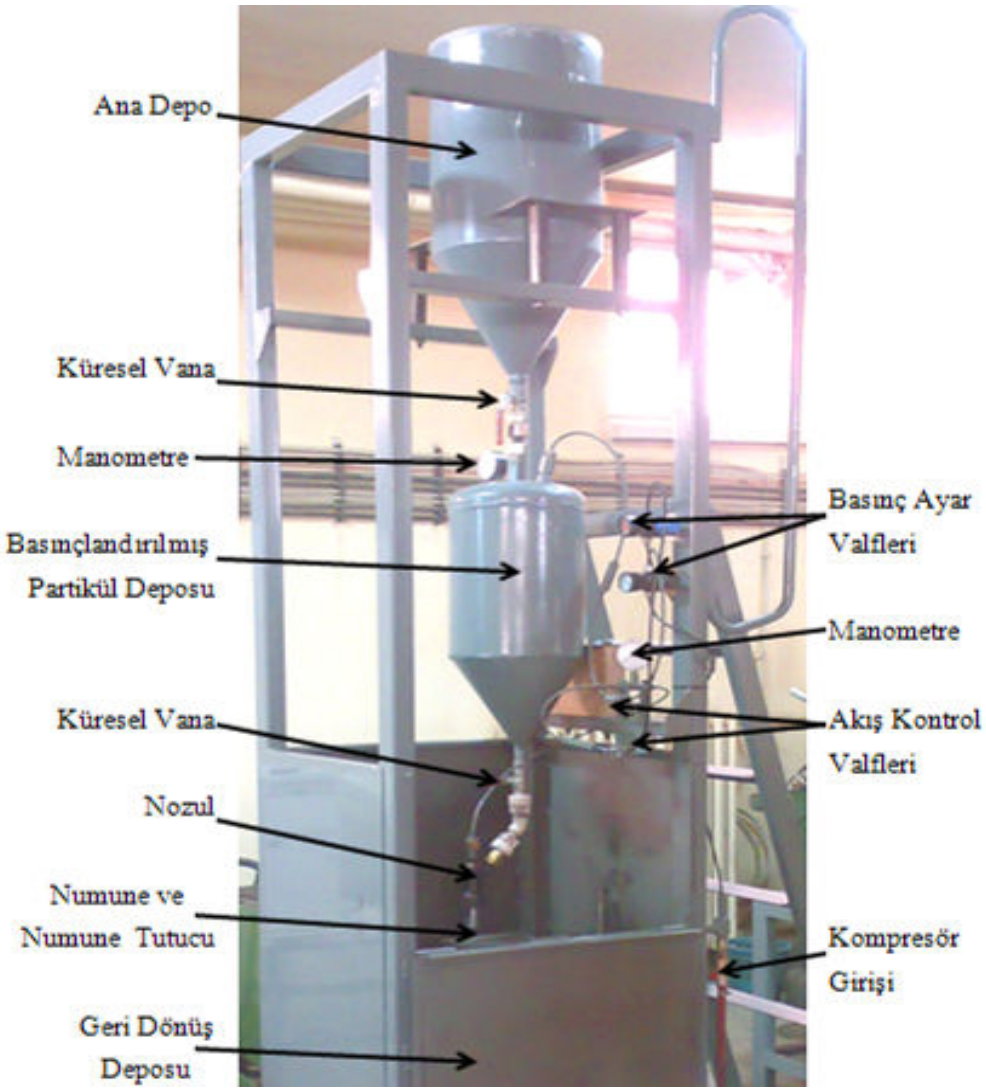
Deney tesisatının tasarımında öncelikli olarak değerlendirilen kriter, erozyon aşınma davranışının incelendiği malzeme türleri olup bu çalışma kapsamında kompozit malzemeler başta olmak üzere çelik ve sert kaplamaların da aşınma olaylarını inceleyebilecek yeterliliğe sahip olacak şekilde bir deney seti kurulması amaçlanmıştır.

Erozyon aşındırma sonuçlarının daha geniş bir aralıkta değerlendirilebilmesi için cihazın belli bir aşındırma gücüne sahip olmasının yanında bu gücün şiddetini kontrol edebilme imkânı da önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilmiştir.

Öncelikli olarak bu özellikleri karşılamak amacıyla Şekil 4.2.'deki şematik ve fotoğraf görüntüsü verilen erozyon aşınması deney tesisatı özel olarak tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir.




(a)




(b)

**Şekil 4.2.** Erozyon aşınması deney tesisatı; (a) şematik görünümü, (b) fotoğraf görünümü

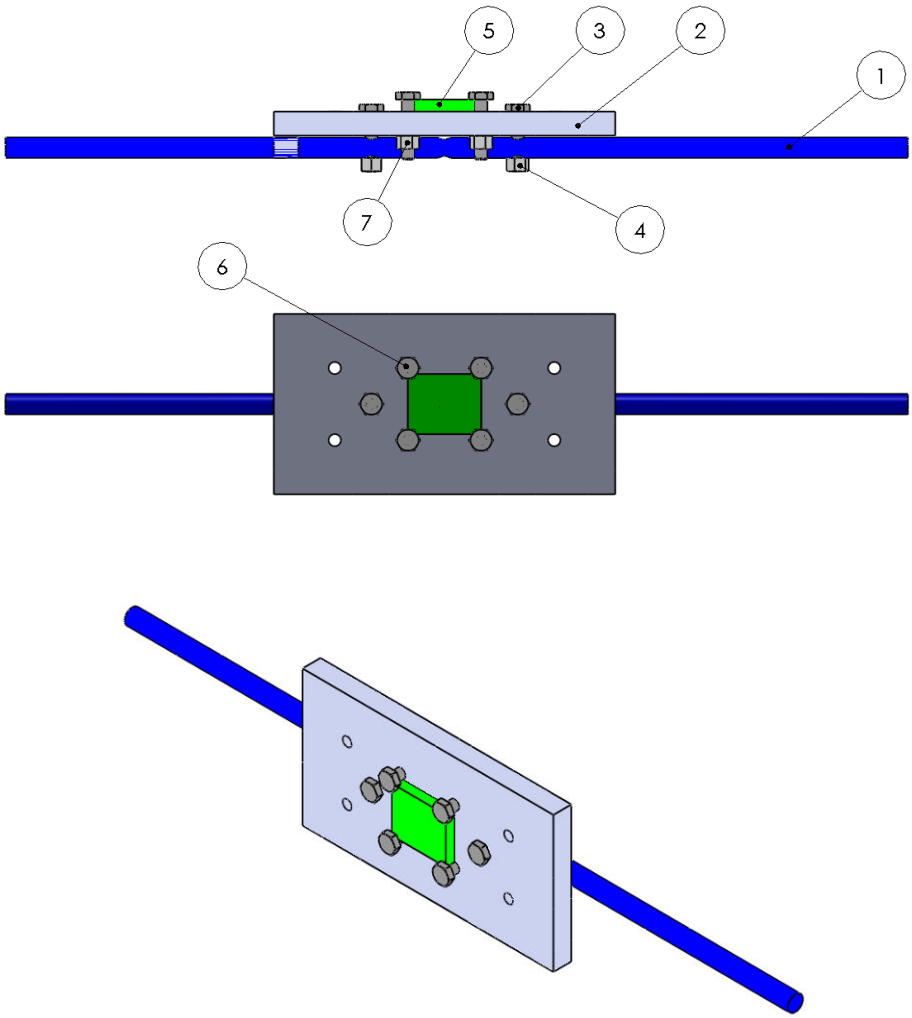
Deney cihazı kolayca montaj ve demontaj yapılabilmesine imkân verecek şekilde imal edilmiştir. Bu durum kurulum ve kontrol aşamalarında çıkan problemlerin sebeplerini araştırmaya imkan vererek yerinde müdahale edebilme ve gerektiğinde ekipman değişikliğine gidebilme fırsatı vermiştir.

Tesis edilen ana parçaların birbirleri ile olan bağlantılarında kaynaklı birleştirmeler yerine boru bağlantılarına pafta ve kılavuz dişleri açılarak nipel, redüksiyon ve manşonlar kullanmak sureti ile bağlantılar sağlanmıştır. Aşındırıcı partikül ile hava karışımının istenen sabit çıkış hızı ve sabit debide olması için karışım oranlarını kontrol altında tutmak amacıyla cihazın çeşitli noktalarına basınç ayar valfleri, akış kontrol valfleri ve manometreler yerleştirilmiştir.

## 4.3. Numune Tutucu

Yaptığımız deneysel çalışmalarda, deney numunelerinin $30^o$, $60^o$ ve $90^o$ lik çarpma açılarını kontrollü bir şekilde ayarlayabilmek ve nozul ile deney numunesi arasındaki mesafeyi de net bir şekilde belirleyebilmek için özel bir numune tutucu aparat tasarlanmıştır.

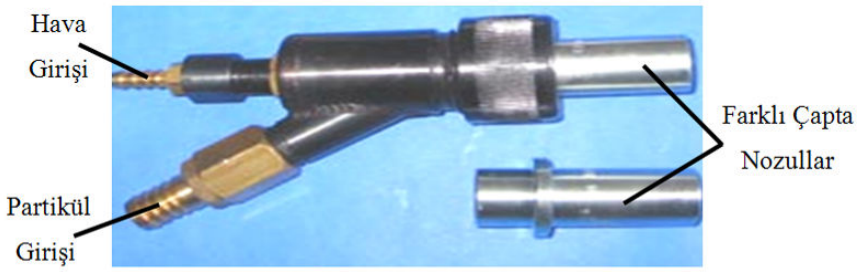
Deney tesisatında kullanılan numune tutucunun şematik resmi Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Çarpma açısı ayar mili (1) üzerine numune sabitleyici tabla (2) iki adet altı köşe başlı cıvata (3) ve somun (4) ile tutturulmuştur. Numune sabitleyici tabla üzerine ise numune (5) dört adet altı köşe başlı cıvata (6) ve bu cıvataların somunları (7) ile bağlanmış ve deney esnasında hareket etmesi engellenmiştir.




**Şekil 4.3.** Numune tutucu

## 4.4. Nozul Çapı Seçimi

Farklı uygulamalar için farklı boyutlardaki nozullar kullanılıyor olup pratik testlerde 1–50 mm çapa sahip nozullar tercih edilmektedir. Küçük bir nozul, numune üzerinde küçük bir aşınma alanı oluşturur ancak daha az sıvı ve aşındırıcı parçacık oranları gerektirir. Daha büyük bir nozul ise iri taneli seramik malzemeler ya da büyük ölçekli heterojen mikro yapıları olan test materyalleri için daha uygundur ancak daha fazla sıvı ve aşındırıcı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu değerlendirmelerden yola çıkarak ve deneysel çalışmamızda kullanılacak olan aşındırıcı partikül teminini de dikkate alarak deneylerde 6 mm çapa sahip bir nozul kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 4.4.'de deneylerde kullanılan nozulun yerleştirildiği kumlama tabancasının fotoğraf görüntüsü verilmiştir.

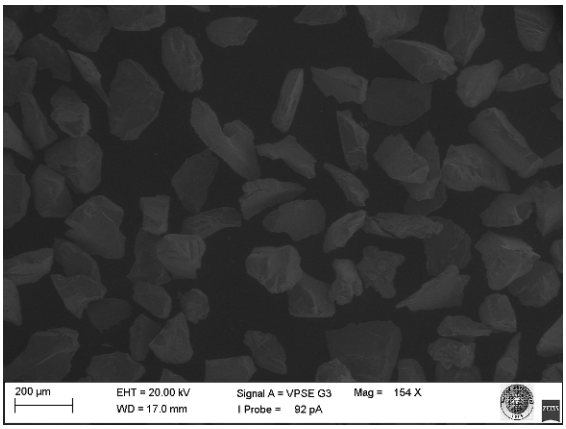



**Şekil 4.4.** Deneylerde kullanılan kumlama tabancasının fotoğraf görüntüsü

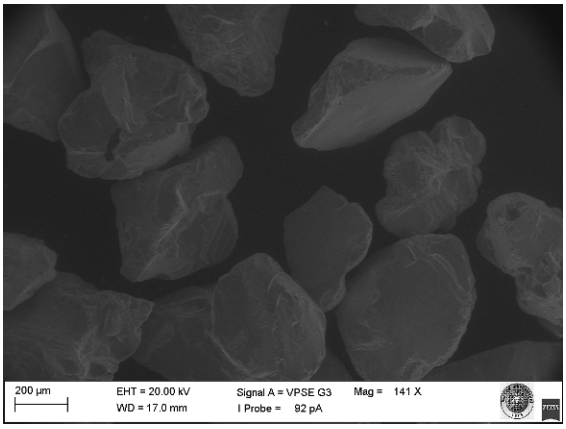
## 4.5. Aşındırıcı Partikül Özellikleri

Deneylerde ≈200 μm ve ≈400 μm ortalama çapa sahip açısal geometrik yapıdaki alümina aşındırıcılar kullanılmış olup partiküllerin SEM görünüşleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da, kimyasal bileşimleri ise Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Deney numunelerinin yüzeylerinde ortaya çıkan deformasyonla birlikte aşındırıcı partiküller dönüşüme uğramakta ve partiküllerde de kırılmalar meydana gelmektedir. Bu durumun deney sonuçlarına olumsuz bir etki oluşturmaması için EK–1 ve EK–2'deki kullanılabilirlik özelliklerine göre deneylerdeki aşındırıcı partiküller değiştirilmiştir.




**Şekil 4.5.** ≈200 µm ortalama çapa sahip aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüsü




**Şekil 4.6.** ≈400 µm ortalama çapa sahip aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüsü

**Çizelge 4.1.** Aşındırıcı partiküllerin (Alümina) kimyasal bileşimi ve özellikleri

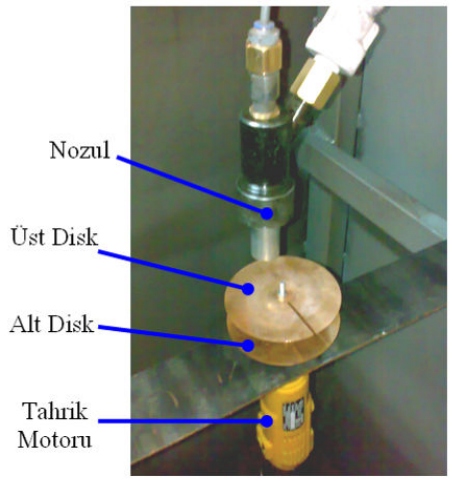
| **Element** | **min.** | **max.** |
|---|---|---|
| $Al_2O_3$ (%) | 94,5 | 95,5 |
| $SiO_2$ (%) | 0,5 | 0,8 |
| $Fe_2O_3$ (%) | 0,2 | 0,4 |
| $TiO_2$ (%) | 2,6 | 3,2 |
| CaO + MgO (%) | 0,2 | 0,4 |

| **Alümina Özellikleri** | |
|---|---|
| Yoğunluk ($g/cm^3$) | 3,94 |
| Sertlik (Mohs) | 9 |
| Erime Noktası (°C) | 1950 |

## 4.6. Çarpma Hızının Tespiti

Erozyon aşınmasında önemli bir yere sahip olan aşındırıcı partikül çarpma hızının belirlenmesinde yüksek hızda fotoğraflama (Finnie ve ark., 1967), lazer doppler anemometresi (Barkalow ve ark., 1979) ve çift disk metodu (Ruff ve Ives, 1975) standartça kabul gören hız ölçüm teknikleridir. Bunlar arasında daha ekonomik ve basit oluşu sebebi ile en yaygın kullanılanı çift disk metodudur ve deneysel çalışmada bu metot kullanılmıştır.

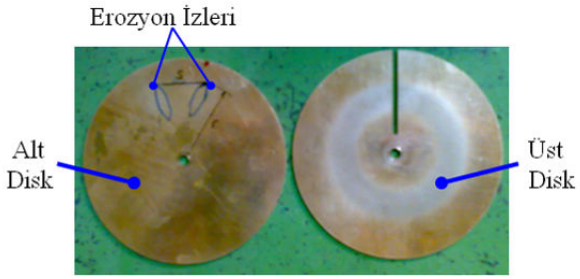
Çift disk metodu Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi nozulun altında dönen ortak bir şafta bağlanmış iki metal diskten ibarettir. Bu disklerin malzemesi aşınma izlerinin net görülebilmesi için fosfor bronzundan oluşmaktadır. Ayrıca bu diskler tahrik motoruna bağlanmış olup disklerin dönmesi bu motor vasıtasıyla sağlanmaktadır.



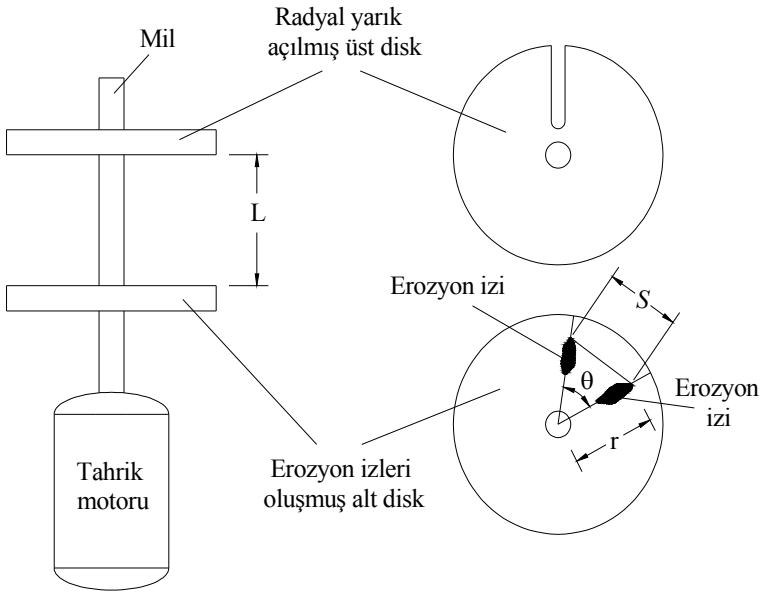

**Şekil 4.7.** Çift disk metodu

Üstteki diskin üzerinde bulunan radyal yarıktan geçen partiküller alttaki disk üzerinde erozyon izi oluşturmuş ve bu erozyon izlerinden birisi bilinen sabit bir hızda diskler dönerken elde edilmiş olup diğer iz ise disklerin durgun halinde iken alttaki disk üzerinde oluşturulmuştur.

Şekil 4.8. ise aşındırıcı partikül çarpma hızının tespitinden sonraki disklerin fotoğraf ve şematik gösterimini temsil etmektedir.




(a)




(b)

**Şekil 4.8.** Disklerdeki erozyon izleri; (a) fotoğraf görünümü, (b) şematik görünümü

Diskler üzerindeki erozyon izleri arasındaki mesafe (*S*);

$$S = \theta * r \tag{4.1}$$

ile bulunmaktadır. (4.1) eşitliğindeki θ; açısal yer değişimini, r ise erozyon izlerinin ortalama yarıçapını ifade etmektedir.

Açısal yer değişimi ifadesi yerine yazılırsa;

$$S = \{ \omega * t \} * r = \{ [ ( 2 * \pi * n ) / 60 ] * ( L / \upsilon ) \} * r \tag{4.2}$$

eşitliği elde edilmektedir. Buradaki ω; açısal hızı, t; aşındırıcı partiküllerin üst diskten geçip alt diske ulaşması için geçen zamanı, n; disklerin devir sayısını, L; diskler arasındaki mesafeyi ve υ ise aşındırıcı partiküllerin çarpma hızını tanımlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmadaki basınç değerleri ve bunlara karşılık gelen ortalama çarpma hızları Çizelge 4.2.'de verilmiş olup deneylerde ≈ 23, 34 ve 53 m/s olmak üzere üç farklı aşındırıcı partikül çarpma hızı kullanılmıştır.

**Çizelge 4.2.** Çeşitli basınç değerleri için ortalama çarpma hızları

| Basınç (**bar**) | Dönme Hızı (**n**), (rpm) | Diskler Arası Mesafe (**L**), (m) | İz Yarıçapı (**r**), (m) | Erozyon İzleri Arası Mesafe (***S***), (m) | Aşındırıcı Partikül Hızı (**υ**), (m/s) | Ortalama Aşındırıcı Partikül Hızı (**υ**), (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10000 | $2.10^{-2}$ | $3,83.10^{-2}$ | $3,54.10^{-2}$ | 22,65 | ≈ **23** |
| | | | $3,68.10^{-2}$ | $3,41.10^{-2}$ | 22,60 | |
| | | | $3,85.10^{-2}$ | $3,59.10^{-2}$ | 22,46 | |
| | | | $3,97.10^{-2}$ | $3,68.10^{-2}$ | 22,59 | |
| 2 | 10000 | $2.10^{-2}$ | $3,87.10^{-2}$ | $2,43.10^{-2}$ | 33,35 | ≈ **34** |
| | | | $3,81.10^{-2}$ | $2,35.10^{-2}$ | 33,95 | |
| | | | $3,72.10^{-2}$ | $2,24.10^{-2}$ | 34,78 | |
| | | | $3,92.10^{-2}$ | $2,49.10^{-2}$ | 32,97 | |
| 3 | 10000 | $2.10^{-2}$ | $3,78.10^{-2}$ | $1,52.10^{-2}$ | 52,08 | ≈ **53** |
| | | | $3,75.10^{-2}$ | $1,44.10^{-2}$ | 54,54 | |
| | | | $3,82.10^{-2}$ | $1,49.10^{-2}$ | 53,69 | |
| | | | $3,91.10^{-2}$ | $1,58.10^{-2}$ | 51,82 | |

## 4.7. Deney Numuneleri

Deneysel çalışmada kullanılan cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler, polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilmektedir. Oda sıcaklığında son derece yüksek mekanik mukavemete sahip olmakla birlikte kuru ve nemli ortamlarda ise iyi derecede dielektrik kayıp ve elektriksel mukavemet özellikleri göstermektedir. Kimyasal dirençleri yüksek olup düşük ve yüksek sıcaklıklarda ise sertleşebilme özelliğine sahiptir.

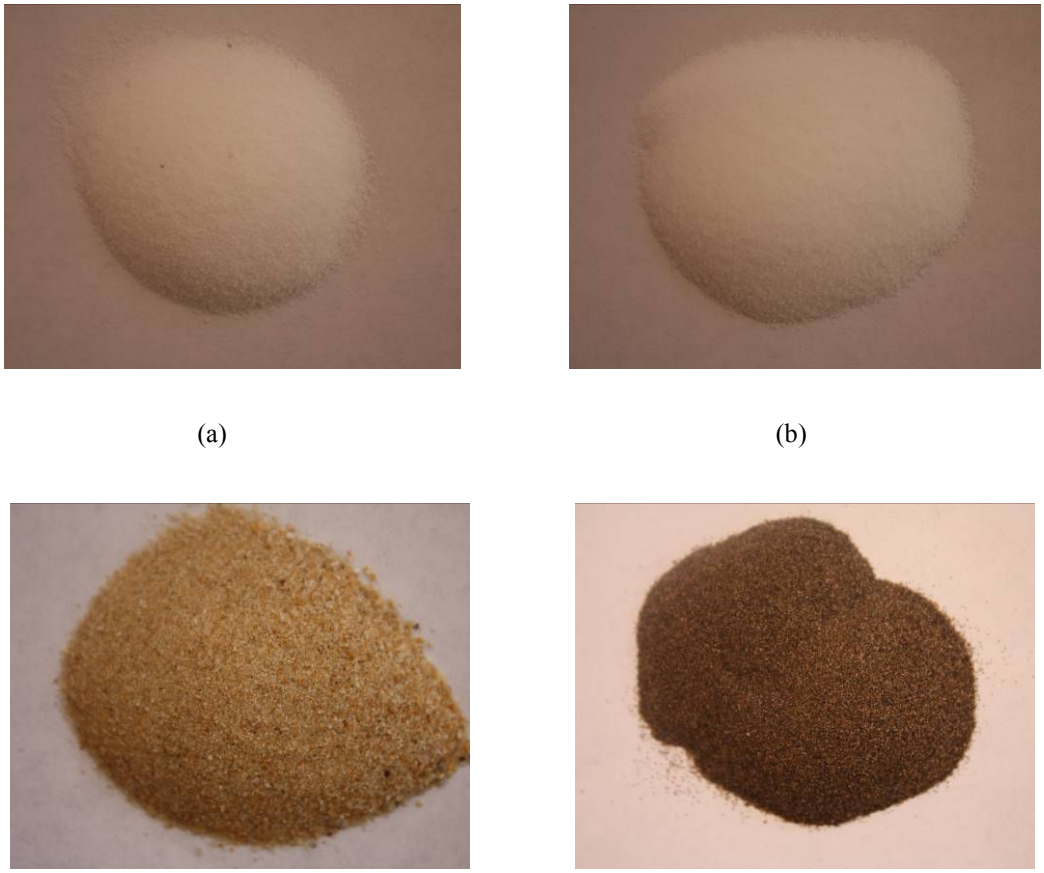
Saf haldeki cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler ana deney numunesi olarak seçilmiştir. Ayrıca bu saf yapı içerisine reçinenin %15'i oranında ve 150 μm ortalama çapında olacak şekilde ayrı ayrı $B_2O_3$ (Borik Asit), $B_2O_3$ (Borax), $SiO_2$ (Silisyum Oksit) ve $Al_2O_3$ (Alüminyum Oksit) dolgu maddeleri ilave edilerek yeni kompozit deney numuneleri oluşturulmuştur. Bu yeni oluşumda reçine maliyetini azaltmak ve mekanik özellik değişimi ile erozyon direncini artırmak hedeflenmiştir.

Bu kompozit malzemelerin oluşturulmasında reçine olarak Bisphenol A ve Epoxy CY–225 kullanılmış olup sertleştirici olarak da Anhydride HY–225 tercih edilmiştir. Reçinenin özellikleri Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Deney numunelerinde kullanılan reçinenin mekanik özellikleri

| **Reçine Özellikleri** | **Değerler** |
|---|---|
| Eğilme Gerilmesi ($\sigma_{Eğilme}$), MPa | 130 – 160 |
| Basma Gerilmesi ($\sigma_{Basma}$), MPa | 125 – 140 |
| Elastisite Modülü (E), MPa | 2600 – 3400 |
| Kopma uzaması ($\varepsilon_{kopma}$), % | 3 – 4 |
| Camsı Geçiş Sıcaklığı ($T_g$), °C | 95 – 105 |

Yeni kompozit malzemelerin oluşturulmasında kullanılan dolgu maddelerinin fotoğraf görüntüleri Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



(a) (b)

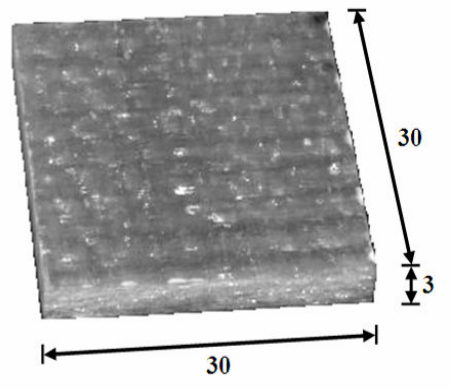
(c) (d)

**Şekil 4.9.** Dolgu maddelerinin görüntüleri; (a) Borik Asit, (b) Borax, (c) Silisyum Oksit, (d) Alüminyum Oksit

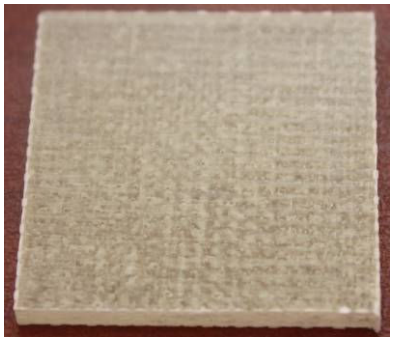
Deney numuneleri elle yatırma (hand lay-up) tekniği (110 Bar basınç, 120 °C sıcaklık ve 3 saat bası süresi) kullanılarak 3 mm kalınlığında ve 1x1 $m^2$ boyutlarında olacak şekilde plakalar halinde imal edilmiştir.

Daha sonra numunelerin her birinin deney setindeki numune tutucuya yerleştirilebilmesi amacıyla deney numuneleri 30x30 $mm^2$ olacak şekilde Şekil 4.10. daki son boyutlarına getirilmiştir. Numunelerin uygun boyutlara getirilebilmesi için elmas testere kullanılmıştır.

Deney numunelerinin 0° ve 45° fiber doğrultularındaki fotoğraf görüntüleri de Şekil 4.11.'de verilmiştir.



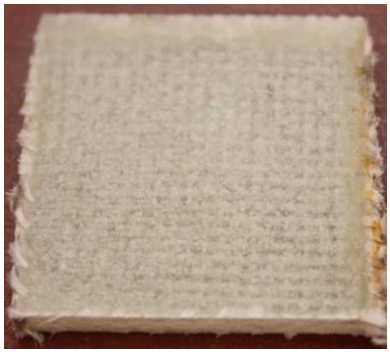

**Şekil 4.10.** Deney numunelerinin son boyutları



(a)



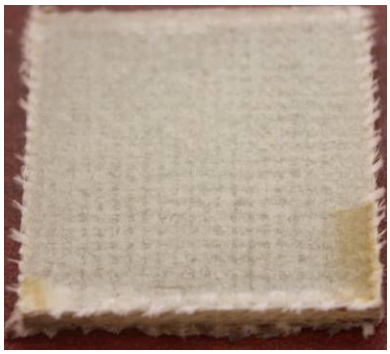
(b)



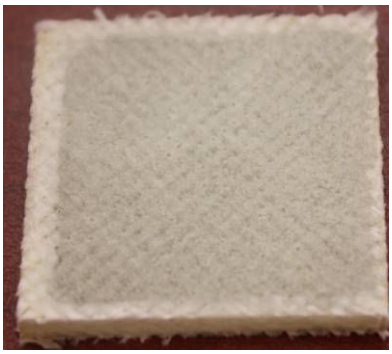
(c)



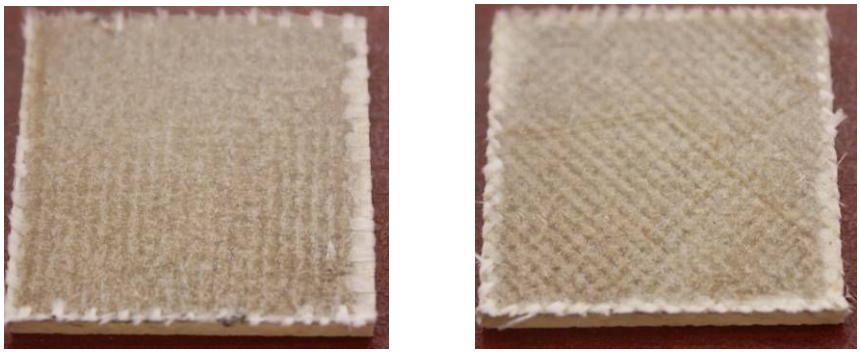
(d)



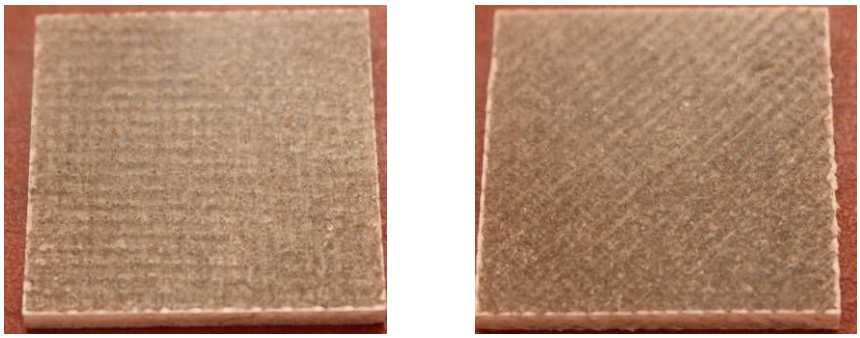
(e)



(f)



(g) (h)

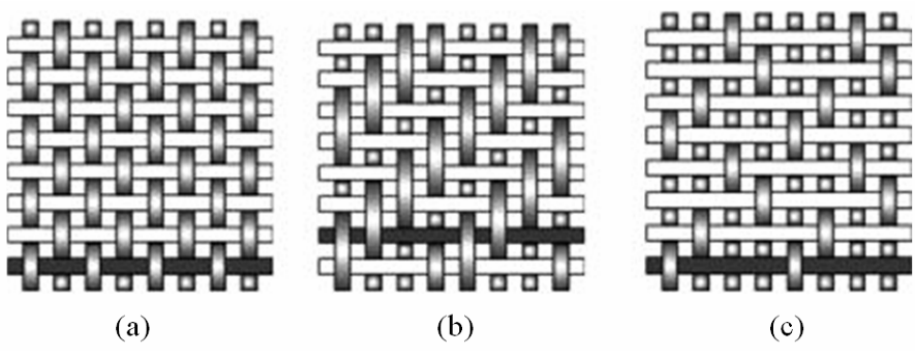


(j) (k)

**Şekil 4.11.** Deney numunelerinin fotoğraf görüntüleri; (a) 0° Saf GF/EP (b) 45° Saf GF/EP (c) 0° Borik Asitli GF/EP (d) 45° Borik Asitli GF/EP (e) 0° Boraxlı GF/EP, (f) 45° Boraxlı GF/EP, (g) 0° Silisyum Oksitli GF/EP, (h) 45° Silisyum Oksitli GF/EP, (j) 0° Alüminyum Oksitli GF/EP, (k) 45° Alüminyum Oksitli GF/EP

Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilmektedir. Çift yönlü yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanmakta ve matris yapısında homojen dağılmış elyaflarla izotrop bir yapı oluşturulmuş olmaktadır.

Endüstride yaygın bir kullanım alanı olan kompozit malzemelerin oluşturulmasında kullanılan farklı dokuma örnekleri (düz, tuval, saten) Şekil 4.12.'de verilmiştir.



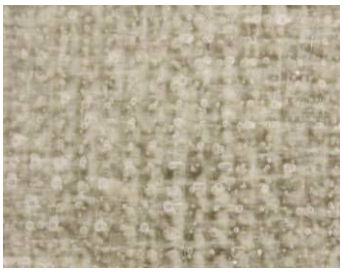

**Şekil 4.12.** Farklı dokuma örneklerinin şematik gösterimi; a) düz, b) tuval, c) saten

Deney numunelerinin tüm yönlerinde aynı mukavemet değerini elde etmek ve izotrop bir yapı oluşturmak amacıyla deney numunelerinde Şekil 4.12.(a)'da görülen çift yönlü düz dokuma tipi tercih edilmiştir. Bu dokumaya ait fotoğraf görüntüsü Şekil 4.13.'de verilmiş olup deney numunelerinde 0,15 mm kalınlıklı, 200 g/m$^2$'lik Vetrotex 600 E–cam ($0^o/90^o$) kumaş kullanılmıştır. $0^o/90^o$ E–cam kumaş dokumanın oluşturulmasında ise 17 μm filament çapına sahip elyaf seçilmiştir.



**Şekil 4.13.** Çift yönlü düz dokuma cam elyafların fotoğraf görünüşü

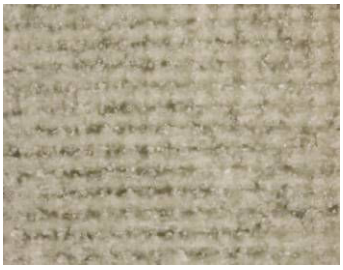
Elyafların tek yönlü ve çift yönlü yerleştirilişi kadar yapı içerisindeki fiberlerin doğrultularının da aşınma üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum gözönüne alınarak yapılan deneysel çalışmada da deney numunelerinin $0^o$ ve $45^o$ olmak üzere iki farklı fiber doğrultusundaki erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Ayrıca Şekil 4.14.'de de $0^o$ ve $45^o$ fiber doğrultularındaki deney numunelerinin fotoğraf görüntüleri gösterilmiştir.



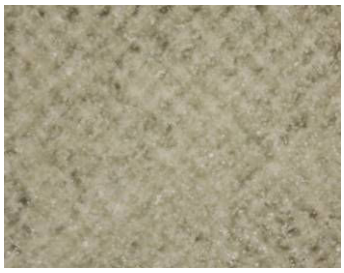
(a) 0° Saf GF/EP



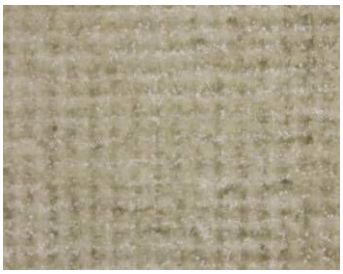
(b) 45° Saf GF/EP



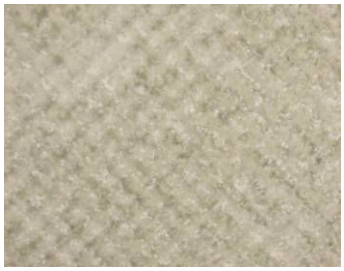
(c) 0° Borik Asitli GF/EP



(d) 45° Borik Asitli GF/EP



(e) 0° Boraxlı GF/EP



(f) 45° Boraxlı GF/EP



(g) 0° Silisyum Oksitli GF/EP



(h) 45° Silisyum Oksitli GF/EP



(j) 0° Alüminyum Oksitli GF/EP



(k) 45° Alüminyum Oksitli GF/EP

**Şekil 4.14.** Deney numunelerinin $0^o$ ve $45^o$ fiber doğrultularındaki görüntüleri (x5)

Deney tesisatının, test metodunun, aşındırıcı partikül özelliklerinin, çarpma parametrelerinin ve dolgu maddeleri ilavesi ile yeni özelliklere sahip kompozit deney numunelerinin belirlenmesiyle deneyler için tüm değişkenler tanımlanmış olmakla birlikte deneysel çalışmada kullanılan test şartlarına ait detaylar Çizelge 4.4.'de liste halinde verilmiştir.

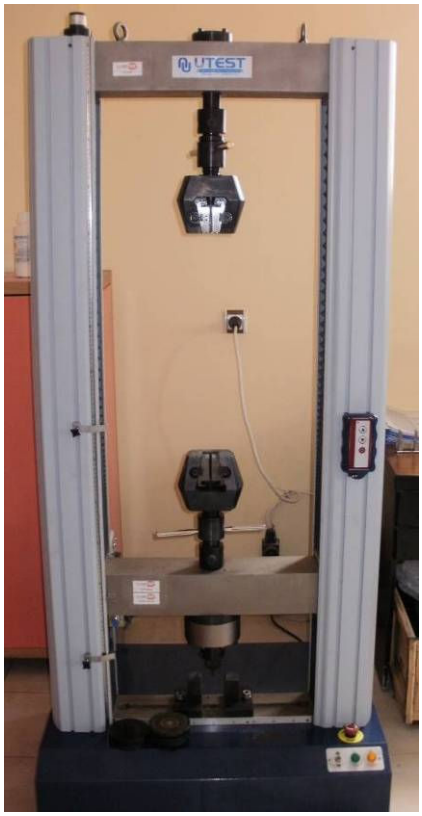
**Çizelge 4.4.** Deneylerde kullanılan erozyon aşınma test şartları

| Deney Parametreleri | Saf GF/EP | Borik Asitli GF/EP | Boraxlı GF/EP | Silisyum Oksitli GF/EP | Alüminyum Oksitli GF/EP |
|---|---|---|---|---|---|
| Aşındırıcı Partikül | Alümina | | | | |
| Aşındırıcı Partikül Boyutu | ≈ 200 μm – ≈ 400 μm | | | | |
| Aşındırıcı Partikül Şekli | Açısal Geometrik Yapıda | | | | |
| Çarpma Açısı, θ | 30° – 60° – 90° | | | | |
| Çarpma Hızı | ≈ 23 m/s – ≈ 34 m/s – ≈ 53 m/s | | | | |
| Partikül Deposu Basıncı | 2 Bar | | | | |
| Fiber Doğrultusu | 0° (0/90) – 45° (45/-45) | | | | |
| Aşındırıcı Partikül Debisi | 165 g/s (23 m/s) – 182,5 g/s (34 m/s) – 200 g/s (53 m/s) | | | | |
| Deney Sıcaklığı | Oda Sıcaklığı (21 °C) | | | | |
| Nozul – Numune Arası Mesafe | 10 mm | | | | |
| Nozul Giriş Basıncı | 1 Bar – 2 Bar – 3 Bar | | | | |
| Nozul Çapı | 6 mm | | | | |
| Nozul Boyu | 86 mm | | | | |
| Epoksi Reçine Oranı | % 100 | % 85 | % 85 | % 85 | % 85 |
| $B_2O_3$ (% 56.25) Oranı | – | % 15 | – | – | – |
| $B_2O_3$ (% 36.47) Oranı | – | – | % 15 | – | – |
| $SiO_2$ Oranı | – | – | – | % 15 | – |
| $Al_2O_3$ Oranı | – | – | – | – | % 15 |

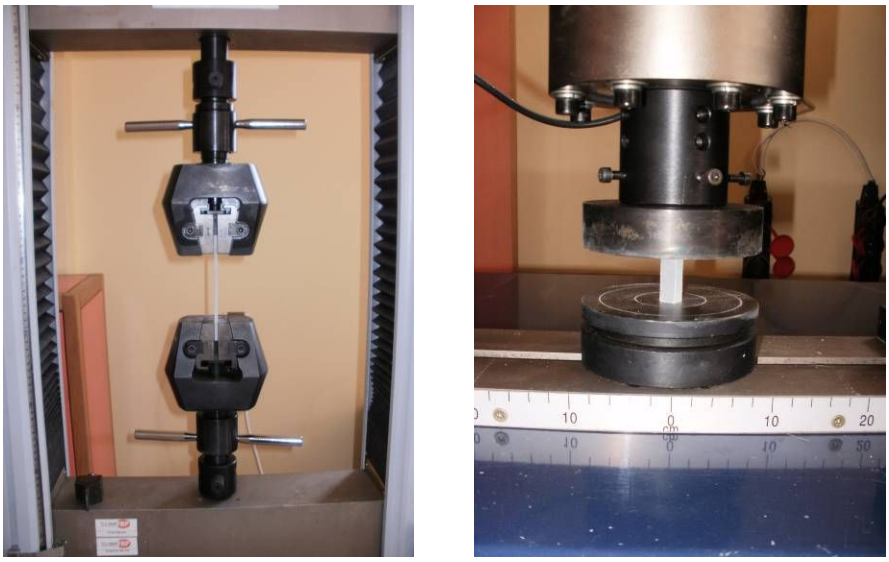
## 4.8. Deney Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Yeni oluşturulan kompozit deney numunelerinin mekanik özelliklerinin yapılan deneysel çalışmada erozyon aşınma davranışı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Bu amaçla tüm deney numunelerinin çekme mukavemeti, basma mukavemeti ve sertlik değerleri standart deney prosedürleri uygulanarak belirlenmiştir. Ayrıca bu mekanik özelliklere ilave olarak deney numunelerinin elyaf hacim oranları da tespit edilmiştir.

ASTM D 3039 standardında verilen boyutlara uygun olarak hazırlanan deney numuneleri Şekil 4.15.'de gösterilen çekme – basma test cihazındaki çenelere yerleştirilerek Şekil 4.16.'da detayı verilen çekme ve basma deneylerine tabi tutulmuştur. Her bir deney numunesi için üçer örnek hazırlanmış olup yapılan deneyler sonunda bulunan değerlerin ortalaması alınarak Çizelge 4.5. oluşturulmuştur. Ayrıca numunelere ait Gerilme – Birim Deformasyon grafikleri EK–3'de verilmiştir.




**Şekil 4.15.** Çekme – basma test cihazı



(a) (b)

**Şekil 4.16.** Çekme – basma test cihazı detayı; (a) Çekme işlemi, (b) Basma işlemi

Uygun standartlar dikkate alınarak mukavemet değerleri belirlenen deney numunelerinin sertlik değerlerini tespit etmek için Şekil 4.17.'de fotoğrafı gösterilen "The Barcol Impressor" sertlik ölçme test cihazından faydalanılmıştır.



**Şekil 4.17.** Sertlik ölçme test cihazı (The Barcol Impressor)

Bu test cihazı kullanılarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarının, yumuşak metallerin, plastiklerin, cam elyaf plakaların, kompozit malzemelerin, kauçuk ve deri gibi genel olarak çok sert olmayan malzemelerin sertlik değerleri belirlenebilmektedir. Ancak bu test cihazı kullanılarak sert malzemelerin test edilmesi mümkün olmamaktadır.

Deney numunelerinin sertlik değerlerini ölçmek için numunenin yüzeyine test cihazının "batma ucu" yerleştirilir. Cihazın ayağı da zemine sabitlenerek test ucu ile ayak paralel duruma getirilir ve test cihazına el kuvveti uygulanarak yüzeyin gösterdiği dirence bağlı olarak cihazın göstergesinden Barcol cinsinden sertlik değeri okunur. Deney numunelerinin sertlik değerlerinin belirlenmesinde ölçüm sayısının artırılması hassasiyeti etkileyen önemli bir parametredir. Bu amaçla numune yüzeyinin on farklı noktasında ölçüm yapılmış, sonuçların ortalaması numunenin sertlik değeri olarak kabul edilmiş ve Çizelge 4.5.'de bu değerler belirtilmiştir.

Ayrıca sertlik testine maruz kalmış deney numunelerinin fotoğraf görüntüleri ile Barcol sertliğinin diğer sertlik değerlerine dönüşümü durumunda hangi değerlere karşılık geldiğine ait birim dönüşüm tabloları ve Mohs sertlik cetveli EK–4'de verilmiştir.

Çekme mukavemeti, basma mukavemeti ve sertlik değerlerine ilave olarak her bir deney numunesi yakma testine maruz kalmış ve numunelerin elyaf hacim oranı belirlenmiştir. Bu işlem ASTM D 2584 standardı referans alınarak yapılmıştır. Öncelikli olarak yakma testi için hazırlanan her bir deney numunesinin hassas terazi ile tartılarak ilk ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu ilk ağırlık deney numunelerindeki elyaf ve reçinenin toplam ağırlığını temsil etmektedir. Daha sonra her bir deney numunesindeki reçinenin tamamen yanması için deney numunesi sıcaklığı 600 °C olan fırında yakılmıştır. Yakma işlemi sonucunda geriye sadece cam elyaf kalmış olup hassas terazi kullanılarak cam elyafın ağırlığı belirlenmiştir. Toplam ağırlıktan elyafın ağırlığı çıkarılarak reçinenin ağırlığı bulunmuştur.

Cam elyafın yoğunluğunun da 2,6 g/cm$^3$ olduğu bilindiğinden, (4.3) formülünden yararlanarak elyaf hacim oranı ($V_f$) elde edilmiştir.

$$V_f = ( W_f / \rho_f ) / ( W_c / \rho_c ) \qquad (4.3)$$

(4.3) eşitliğindeki $W_f$ elyafın ağırlığını, $W_c$ ise kompozitin ağırlığını, $\rho_f$ elyafın yoğunluğunu, $\rho_c$ ise kompozitin yoğunluğunu ifade etmektedir.

**Çizelge 4.5.** Deney numunelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri

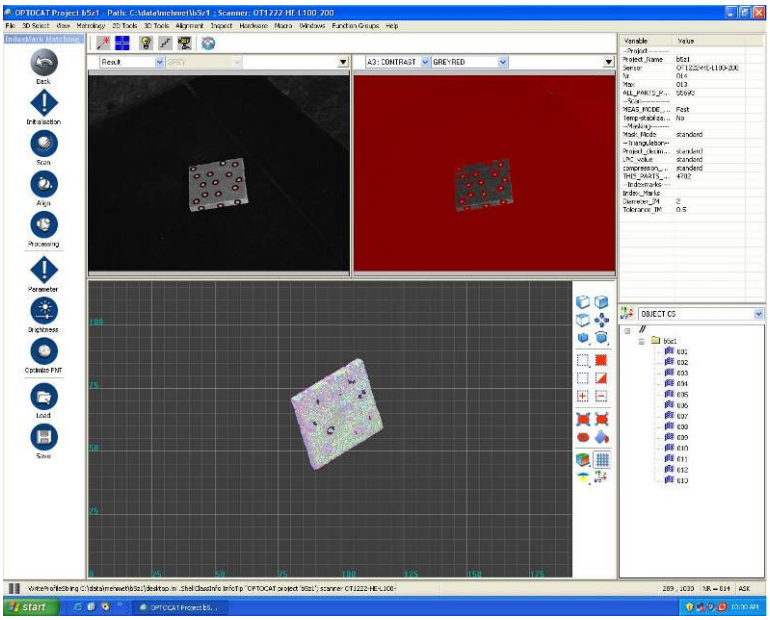
| Özellikler \ Deney Numuneleri | Saf GF/EP | Borik Asitli GF/EP | Boraxlı GF/EP | Silisyum Oksitli GF/EP | Alüminyum Oksitli GF/EP |
|---|---|---|---|---|---|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 533 | 401 | 379 | 431 | 454 |
| Basma Mukavemeti (MPa) | 607 | 449 | 412 | 474 | 516 |
| Elastisite Modulü (MPa) | 144,3 | 128,96 | 124,4 | 138,19 | 141,17 |
| Sertlik Değeri, Barcol (HB) | 78 (87) | 53 (35) | 45 (28) | 66 (55) | 71 (67) |
| Elyaf Hacim Oranı | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |

## 4.9. Deney Numunelerindeki Hacimsel Kaybın Tespit Edilmesi

Yapılan deneylerde, deney numunelerindeki aşınma kayıpları $10^{-4}$ gr hassasiyete sahip hassas terazi ile ölçülmüştür. Bu ölçümün yanı sıra deney numunelerinde meydana gelen hacimsel kayıpların da tespit edilmesi amacıyla yüzeylerin sayısal haritalanması yöntemi kullanılarak simülasyonu yapılmış ve deney numunelerinde meydana gelen hacimsel kayıplar tespit edilmiştir.

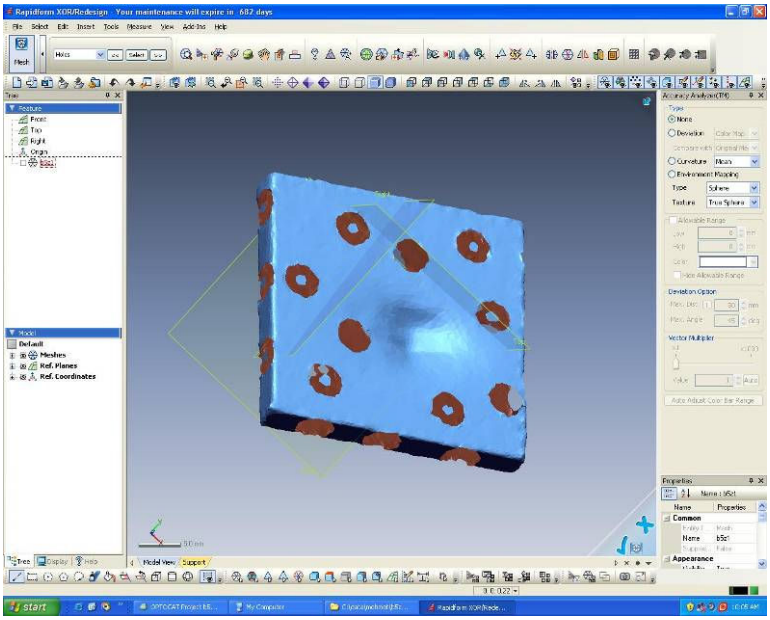
Yüzeylerin sayısal haritalanması yönteminde üç boyutlu (3B) tarama işleminden faydalanılmıştır. Bu işlem, iki boyutlu fotoğraflar yardımı ile 3B'lu görüntü elde edilmesi olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmada erozyon aşınmasına maruz kalmış deney numunesine ait görüntüler Şekil 4.18.'de gösterilmiştir.



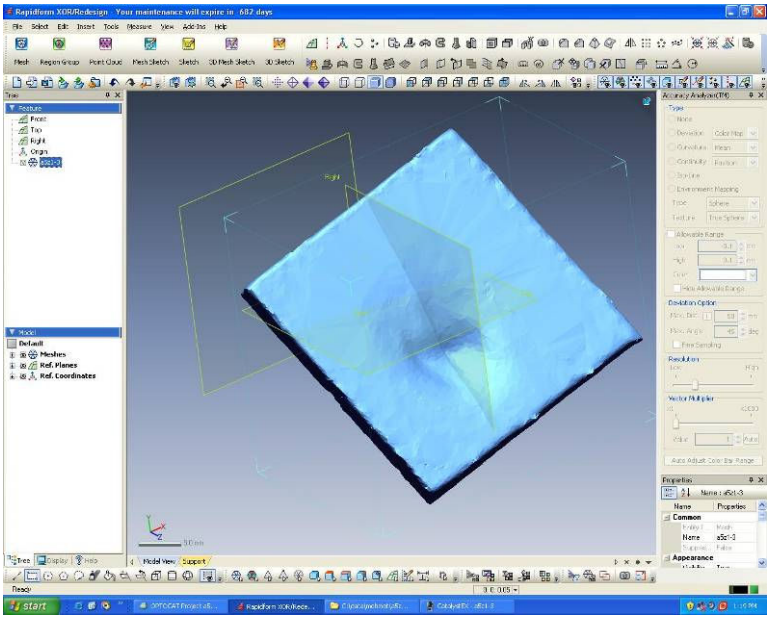
**Şekil 4.18.** İncelenen deney numunesine ait nokta bulutu görünümü

OPTOCAT Project programı vasıtasıyla ve numune yüzeyindeki referans etiketlerden alınan verilere bağlı olarak yüzey görüntüsü oluşturulan deney numunesine bu aşamadan sonra Rapidform XOR/Redesign yazılımı uygulanmıştır. Bu yazılım vasıtasıyla nokta bulutu şeklinde algılanan numuneye bir mesh yapısı kazandırılmıştır (Şekil 4.19.).



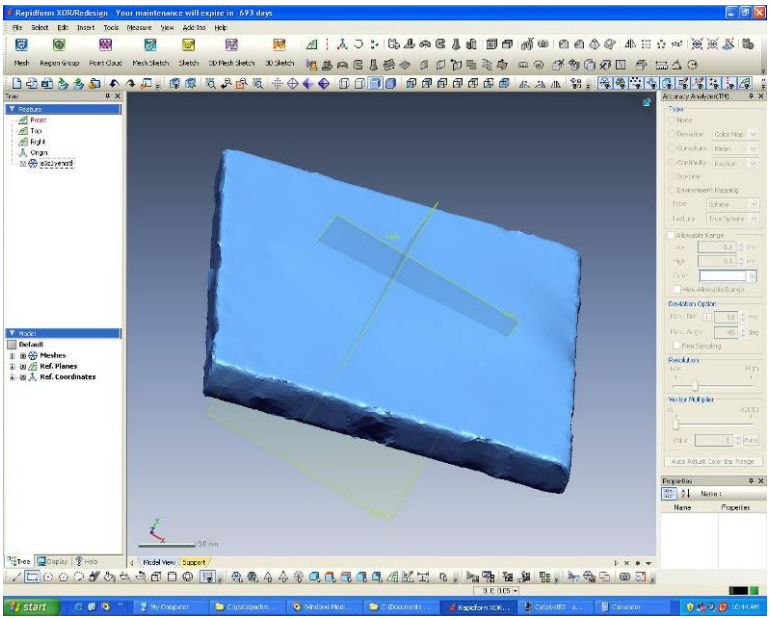
**Şekil 4.19.** Deney numunesinin işlenmemiş mesh yapısı

Mesh yapısı kazandırılan deney numunesinin referans etiketlerinin olduğu noktalar programın özelliklerinden yararlanarak doldurulmuş ve Şekil 4.20.'deki aşınma sonrası deney numunesinin son hali elde edilmiştir.



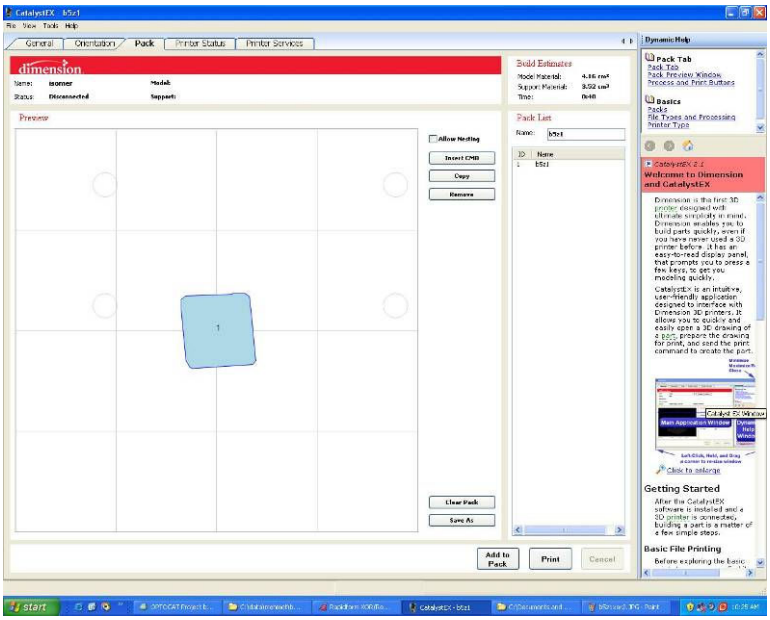
**Şekil 4.20.** Deney numunesinin mesh yapısının düzenlenmiş hali

Ayrıca aşınan yüzeyin tamamen doldurulmasıyla deney numunesinin aşınmadan önceki duruma gelmesi sağlanmıştır (Şekil 4.21.).



**Şekil 4.21.** Deney numunesinin aşınmadan önceki hali

Son olarak Şekil 4.22.'de gösterilen CatalystEX programı kullanılarak deney numunesine ait aşınmadan önceki ve aşınmadan sonraki hacim değerleri belirlenmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası hacimleri belirlenen numunenin farkı alınarak numuneye ait hacim kaybı tespit edilmiş ve işlem tamamlanmıştır.




**Şekil 4.22.** Deney numunesinin hacim kaybının belirlenmesi

53 m/s çarpma hızında, 400 μm aşındırıcı partikül boyutunda, 0° fiber doğrultusunda ve 30° çarpma açısındaki beş deney numunesi için elde edilen hacim kaybı sonuçları EK–5'de verilmiş olup hacim kaybı ile ağırlık kaybı değişimlerinin karşılaştırılmasında sonuçlar açısından benzer bir eğilim ortaya çıkmıştır. Ancak deney numunelerinin hacimsel kaybının belirlenmesinin zorluğu ve deneysel çalışmada incelenen deney numunesi sayısının fazlalığı göz önüne alınarak deney numunelerinin kıyaslanmasında ağırlık kaybındaki değişim kullanılmıştır.

## 4.10. Deney Prosedürü

Deney numunelerinin hazırlanışı ve deneylerin yapılışı aşağıda verilen sıraya göre gerçekleştirilmiş olup deneylerde standart bir test prosedürü izlenmiştir;

**1.** 3 mm kalınlığında ve 1x1 $m^2$ boyutlarında plaka şeklinde saf GF/EP, Borik Asit katkılı GF/EP, Borax katkılı GF/EP, Silisyum Oksit katkılı GF/EP ve Alüminyum Oksit

katkılı GF/EP deney numuneleri hazırlandı. Plaka şeklinde imal ettirilen deney numuneleri 30x30 $mm^2$ boyutlarında iki fiber doğrultusu (0° ve 45°) elde edilecek şekilde elmas testere ile kesildi ve numune tutucuya sabitlenecek boyutlara getirildi.

**2.** Tüm deney numuneleri basınçlı hava ile temizlenerek yüzeylerindeki toz vb. maddelerden arındırıldı.

**3.** Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra deney numunesinin ilk ağırlığının tespit edilmesi için deney numunesi $10^{-4}$ gr hassasiyete sahip hassas terazide tartıldı ve ilk ağırlığı kaydedildi.

**4.** Deney numunesi, numune tutucudaki yerine yerleştirildi ve hareket etmesini önlemek amacıyla numune tutucudaki sabitleme elemanları ile sabitlendi.

**5.** Deneylerde numunelerin aşınmasını sağlamak amacıyla her bir deney numunesi için 10 kg'lık uygun boyuttaki (≈ 200 ve 400 μm) aşındırıcı partiküller (alümina) ana depoya dolduruldu.

**6.** Ana depo ile basınçlandırılmış partikül deposu arasındaki küresel vana açılarak tüm aşındırıcı partikülün basınçlandırılmış partikül deposuna akması sağlandı ve depoları ayıran küresel vana kapatıldı.

**7.** Sistemde kullanılan basınç ayar valfleri vasıtasıyla basınçlandırılmış deponun ve nozulun girişindeki basınçlar ayarlandı ve yapılan ayarlar manometrelerden kontrol edildi. Böylece basınçtaki değişimden faydalanarak deneylerde ihtiyaç duyulan çarpma hızları (≈ 23, 34 ve 53 m/s) belirlenmiş oldu.

**8.** Basınca bağlı olarak hız değerinin ayarlanmasından sonra numune tutucunun kendi ekseni etrafında döndürülmesiyle de istenen çarpma açıları (30°, 60° ve 90°) ayarlandı.

**9.** Basınçlandırılmış deponun altında bulunan küresel vana açılarak aşındırıcı partiküllerin deney numunesi yüzeyine istenen çarpma hızında ve çarpma açısında çarpması sağlandı. Depodaki aşındırıcı partikül bittiğinde ise öncelikli olarak küresel vana sonrasında da sistemi besleyen hava girişi kapatıldı.

**10.** Deney numunesi, numune tutucudaki yerinden çıkarılarak tekrar basınçlı hava ile temizlendi.

**11.** Deney numunesinin son ağırlığının tespit edilmesi için deney numunesi tekrar hassas terazide tartılarak son ağırlığı kaydedildi.

**12.** Bir deneyin bitirilip diğer deneyin başlatılmasından önce sistemde kullanılan elemanlarda (gaz akış vanaları, basınç regülatörleri ve manometreler) oluşabilecek tıkanma ve kirliliği önlemek amacıyla her bir deneyden sonra deneyin yapıldığı bölge ve elemanlar basınçlı hava ile temizlenerek deney tesisatındaki elemanlardaki olumsuzluklar minimuma indirilmeye çalışıldı. Böylece deneylerin tümünde standart yapı korunmuş oldu.

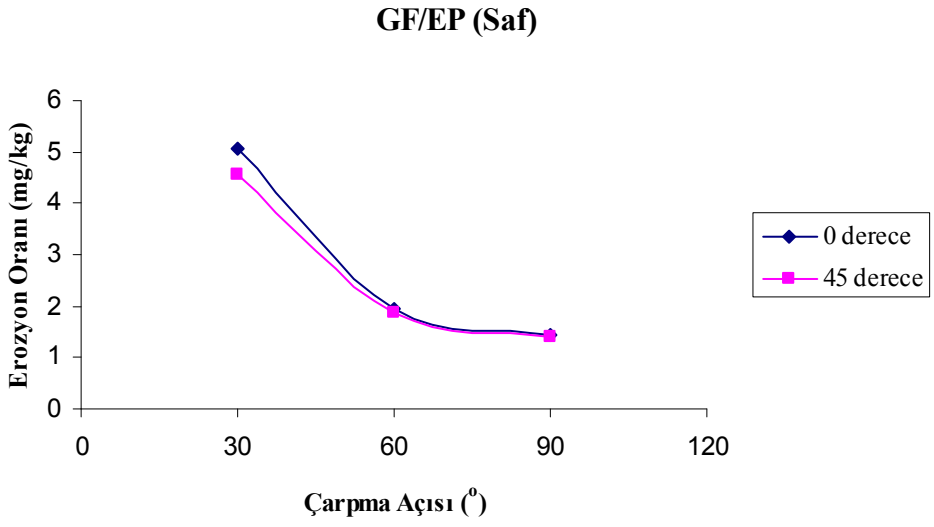
**13.** Deneyler sonunda numunelerde meydana gelen ağırlık kaybına bağlı olarak her bir deney numunesi için literatürde kabul gören erozyon oranı (mg/kg) değeri hesaplandı. Bu oran, deney numunesinde meydana gelen ağırlık kaybının, her bir deney numunesi için kullanılan toplam aşındırıcı partikül ağırlığına bölünmesiyle belirlendi.

**14.** Sonuç olarak her bir deney numunesi için yukarıdaki işlemler tamamlandıktan sonra deney numunesinde meydana gelen erozyon oranına çarpma hızının, çarpma açısının, aşındırıcı partikül boyutunun ve fiber doğrultusunun nasıl bir etki oluşturduğuna ait grafikler oluşturuldu, istatistiksel olarak değerlendirme yapıldı, mikroskop ve SEM görüntüleri incelendi.

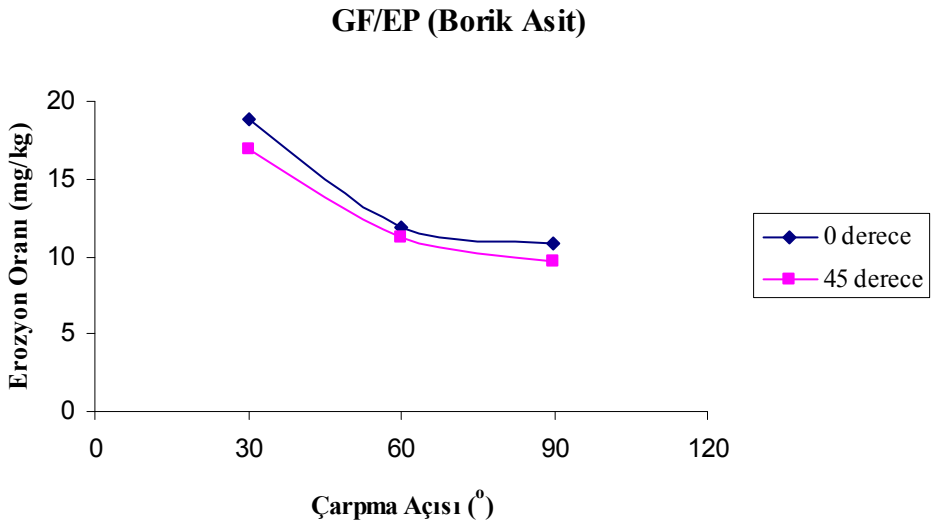
# 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Cam elyaf takviyeli epoksi kompozit [saf GF/EP, Borik Asit katkılı GF/EP, Borax katkılı GF/EP, Silisyum Oksit katkılı GF/EP ve Alüminyum Oksit katkılı GF/EP] deney numuneleri üç farklı çarpma hızında (≈23, 34 ve 53 m/s), üç farklı çarpma açısında (30°, 60° ve 90°), iki farklı aşındırıcı partikül boyutunda (≈200 ve ≈400 μm) ve iki farklı fiber doğrultusunda (0° ve 45°) erozyon aşınmasına maruz bırakılmıştır. Yapılan deneyler sonunda her bir deney numunesi için erozyon oranı değerleri hesaplanarak çarpma açısı–erozyon oranı grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklerdeki her bir noktanın belirlenebilmesi için o duruma ait üç deney yapılmış ve bu üç tekrarlı deneyin ortalaması alınarak grafikler çizilmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri Ek–6'da tablo halinde verilmiştir.

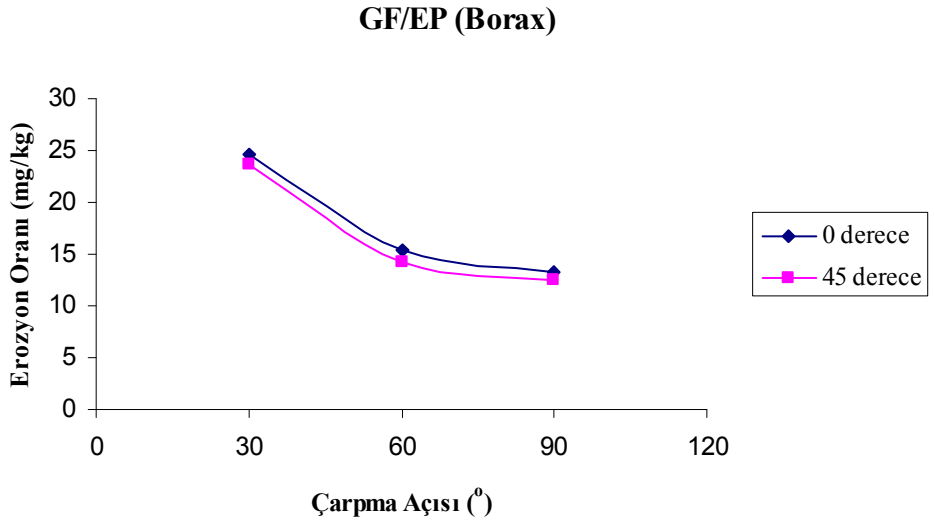
Şekil 5.1., Şekil 5.2., Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'deki grafikler sırasıyla saf GF/EP, Borik Asitli GF/EP, Boraxlı GF/EP, Silisyum Oksitli GF/EP ve Alüminyum Oksitli GF/EP deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızında, 200 μm ortalama çapa sahip aşındırıcı partikül boyutunda ve iki farklı fiber doğrultusundaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı arasındaki değişimleri göstermektedir.



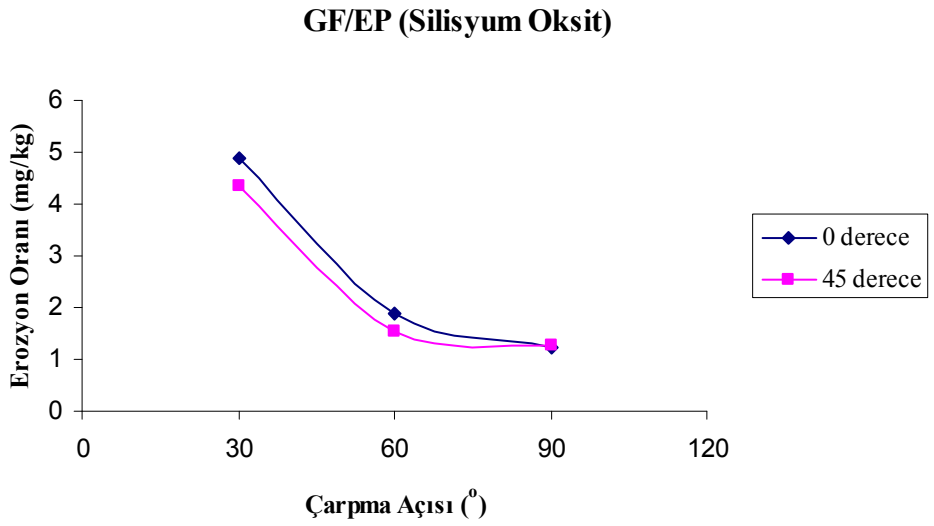

**Şekil 5.1.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



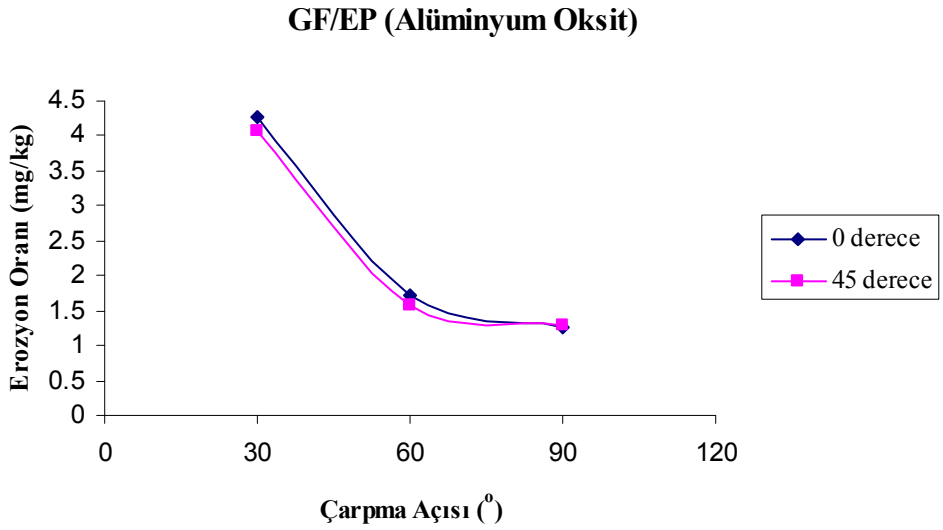

**Şekil 5.2.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.3.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



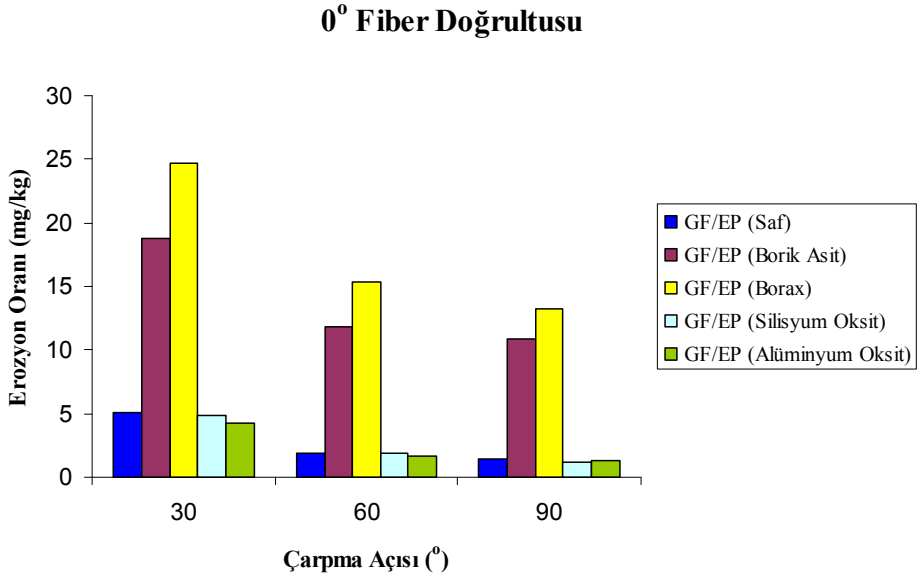

**Şekil 5.4.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



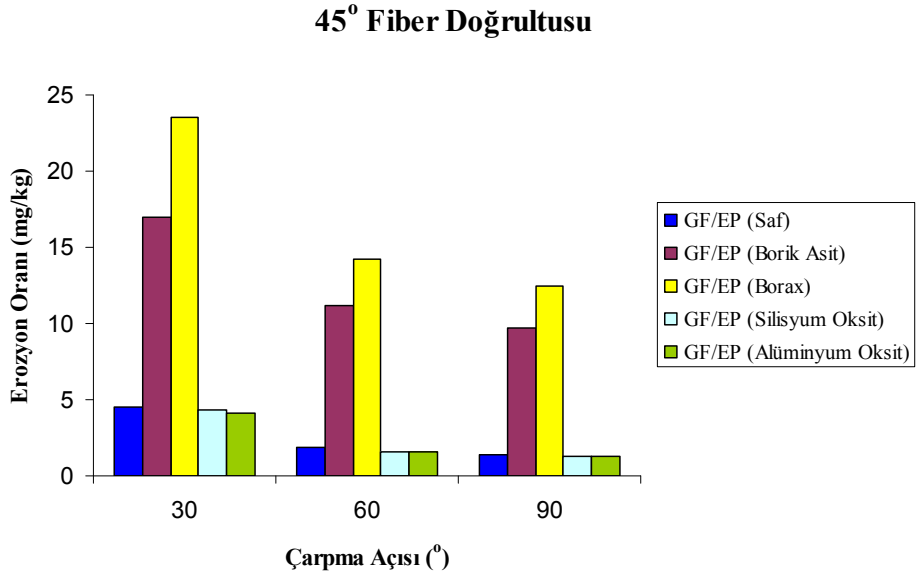

**Şekil 5.5.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

Bu grafikler incelendiğinde öncelikli olarak yapı içerisine katılan dolgu maddelerinin (borik asit, borax, silisyum oksit, alüminyum oksit) erozyon oranını değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Yani yapıya katılan dolgu maddeleri erozyon aşınmasını farklılaştırmış olmakla birlikte bu farklılığın olumlu ve olumsuz etkileri

gözlemlenmiştir. Ayrıca deney numunelerinin farklı fiber doğrultularında deneye tabi tutulması durumunda da erozyon oranlarında değişiklikler ortaya çıkmıştır. Bu sonuçların ve deney numuneleri arasındaki farklılıkların daha net görülebilmesi amacıyla Şekil 5.6. ve Şekil 5.7.'deki grafikler oluşturulmuştur.




**Şekil 5.6.** Tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması




**Şekil 5.7.** Tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

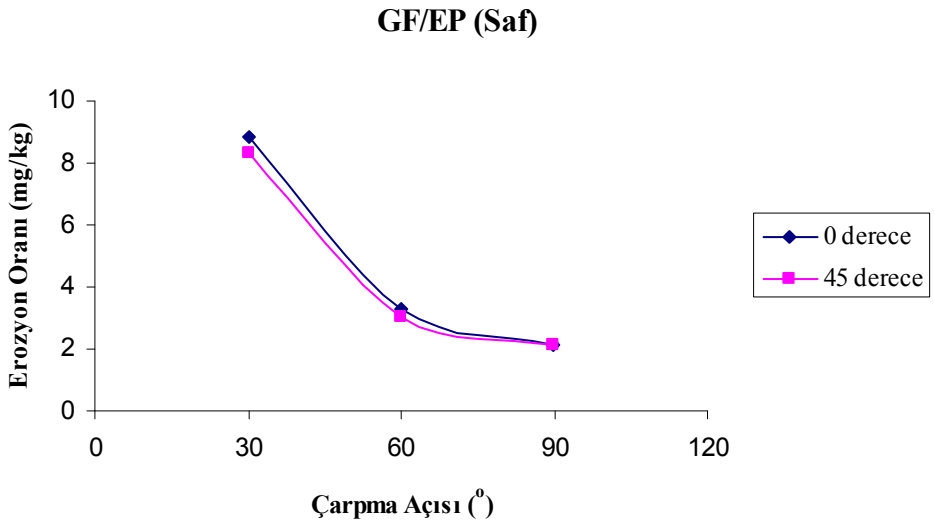
Tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızında, 200 μm ortalama çapa sahip aşındırıcı partiküller ile yapılan deneylerinde 0° fiber doğrultusu referans alındığı zaman cam elyaf takviyeli saf epoksi kompozit malzeme içerisine katılan dolgu maddelerinden Borax en olumsuz etkiyi ortaya çıkarmış ve erozyon oranının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte Borik Asitte erozyon aşınması üzerine olumsuz bir etki yapmıştır. Ancak Alüminyum Oksit ve Silisyum Oksit dolgular ise erozyon oranının bir miktar düşmesine sebep olmuş yani erozyon direncini arttırmıştır. Bu durumdaki deneysel şartlar düşünüldüğünde erozyon aşınmasına en olumlu etkiyi Saf malzemeye göre erozyon oranında %15,7 lik bir azalma meydana getiren Alüminyum Oksit sağlamıştır. Buna karşılık Borax ilavesi erozyon direncinde en fazla düşüşe sebep olmuş ve bu düşüş saf malzemeye göre %386,9 seviyesine ulaşmıştır.

Dolgu maddelerinin ilave edildiği kompozit malzemelerde 45° fiber doğrultusunun etkisi altında yapılan deneylerde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup Borax ile Borik Asit dolgu maddeleri erozyon oranının artmasına Alüminyum Oksit ile Silisyum Oksit dolgu maddeleri ise erozyon oranının azalmasına sebep olmuştur.

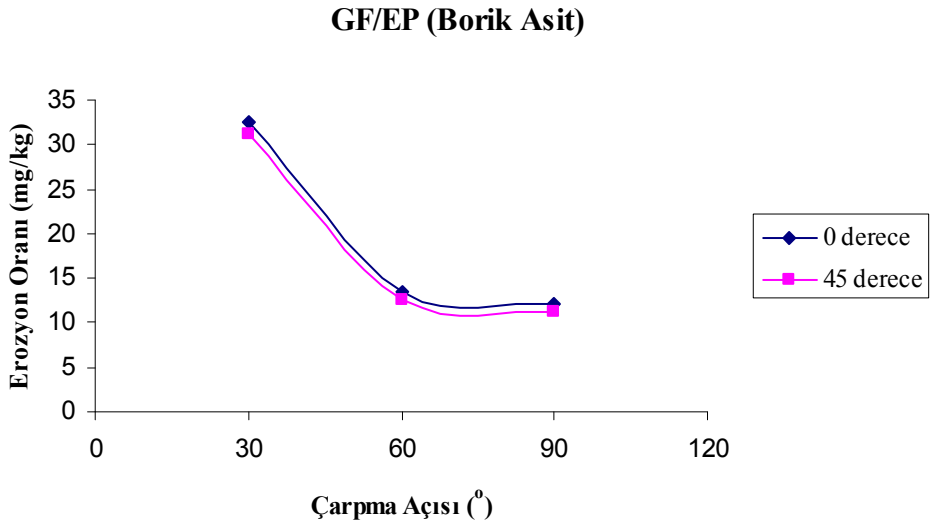
Ayrıca yapılan deneylerde fiber doğrultusunun 0° den 45° ye değiştirilmesi ile tüm deney numuneleri için farklı olmakla birlikte genel olarak erozyon oranında bir miktar azalmalar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çarpma açısının 30° den 90° ye arttırılması tüm deney numunelerinde erozyon oranını azaltmış bu da literatürdeki sünek malzemelerde karşılaşılan duruma benzer bir eğilim ortaya çıkarmıştır.

Şekil 5.8., Şekil 5.9., Şekil 5.10., Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'deki grafikler saf, borik asit, borax, silisyum oksit ve alüminyum oksit dolgular ilave edilmiş deney numunelerinin benzer aşındırıcı partiküller ile 34 m/s çarpma hızında yapılan deneylerden elde edilen sonuçları göstermektedir.

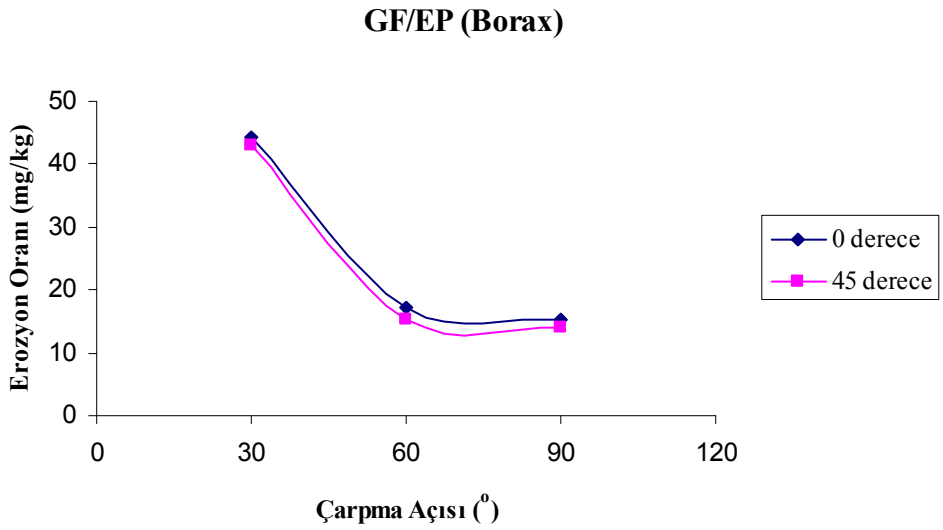
Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'de ise sırasıyla 0° ve 45° fiber doğrultularında tüm deney numuneleri için 34 m/s çarpma hızı ve ≈200 μm alümina etkisi altında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



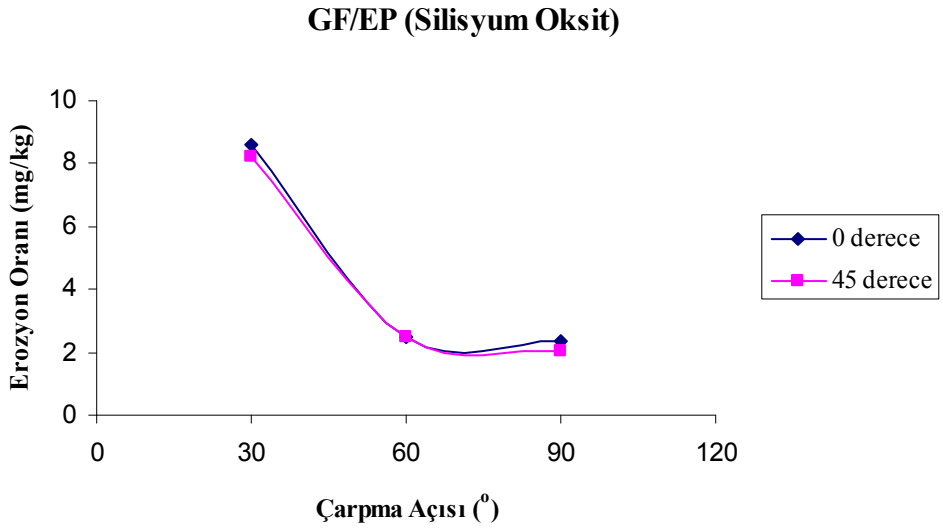

**Şekil 5.8.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



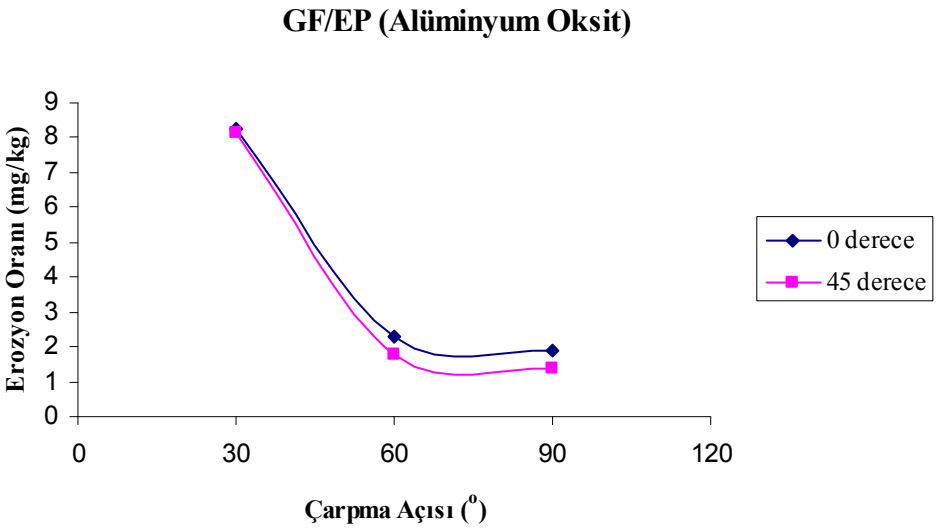

**Şekil 5.9.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



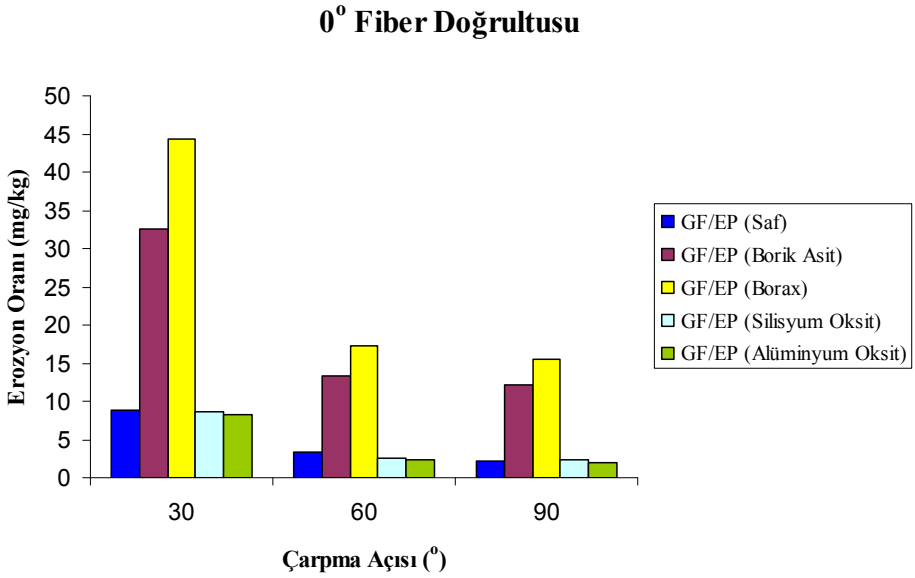

**Şekil 5.10.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



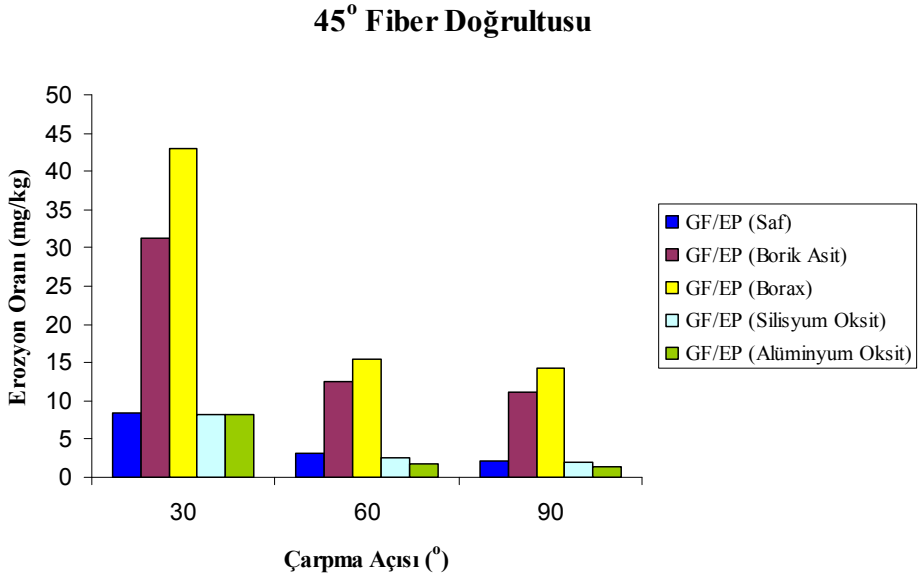

**Şekil 5.11.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.12.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, 200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.13.** Tüm deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

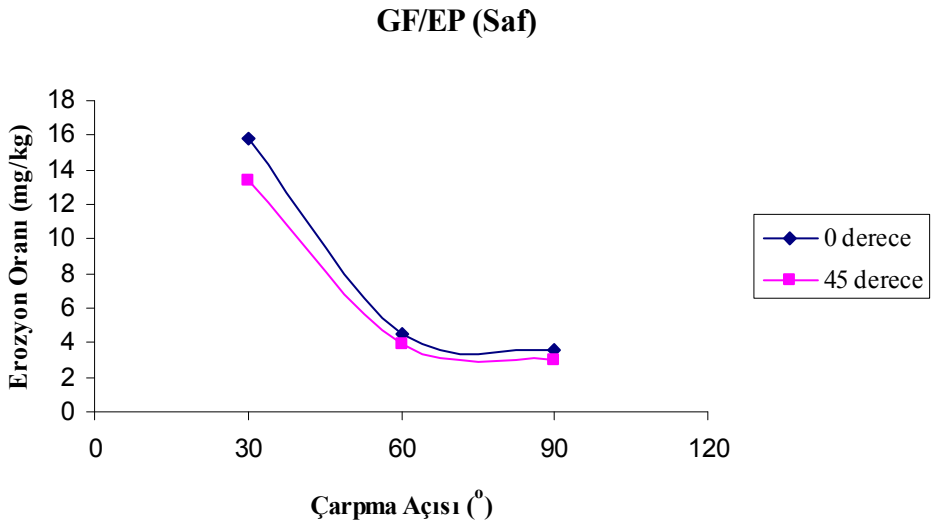



**Şekil 5.14.** Tüm deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

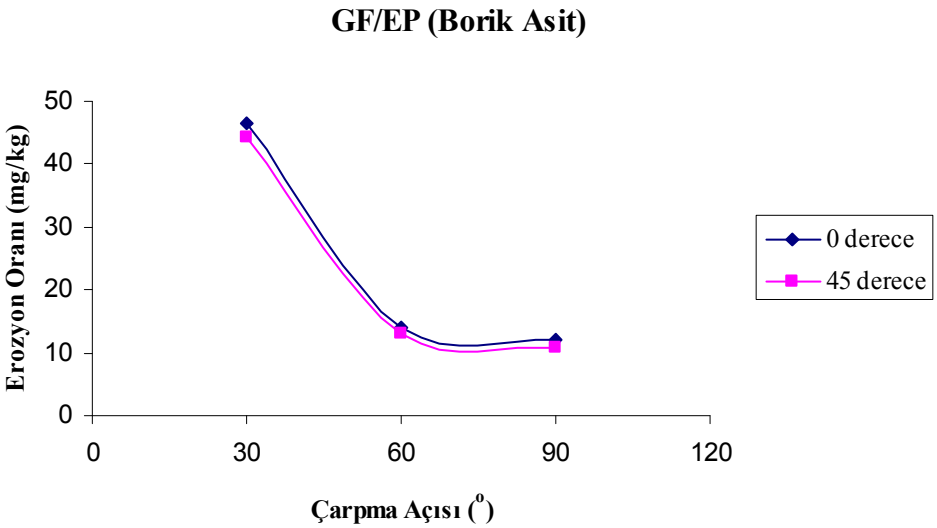
34 m/s çarpma hızında ve ≈200 μm alümina ile yapılan deneylere ait grafikler incelendiğinde 0° ve 45° fiber doğrultuları için Borax ve Borik Asit ilaveli deney numuneleri erozyon aşınmasını arttırmış, Alüminyum Oksit ve Silisyum Oksit ilaveli numuneler ise erozyon aşınmasını azaltmıştır. Alüminyum Oksit ilavesi erozyon oranı üzerine en olumlu etkiyi sağlarken en olumsuz etki Borax ile gerçekleşmiştir.

Ayrıca fiber doğrultusunun 45° ye değiştirilmesi de erozyon direnci üzerine olumlu bir etki yapmış olup çarpma açısı 90° de max erozyon direnci sergilemiştir. Çarpma hızının artması da erozyon aşınması üzerine olumsuz bir etki yapmış ve erozyon oranını arttırmıştır.

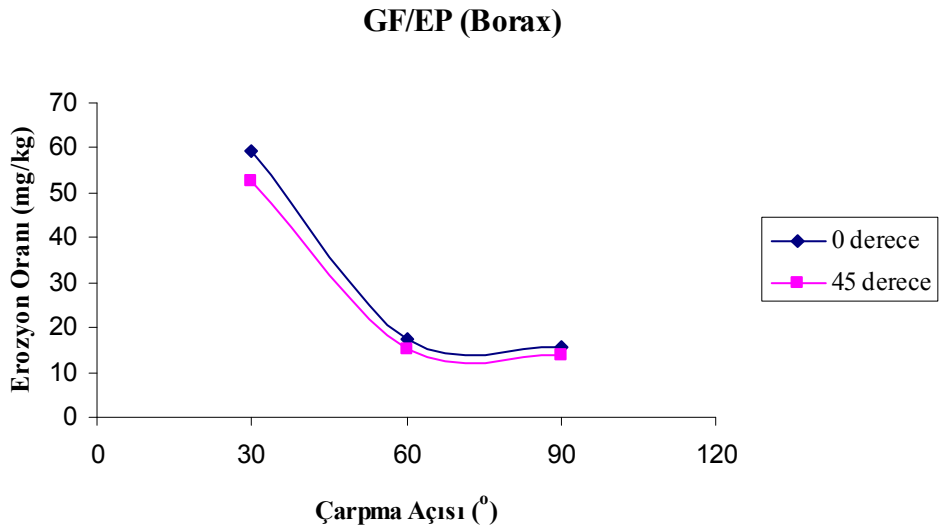
Şekil 5.15., Şekil 5.16., Şekil 5.17., Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'daki grafikler ise katkısız GF/EP, Borik Asit katkılı GF/EP, Borax katkılı GF/EP, Silisyum Oksit katkılı GF/EP ve Alüminyum Oksit katkılı GF/EP deney numunelerinin iki farklı fiber doğrultusundaki (0° ve 45°) değişimlerini göstermektedir. Bu grafiklerin oluşturulmasında çarpma hızı için 53 m/s kullanılmakla birlikte aşındırıcı partikül boyutu için de 200 μm ortalama çapa sahip alümina kullanılmıştır.



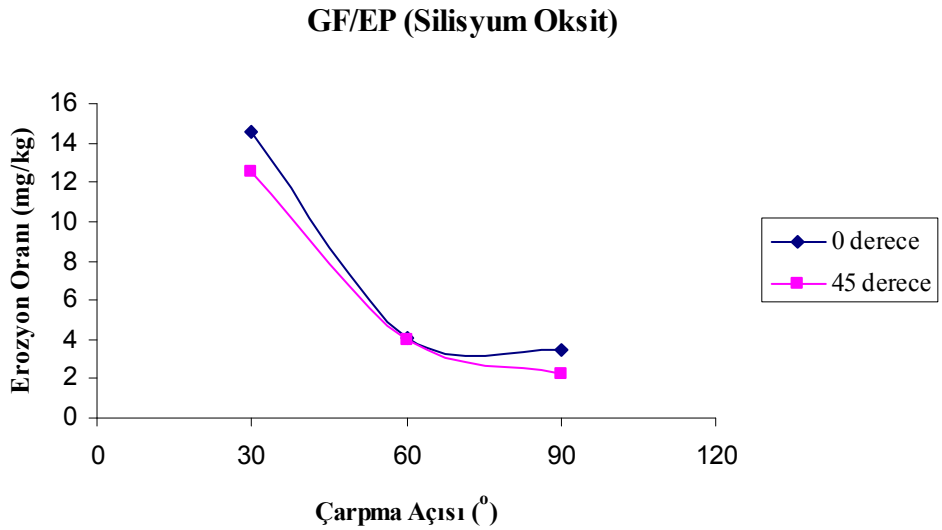

**Şekil 5.15.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



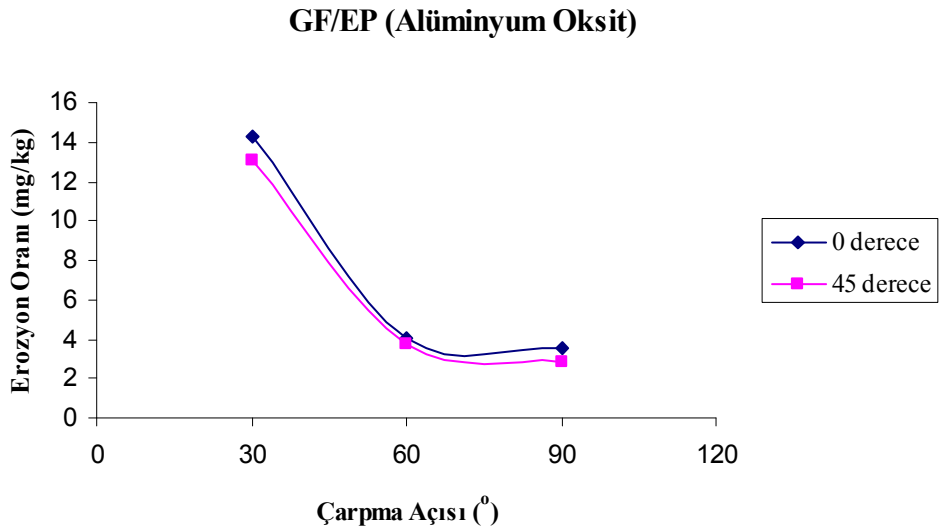

**Şekil 5.16.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.17.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 µm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

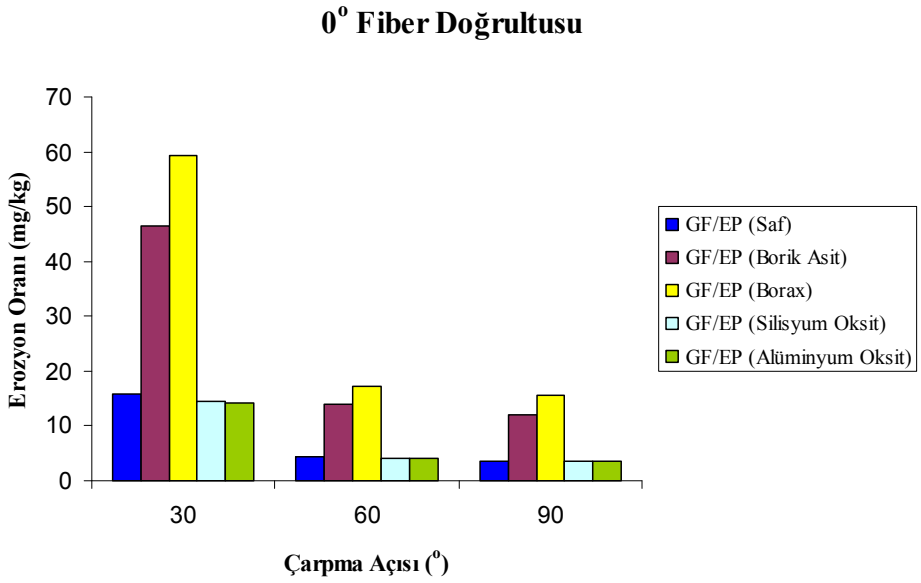



**Şekil 5.18.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 µm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



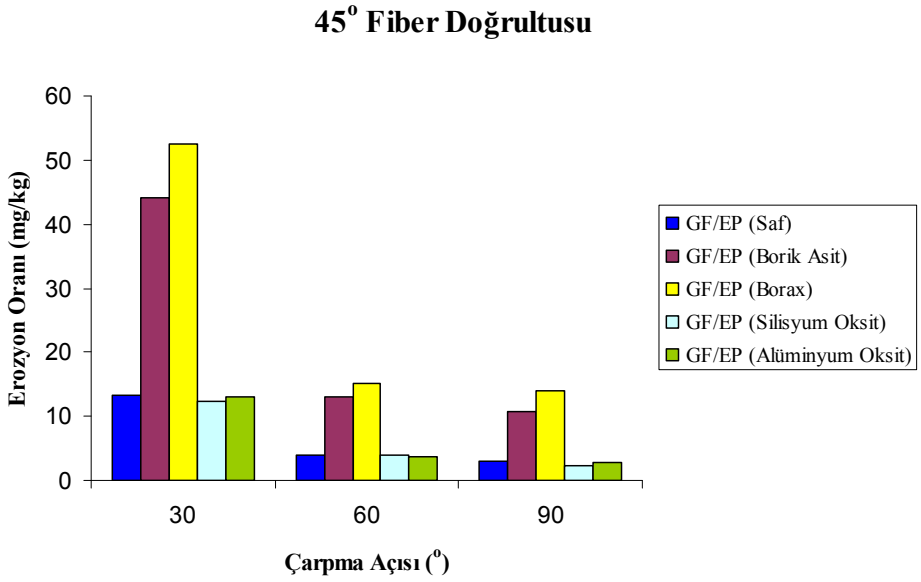

**Şekil 5.19.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, 200 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

53 m/s çarpma hızı ve ≈200 μm alümina etkisi altında tüm deney numuneleri için çarpma açısı–erozyon oranı arasındaki değişime ait sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5.20. ve Şekil 5.21.'de birleştirilmiştir.




**Şekil 5.20.** Tüm deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 μm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

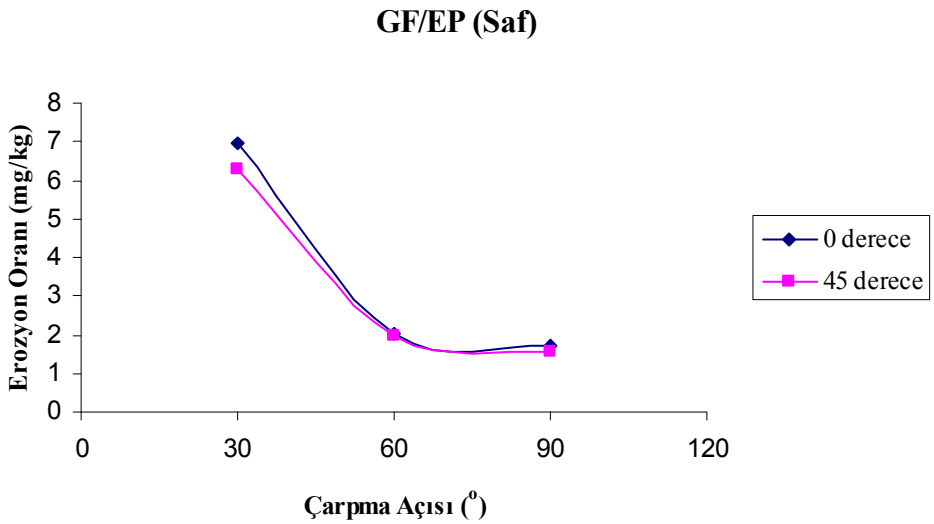
Grafikler incelendiğinde öncelikli olarak dolgu maddelerinin yapıda farklılık oluşturduğu ve çarpma açısındaki değişimin erozyon oranını önemli derecede etkilediği sonucuna varılmıştır.



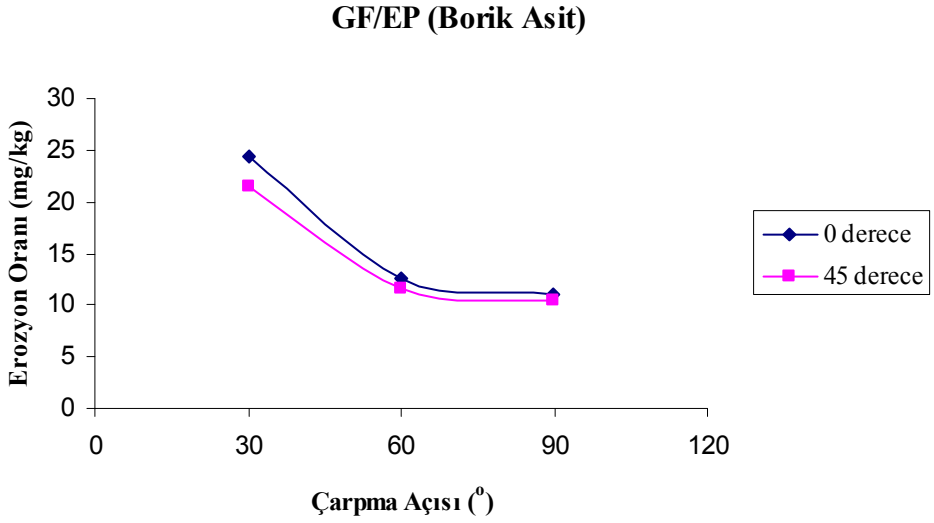

**Şekil 5.21.** Tüm deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈200 µm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

Grafikleri detaylandırdığımızda saf GF/EP deney numuneleri referans alındığı zaman 0° fiber doğrultusu için Boraxlı GF/EP deney numunelerinde erozyon oranı %275,5 artış göstererek en olumsuz etkiyi ortaya koymuş olup Borik Asitli GF/EP numunelerde ise %192,9 luk bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte Silisyum Oksitli GF/EP deney numuneleri, erozyon oranında %7,9 luk bir azalma sağlamış olup Alüminyum Oksitli GF/EP deney numuneleri ise %9,8 lik bir azalma ortaya çıkarmıştır. Ayrıca 45° fiber doğrultusunda, 0° fiber doğrultusuna göre erozyon oranında saf GF/EP deney numunelerinde %15,2; Borik Asitli GF/EP numunelerde %4,7; Boraxlı GF/EP numunelerde %11,8; Silisyum Oksitli GF/EP numunelerde %14,2 ve Alüminyum Oksitli GF/EP numunelerde ise %8,7 lik bir azalma görülmüş olup fiber doğrultusunun erozyon oranı üzerine önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Çarpma hızının da 53 m/s'ye çıkarılması erozyon direncinin azalmasına sonuç olarak erozyon oranının artmasına sebep olmuştur.

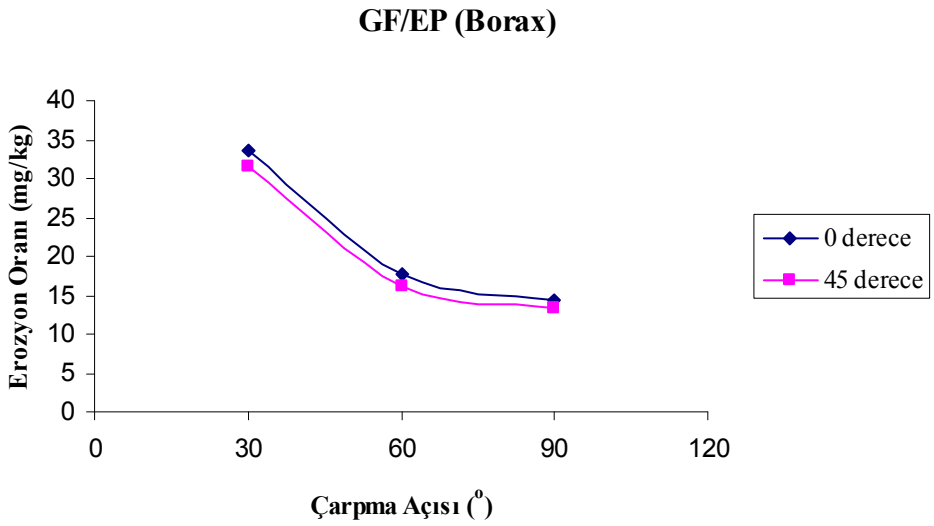
Şekil 5.22., Şekil 5.23., Şekil 5.24., Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'daki grafikler tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızında, ≈400 μm alümina etkisinde 0° ve 45° fiber doğrultularındaki çarpma açısı–erozyon oranı değişimlerini göstermektedir.



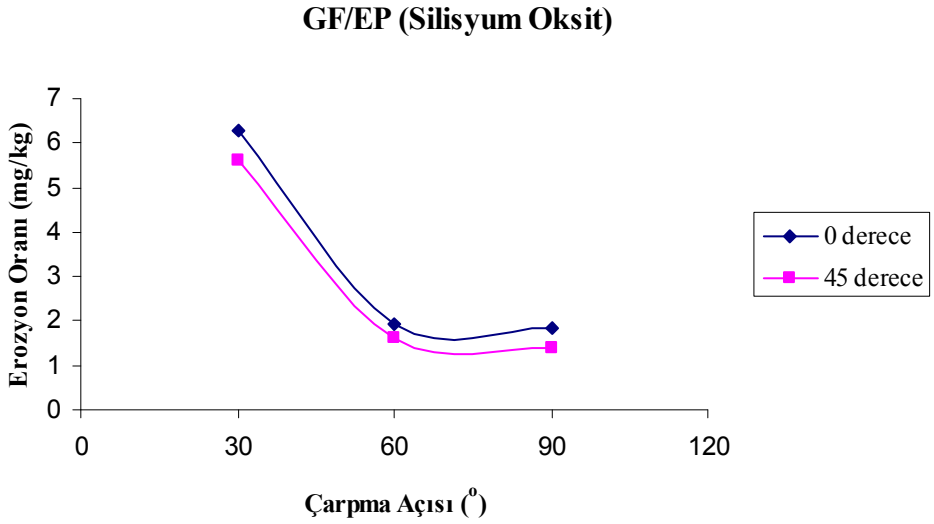

**Şekil 5.22.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



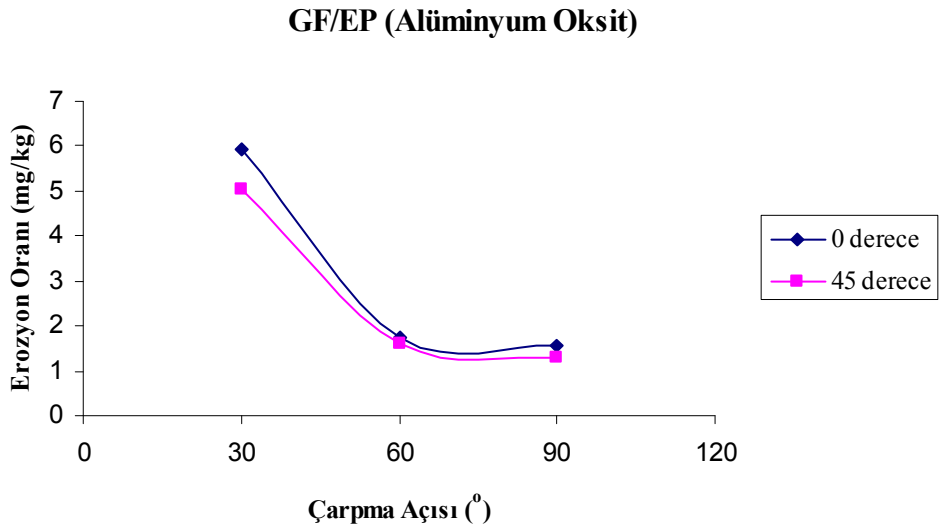

**Şekil 5.23.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.24.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.25.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

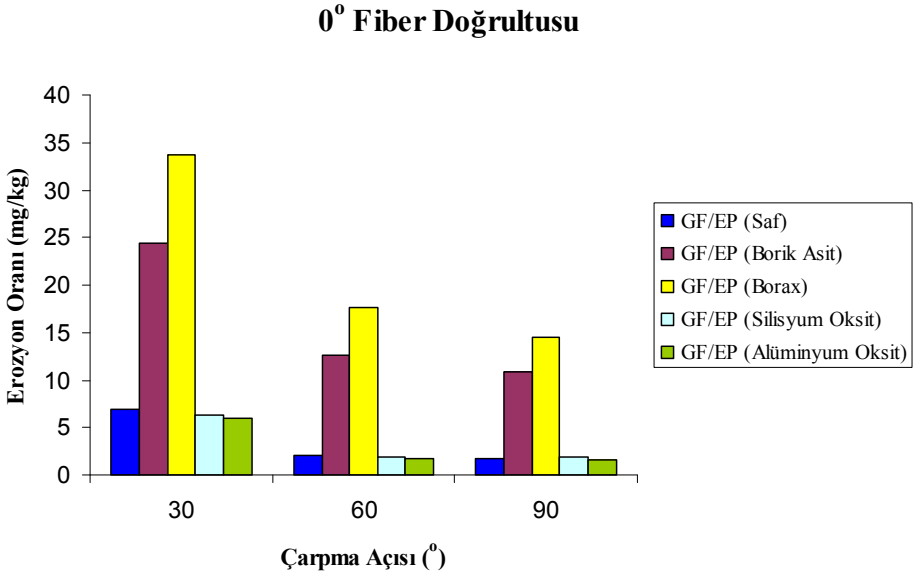



**Şekil 5.26.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, 400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

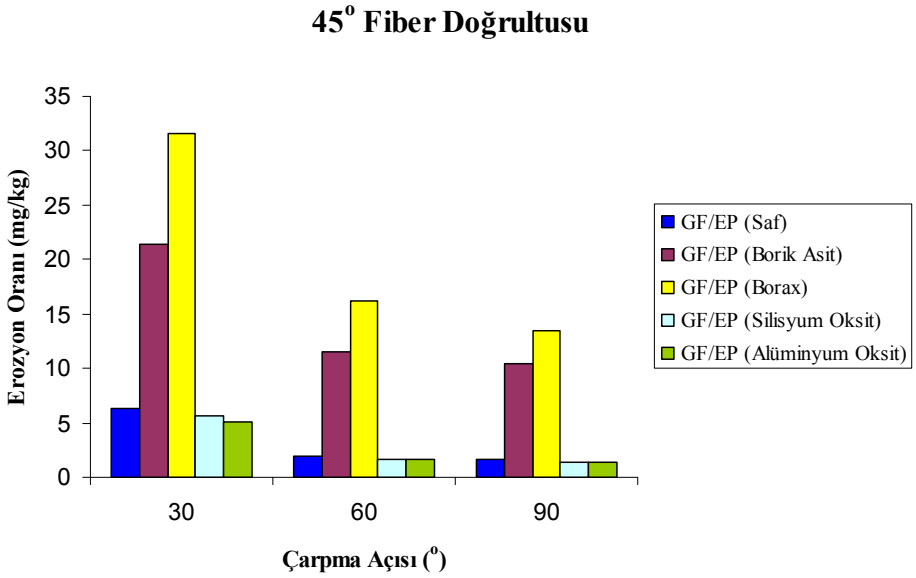
Her bir deney numunesi için ayrı ayrı oluşturulan grafikler, Şekil 5.27. ve Şekil 5.28.'de bir araya getirilerek 23 m/s çarpma hızında, ≈400 μm alümina etkisi altında 0° ve 45° fiber doğrultuları için çizilmiştir. Bu grafiklerin bundan önce açıklanan deneysel sonuçlara bağlı grafiklerden farkı, aşındırıcı partikül boyutunun arttırılmasının etkisi üzerine olmuştur. Aşındırıcı partikül boyutundaki bu iki katı artış deney numunelerinde farklı oranlarda artışlar oluşturmuş olup tüm numunelerin erozyon oranı değerlerini arttırmıştır. ≈400 μm alümina etkisinde gerçekleştirilen deneyler sonunda 0° fiber doğrultusu için yapılan değerlendirmede ≈200 μm alüminaya göre saf GF/EP deney numunelerinin erozyon oranı %37,1 artmıştır. Borik Asitli GF/EP numunelerde %29,5; Boraxlı GF/EP numunelerde %36,4; Silisyum Oksitli GF/EP numunelerde %28,7 ve Alüminyum Oksitli GF/EP numunelerde de %39,1 lik artışlar gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar göstermiştir ki aşındırıcı partikül boyutundaki artış, aşınma üzerinde olumsuz bir etki yapmıştır. Ayrıca Borax ve Borik Asit ilaveli deney numuneleri aşınmaya olumsuz, Alüminyum Oksit ve Silisyum Oksit ilaveleri de aşınmaya olumlu yönde katkı sağlamıştır.

Fiber doğrultusunun 0° den 45° ye değiştirilmesi ile her bir deney numunesi için farklı oranlarda olmakla birlikte genel olarak erozyon oranının bu durumdan olumlu

etkilendiği görülmüştür. Bu sonuca ilave olarak yapılan bu deneysel şartlar için 30° çarpma açısında tüm numuneler maksimum erozyon oranı sergilemiştir.

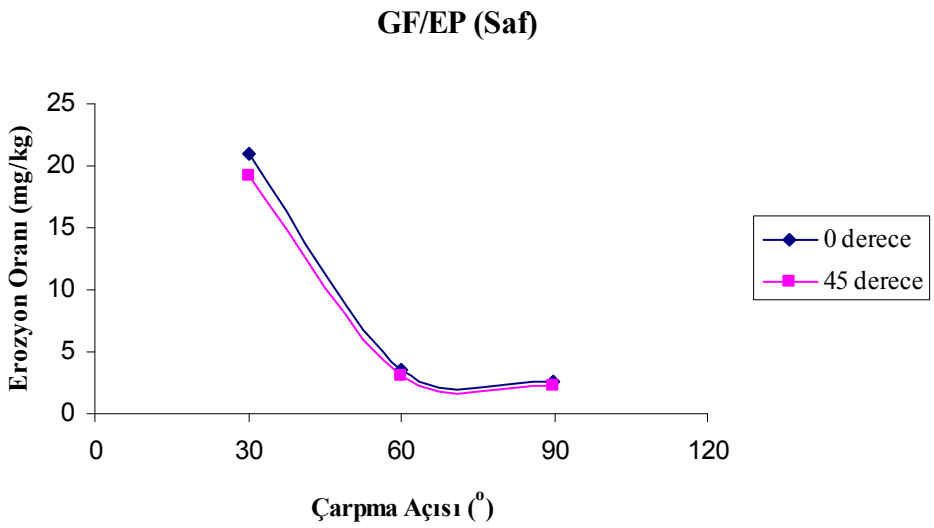



**Şekil 5.27.** Tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

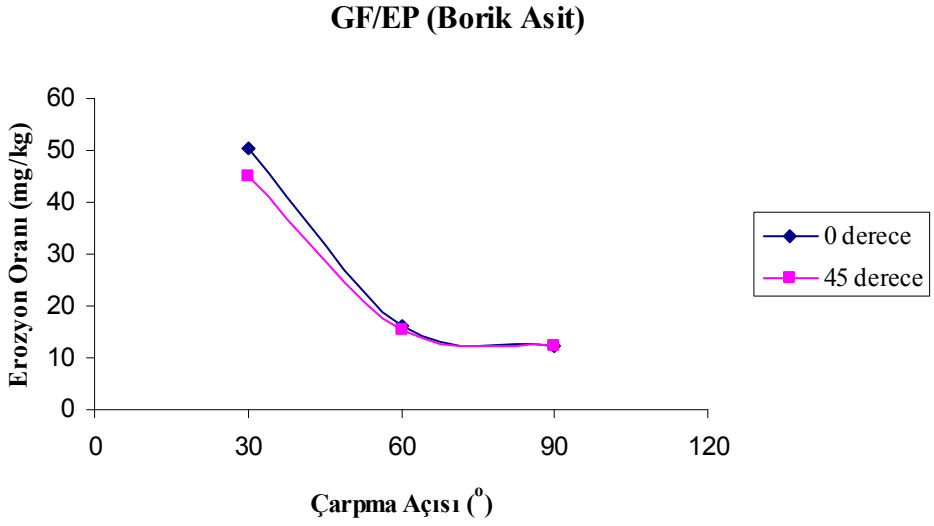



**Şekil 5.28.** Tüm deney numunelerinin 23 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

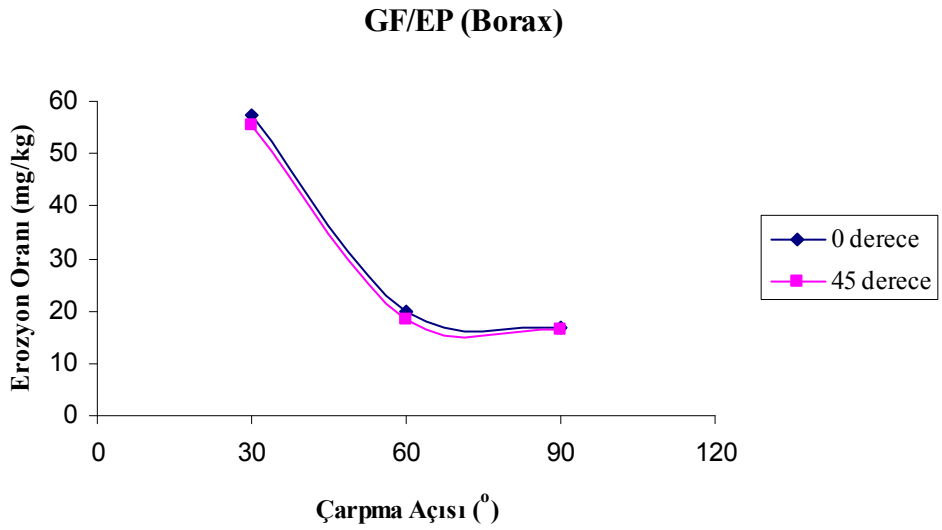
Şekil 5.29., Şekil 5.30., Şekil 5.31., Şekil 5.32. ve Şekil 5.33.'deki grafikler ise katkısız GF/EP, Borik Asit parçacık katkılı GF/EP, Borax parçacık katkılı GF/EP, Silisyum Oksit parçacık katkılı GF/EP ve Alüminyum Oksit parçacık katkılı GF/EP deney numunelerindeki değişimleri göstermektedir. Grafiklerdeki temel fark çarpma hızının 34 m/s ve aşındırıcı partiküllerin de ≈400 μm luk alüminalar olmasıdır.



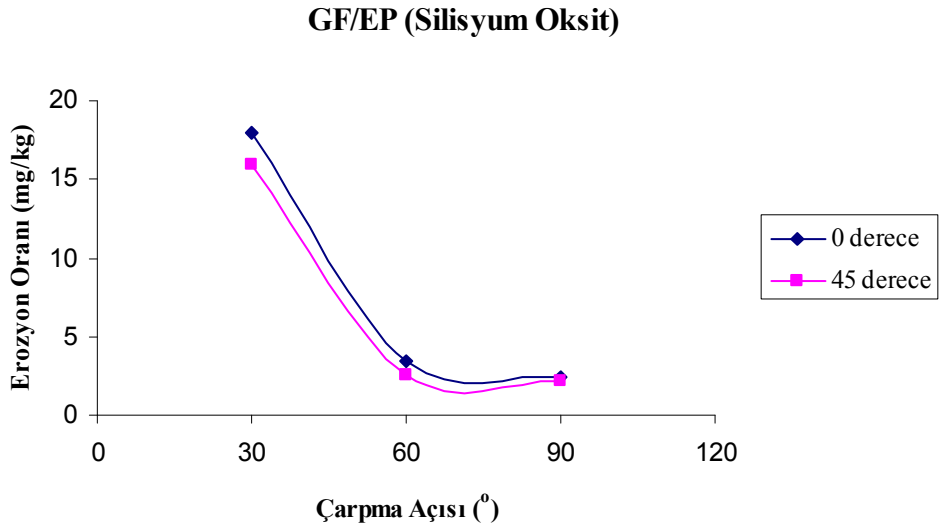

**Şekil 5.29.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



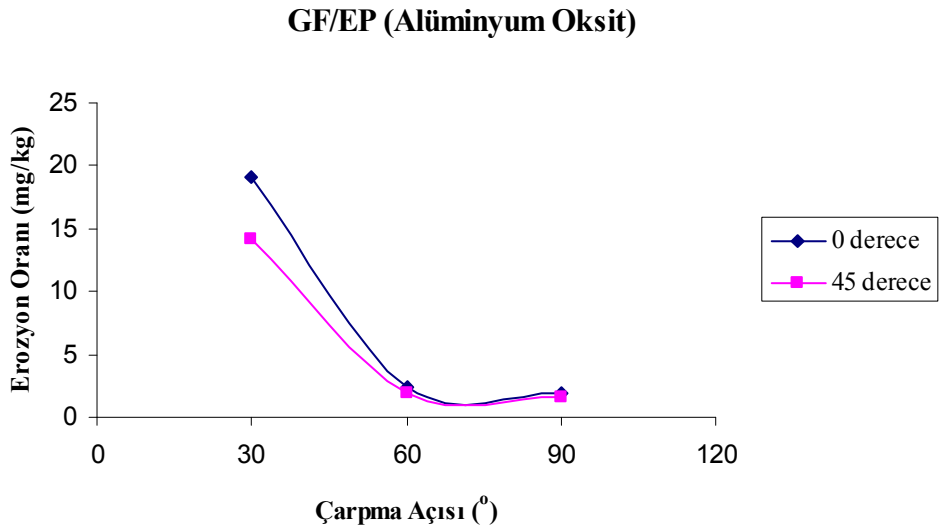

**Şekil 5.30.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.31.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



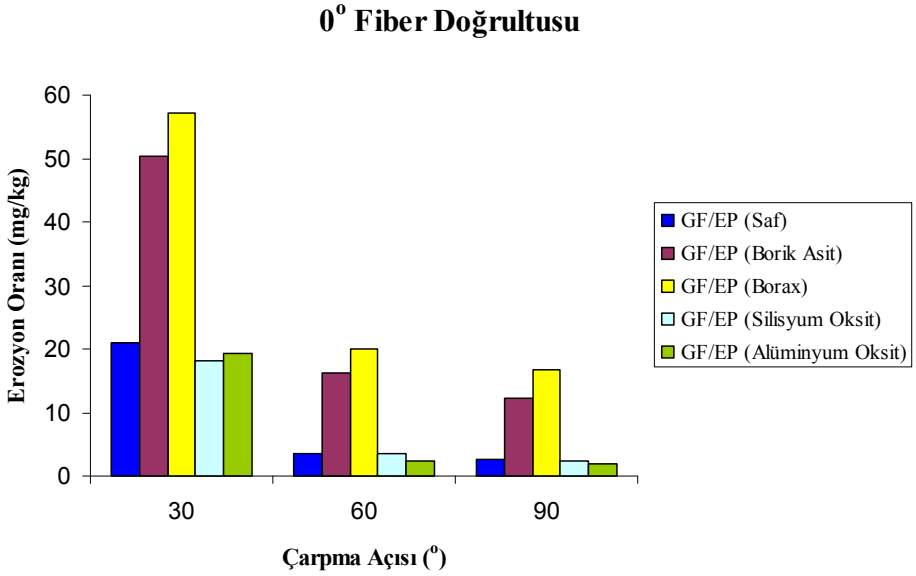

**Şekil 5.32.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



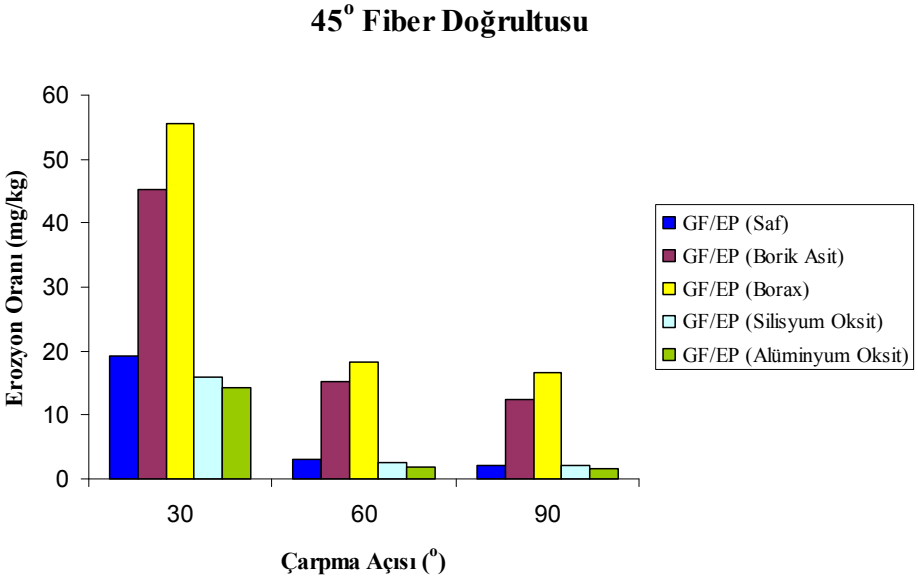

**Şekil 5.33.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, 400 µm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

Oluşturulan bu grafiklerde çarpma hızının sonuçlar üzerindeki etkisi detaylandırıldığında aynı aşındırıcı partikül boyutu için 23 m/s çarpma hızına göre saf haldeki deney numuneleri için erozyon oranında %202,7; Borik Asit ilavesi ile oluşturulmuş numunelerde %106,1; Borax katkılı numunelerde %69,6; Silisyum Oksit ilaveli numunelerde %187,4 ve Alüminyum Oksit dolgu maddeli deney numunelerinde ise %222,8 lik artışlar meydana gelmiştir.

Şekil 5.34. ve Şekil 5.35.'de ise tüm deney numunelerine ait grafikler birleştirilmiş ve iki farklı fiber doğrultusu için ayrı ayrı grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerde Boraxlı GF/EP ve Borik Asitli GF/EP deney numuneleri, saf GF/EP deney numunelerinden daha fazla erozyon oranı sergilerken Silisyum Oksitli GF/EP ve Alüminyum Oksitli GF/EP deney numuneleri ise saf GF/EP deney numunelerinden daha az erozyon oranı sergilemiştir. Bu sonuçlara ilave olarak çarpma açısının azalması (90° den 30° ye düşme) ile erozyon oranında meydana gelen değişimin deneylerde etkisi araştırılan diğer değişkenlere (çarpma hızı, aşındırıcı partikül boyutu ve fiber doğrultusu) göre daha baskın bir sonuca sebep olduğu görülmüştür.



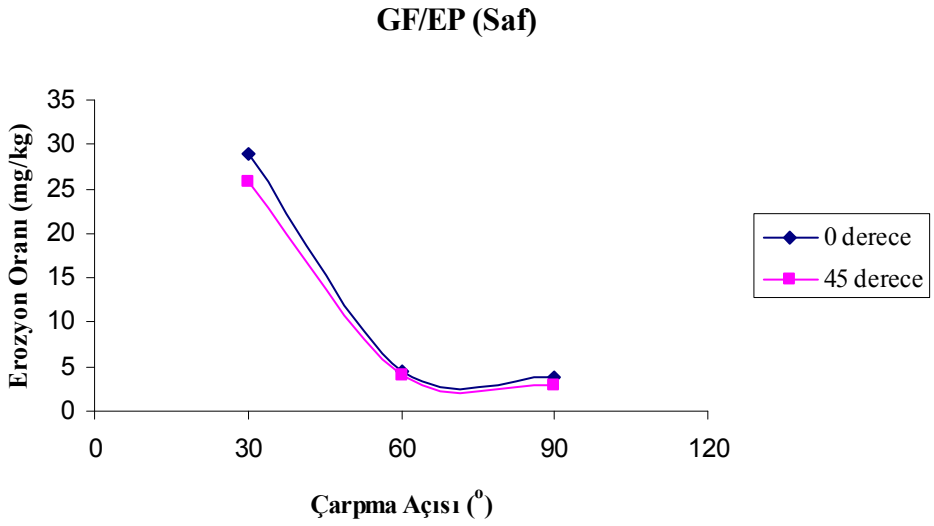

**Şekil 5.34.** Tüm deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 µm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması



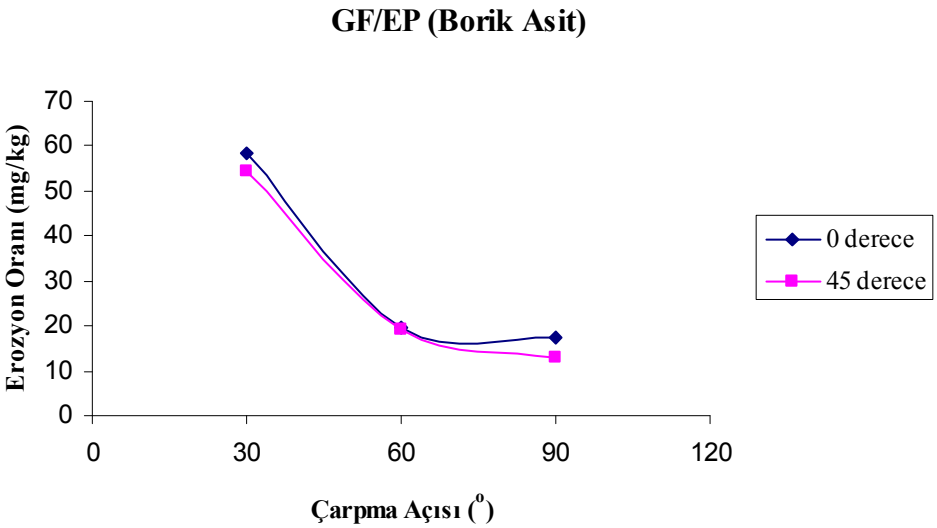

**Şekil 5.35.** Tüm deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, ≈400 µm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.36., Şekil 5.37., Şekil 5.38., Şekil 5.39. ve Şekil 5.40.'daki grafiklerde deneysel çalışmada incelenen tüm deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızında, 400 µm ortalama çapa sahip aşındırıcı alümina parçacıkların etkisinde 0° ve 45° fiber

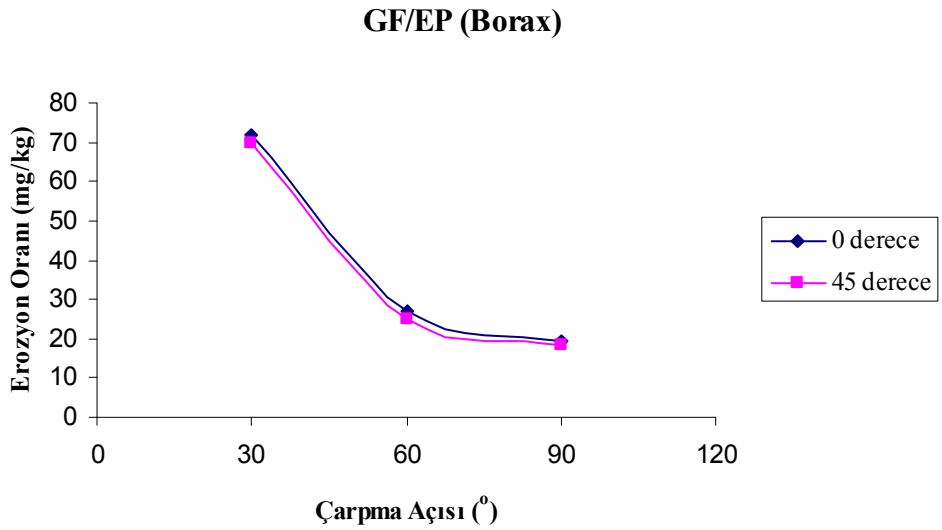
doğrultuları için çarpma açısı–erozyon oranı değişimleri verilmiştir. Şekil 5.41. ve Şekil 5.42.'de ise aynı çarpma hızı ve aşındırıcı partikül boyutuna karşılık gelen değişiklikler tüm deney numuneleri için birleştirilmiş olup 0° ve 45° fiber doğrultuları için ayrı ayrı grafikler oluşturulmuştur.



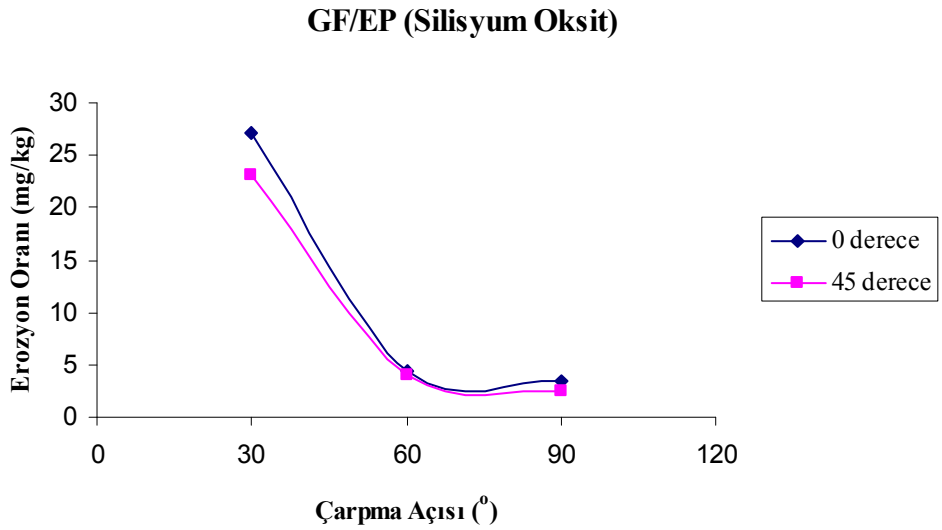

**Şekil 5.36.** GF/EP (Saf) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi



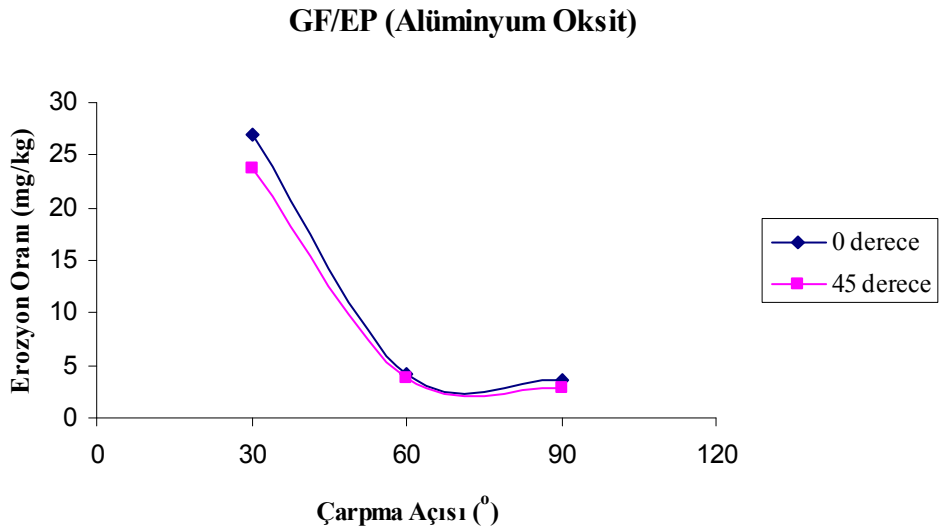

**Şekil 5.37.** GF/EP (Borik Asit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.38.** GF/EP (Borax) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi




**Şekil 5.39.** GF/EP (Silisyum Oksit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

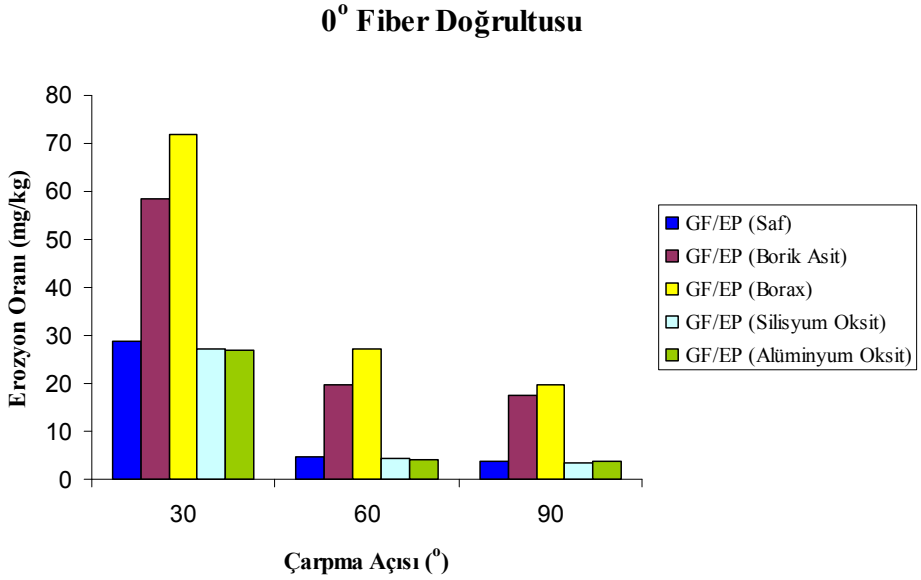



**Şekil 5.40.** GF/EP (Alüminyum Oksit) deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, 400 μm alümina ve fiber doğrultularındaki (0° ve 45°) çarpma açısı–erozyon oranı ilişkisi

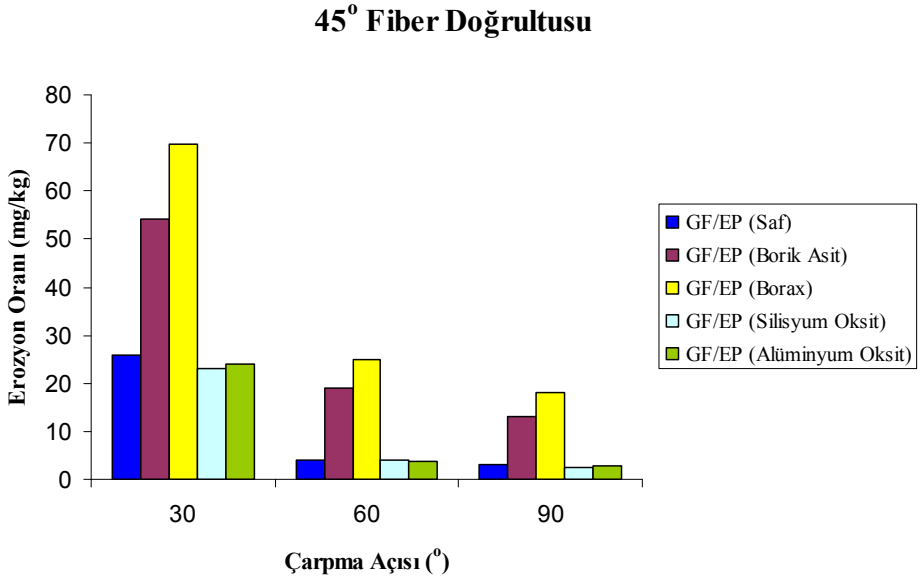
53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve 0° fiber doğrultusuna ait grafikler incelendiğinde Borax katkılı GF/EP deney numunelerinin erozyon oranı katkısız GF/EP numunelerin erozyon oranından %149,2 fazla bulunmuş olup Borik Asit katkılı GF/EP numunelerde de %102,1 fazla erozyon oranı elde edilmiştir. Bunlara ilave olarak Silisyum Oksit katkılı GF/EP numunelerin erozyon oranı katkısız GF/EP numunelerin erozyon oranından %5,8 eksik çıkmakla birlikte Alüminyum Oksit katkılı GF/EP deney numunelerinin erozyon oranında da %6,7 lik bir azalma meydana gelmiştir.

Bu duruma ait yapılan deneyler göstermiştir ki dolgu maddeleri arasında erozyon aşınmasına en olumlu etkiyi Alüminyum Oksit sağlarken en olumsuz etki de Borax dolgularda gerçekleşmiştir.

Yapıya ilave edilen dolgu maddelerinden Borik Asit ve Borax'ın matris ile elyaf bileşimi sonucu oluşan ara yüzeydeki bağ oluşumunda daha pasif olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit katkı maddelerinin ise bu yeni oluşan ara yüzeyde daha olumlu bir etkileşim meydana getirdiği şeklinde yorumlanmıştır.




**Şekil 5.41.** Tüm deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve 0° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması




**Şekil 5.42.** Tüm deney numunelerinin 53 m/s çarpma hızı, ≈400 μm alümina ve 45° fiber doğrultusundaki çarpma açısı–erozyon oranı ilişkilerinin karşılaştırılması

Fiber doğrultusunun etkisini incelemek amacıyla deneylerde elde edilen sonuçlar yorumlandığında 45° fiber doğrultusunda, 0° fiber doğrultusuna göre erozyon oranında saf GF/EP deney numunelerinde %10,4; Borik Asitli GF/EP numunelerde %6,8; Boraxlı GF/EP numunelerde %2,9; Silisyum Oksitli GF/EP numunelerde %14,9 ve Alüminyum Oksitli GF/EP numunelerde ise %11,5 lik azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlardan fiber doğrultusunun değiştirilmesinin erozyon aşınması üzerine önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneylerde kullanılan aşındırıcı partikül boyutunun ≈200 μm'den ≈400 μm' ye çıkarılmasıyla da deneylerde elde edilen erozyon oranı değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Bu artışlar saf numuneler için %82,3; Borik Asit katkılı numuneler için %25,7; Borax katkılı numuneler için %21,1; Silisyum Oksit katkılı numuneler için %86,4 ve Alüminyum Oksit katkılı numuneler için %88,5 civarında gerçekleşmiş olup sonuçlar aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranını etkileyen önemli bir değişken olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Çarpma hızının da 23 m/s'den 53 m/s'ye çıkarılması deneylerdeki erozyon direncinin önemli derecede azalmasına sonuç olarak erozyon oranının artmasına sebep olmuştur. Çarpma hızındaki bu artış, katkısız GF/EP numunelerde %315,2; Borik Asit katkılı GF/EP numunelerde %139,2; Borax katkılı GF/EP numunelerde %113,5; Silisyum Oksit katkılı GF/EP numunelerde %333,3 ve Alüminyum Oksit katkılı GF/EP numunelerde ise %353,2 seviyelerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar göstermiştir ki erozyon aşınması için çarpma hızındaki artış aşındırıcı partikül boyutundaki artıştan çok daha olumsuz sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Çarpma açısı, çarpma hızı, aşındırıcı partikül boyutu, fiber doğrultusu ve farklı dolgu maddelerinin (Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit) etkisilerini incelemek için yapılan erozyon aşınması deneyleri sonunda aşınmış deney numunelerinin fotoğraf görüntüleri EK–7'de verilmiştir. Bu görüntülerin birbirleri ile olan karşılaştırmaları ve literatürde yapılan benzer çalışmalarla mukayeseleri aşağıda yapılmıştır.

## 5.1. Çarpma Açısının Etkisi

Kullanılan aşındırıcı partiküllerin etkisiyle her üç çarpma açısı için de deney numunelerinin yüzeylerinde düzensiz pürüzlülükler ortaya çıkmıştır. EK–7'deki fotoğraf görüntülerindeki üç çarpma açısının kıyaslaması yapıldığında 30° lik çarpma açısı yüzeyler üzerinde en fazla deformasyona sebep olan açı olarak gözlemlenmektedir. 30° lik çarpma açısında karşılaşılan bu olumsuz durum şu şekilde yorumlanabilir.

Aşındırıcı partiküller eğik açılarda (30° gibi) numuneye çarptığı zaman, çarpma kuvveti iki bileşene ayrılmıştır. Bunlardan birincisi malzemenin yüzeyine teğet ($F_t$), ikincisi ise normal ($F_n$) olarak etki etmektedir. ($F_t$) aşındırıcılar tarafından kontrol edilmekte, ($F_n$) ise çarpma olayının etkisi altında kalmıştır. Çarpma açısı 90° ye doğru yaklaştıkça teğetsel kuvvetin ($F_t$) etkisi azalmıştır. Normal çarpma durumunda (90°) ise tüm kullanılabilir enerji, çarpma ve kinetik enerji kaybı olarak ortaya çıkmıştır. Yüzey üzerinde etkili olan bu teğetsel kuvvetin sünek malzemeler üzerinde microcutting (küçük çiziklere), microploughing (küçük sıyrıklara) ve plastik deformasyona sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir numune için aynı şartlardaki üç açı değeri karşılaştırıldığında çarpma açısının büyümesi ile yüzeydeki deformasyon daha ılımlı bir hal almıştır. Yani malzeme yüzeyinde daha yoğun bir plastik deformasyondan ziyade genel olarak küçük çizikler, sıyrıklar ve oyuklar gözlemlenmiştir. Oysa çarpma açısının küçülmesi ve buna bağlı olarak teğetsel kuvvetin baskınlığının artmasıyla yüzeydeki olumsuz etki artmış olup oyuklar derinleşmiş ve ağırlık kaybı artmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlara benzer eğilim önceki araştırmacılarda da görülmüştür. Çarpma açısı ($\alpha$) ile erozyon oranındaki ($E$) değişime bağlı olarak sünek ve gevrek malzeme ayrımı geniş bir çarpma açısı aralığında sınıflandırılmıştır (Tsiang ve ark., 1989). Bu sınıflandırmada sünek davranış, maksimum erozyon oranının düşük çarpma açılarında ($15°<\alpha<30°$) olduğu durumlar için tanımlanmıştır (Pool ve ark., 1986). Diğer taraftan maksimum erozyon oranı normal çarpma durumunda ($\alpha=90°$ de $E_{max}$) ortaya çıkıyorsa bu durum malzemelerin gevrek davranış sergilediğini gösterir (Barkoula ve Karger-Kocsis, 2002). Takviyeli kompozit malzemelerde ise maksimum erozyon oranının aradaki açılarda ($45°<\alpha<60°$) meydana gelmesiyle yarı sünek davranış sergilediği sonucuna varılmıştır (Tewari ve ark., 2003). Ancak yukarıdaki

sınıflandırmalar çarpma açısı, çarpma hızı, fiber yönlenmesi, çevresel şartlar, test şartları, aşındırıcının şekli, sertliği ve boyutu gibi erozyon şartlarına kuvvetli bir şekilde bağlı olan malzemelerin erozyon davranışı için kesin değildir. Dolayısıyla çarpma hızı, çarpma açısı, partikül akışı ve aşındırıcı partikül özellikleri (şekli, sertliği ve boyutu vs.) gibi erozyon şartlarının değişmesiyle bir malzeme hem sünek hem de gevrek davranış gösterebilmektedir (Hutchings, 1992).

Bu genel literatür araştırmaları ve yapılan deneysel şartlar referans alınarak çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde deney numunelerinin sünek malzemelerin erozyon aşınmasına benzer bir eğilim sergilediği sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Çarpma Hızının Etkisi

Çarpma hızının erozyon aşınması üzerindeki etkinliğinde temel faktör aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisinin değişmesidir. Yani daha yüksek hız ve dolayısıyla daha yüksek kinetik enerji ile kompozit malzemenin yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküller, matrisi daha kolay koparmış ve elyafların daha fazla kırılmasına sebep olmuştur. EK–7 deki aşınmış deney numuneleri incelendiğinde, numunelerin sadece çarpma hızının arttırılması (23, 34 ve 53 m/s dönüşümü) ile numune yüzeylerindeki deformasyonların daha belirgin bir hal aldığı görülmüştür.

Arjula ve ark. (2008) yaptıkları çalışmalarında da tüm çarpma açıları için çarpma hızının artmasının erozyon oranını artırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca erozyon oranı ($E$) ile çarpma hızı ($\nu$) arasında $E = k * \nu^n$ bağıntısı elde edilmiştir (buradaki k bir sabit, n ise hız üssüdür) (Tilly ve ark., 1970).

## 5.3. Elyaf Yönlenmesinin Etkisi

Bugüne kadar kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda fiber doğrultusunun erozyon aşınması üzerine etkisi sınırlı bir aralıkta incelenmiştir (Barkoula ve ark., 2000; Miyazaki ve ark., 1996). Bu konu üzerine çalışan ilk araştırmacılar, anizotropinin takviyeli kompozitlerin erozyon davranışını etkidiğini belirlemiş olup erozyon oranının da elyaf doğrultusuna açıkça bağlı olduğuna işaret etmişlerdir (Pool ve ark., 1986; Häger ve ark., 1995).

Fiber doğrultusundaki değişimin erozyon aşınmasına etkisinin de incelendiği bu çalışmada genel olarak 0/90 [0º fiber doğrultusu] epoksi kompozitlerde 45/-45 [45º fiber doğrultusu] epoksi kompozitlerden daha fazla erozyon oranı değerleri elde edilmiştir.

Aşındırıcı partiküllerin çarptığı yüzeydeki paralel ve dik bileşenden oluşan çift yönlü dokuma ile açılı bir yapıya sahip çift yönlü dokuma karşılaştırıldığı zaman açılı iç yapıya sahip dokumanın aşınmaya daha fazla engel oluşturduğu ve erozyon oranının daha düşük seviyede kalmasını sağladığı sonucuna varılmıştır.

Aşındırıcı partiküllerin uygulanış yönü ile elyafların yönlenmesinin birbirine paralel ve dik bileşenlerden oluştuğu 0/90 elyaf yapısı durumunda, matris malzemenin kaldırılmasından sonra aşındırıcı partikül çarpma kuvveti doğrudan elyaflara etki etmiş ve bu etki sonucunda da elyaflarda eğilme momentleri oluşmuştur. Aşındırıcı akışının devamıyla birlikte numunelerden elyaf kopmaları daha kolay hale gelmiştir.

Aşındırıcı etkisine açılı bir tepki gösteren 45/-45 elyaf yapısında ise eğilme momenti iki bileşene ayrılmıştır. Bunun sonucunda da elyafların maruz kaldığı normal kuvvet değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Sonuç olarak, 0º fiber doğrultusuna göre erozyon aşınmasına daha dirençli bir yapı ortaya çıkmıştır.

### 5.4. Sertlik ve Çekme Mukavemetinin Etkisi

Test edilecek malzemelerin özelliklerine bağlı olarak erozyon aşınmasındaki değişimin incelendiği literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Özellikle düşük sertlik değerine sahip metallerde erozyon oranı, sertlik ile ters orantılıdır. Bununla birlikte, iyi bilinen bir gerçek ise polimerlerin sertliğinin aşınma üzerinde olumlu ve olumsuz yönde belirgin bir etkisinin anlaşılmasının zorluğudur. Polimerler için farklı eğilimlerin gözlemlenmesi bu durumun ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Tüm bu verilerden yola çıkarak polimer erozyonunda sertliğin aşınmayı kontrol eden bir özellik olmadığı sonucu çıkarılmaktadır. Düşük sertlik değerine sahip bir polimer, matrisin elastik deformasyonu için aşındırıcı partiküllerin çarpma enerjisinin büyük bir miktarını absorbe eder. Bununla birlikte, plastik deformasyon, çatlak başlangıcı, bölgesel kırılma ve sonuçta ortaya çıkan erozyon aşınması için ise çarpma enerjisinin az bir miktarının kullanılmasına sebep olur (Friedrich, 1986).

Yapılan birbaşka çalışmada ise takviyesiz sekiz elastomer kullanılmış olup bu elastomerlerin ana yapısının, camsı geçiş sıcaklığı, abrasif aşınma direnci veya sertlik, çekme mukavemeti, maksimum uzama gibi mekanik özelliklerle ilişkili olmadığı sonucuna varılmıştır (Hutchings ve ark., 1987).

Sonuç olarak, sertliğin erozyon direnci ile yeterli bir ilişki sağlamamasının yani olumlu (Walley ve ark., 1984) ve olumsuz (Brandstadter ve ark., 1991) belirgin bir sonucunun olmamasının nedeni, kaldırılan toplam hacmi değil de sadece bir partikül tarafından kaldırılan hacmi belirlemesinden kaynaklandığı kabul edilmiştir. Sertliğin erozyon aşınmasında ortaya koyduğu bu farklılık yapılan deneysel çalışmada da gözlemlenmiştir. Dolgu maddesi ilavesi ile sertlik değerleri düşen Borik Asit ve Borax dolgu maddeli numunelerin sertlik değerlerinin düşmesi ile erozyon oranı değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Bununla birlikte ana yapıya katılan Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit ilaveleri de deney numunelerinin sertlik değerlerinde düşüşe sebep olmuş fakat erozyon direncinde artış sağlamıştır. Bu durum literatürdeki çalışmalarda da (Kulkarni ve ark., 2001) gözlemlenmiş olup dolgu maddelerinin yapı içerisinde boşluk oluşumuna sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Yapıda boşlukların varlığı numunelerin sertliklerinde farklılığın oluşmasında etkili olmuştur. Yapıda hava kabarcıkları ve boşlukların oluşumu pratikte kaçınılmazdır. Boşluklar sadece gerilme taşıma alanını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda çatlakları başlatan gerilme tetikleyiciler gibi rol oynamıştır. Ayrıca bu etkilere bağlı olarak deney numunelerinin çekme mukavemeti değerlerinde de azalmalar görülmüştür.

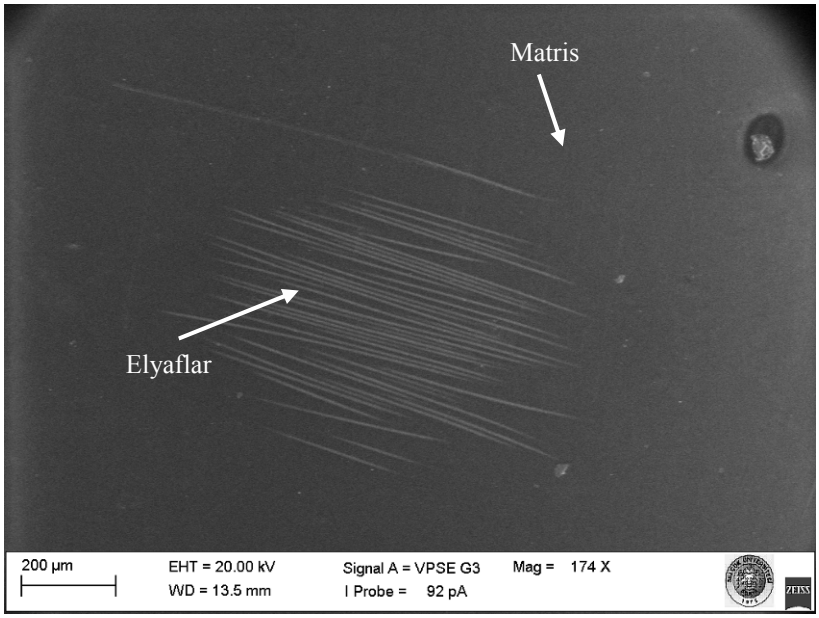
### 5.5. Aşınmış Yüzeylerin SEM Analizi

Aşınan yüzeyin morfolojisini karakterize etmek ve malzeme kaldırma mekanizmasını anlamak için aşınan numuneler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. İncelenecek numune yüzeylerinin şarj olmasını engellemek amacıyla VPSE (Değişken Basınç İkincil Elektron) dedektörü kullanılmıştır. Daha sonra bu numuneler SEM cihazı içerisinde konumlanacakları gümüş plaka üzerine yapıştırılarak sabitlenmiştir. Yerleştirilme işlemi tamamlandıktan sonra SEM cihazından mikro boyutta fotoğraf almadan önce numunelerin iletkenliğini sağlamak amacıyla incelenecek numunelerin yerleştirildiği cihaz iç ortamı vakumlanmıştır. Böylece yüzeylerden alınan görüntülerin kalitesinin arttırılması amaçlanmıştır.

Kompozitlerdeki erozyon aşınması üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda elyaf takviyeli polimerler yer almakta iken dolgu takviyeli kompozitler ise daha az bir aralıkta inceleme alanı bulmuştur. Çünkü bu kompozitlerin erozyon mekanizmalarını, bileşenlerinin özelliklerini ve ara yüzey etkileşimlerini anlamak kolay olmadığı için bu kompozitlerin erozyon aşınma davranışları sınırlı sayıda çalışmada konu edilmiştir (Srivastava ve ark., 1988; Zahavi ve ark. 1981).

Dolgu maddesi kullanarak malzeme maliyetini azaltma ve mukavemet değerlerinde artış sağlama amacıyla yapılan bu tez çalışmasında dolgu maddelerinin erozyon aşınmasındaki etkinliği ile ilgili olarak aşağıdaki SEM görüntüleri elde edilmiştir.

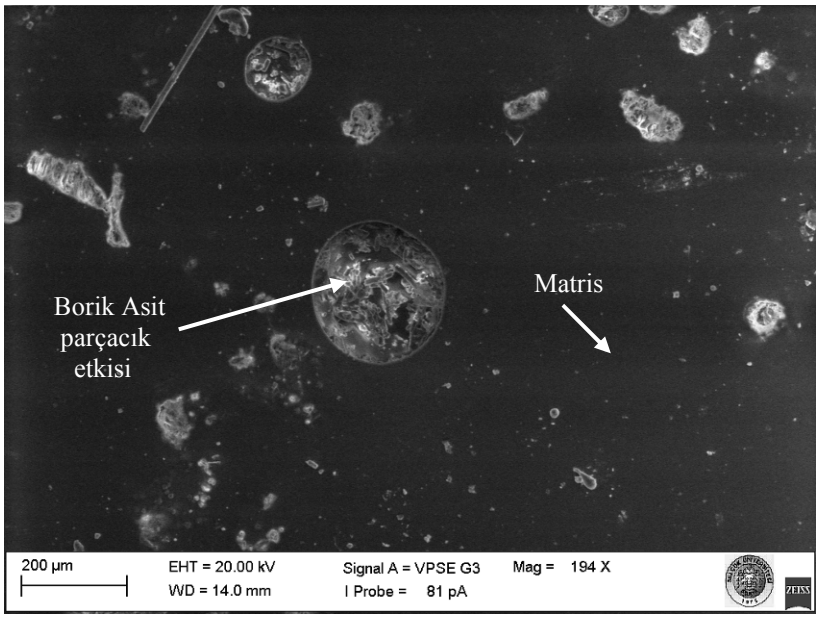
Şekil 5.43., Şekil 5.44., Şekil 5.45., Şekil 5.46. ve Şekil 5.47.'de saf, Borik Asit katkılı, Borax katkılı, Silisyum Oksit katkılı ve Alüminyum Oksit katkılı cam elyaf takviyeli epoksi deney numunelerinin herhangi bir erozyon aşınmasına maruz kalmadan önceki SEM görüntüleri verilmiştir.



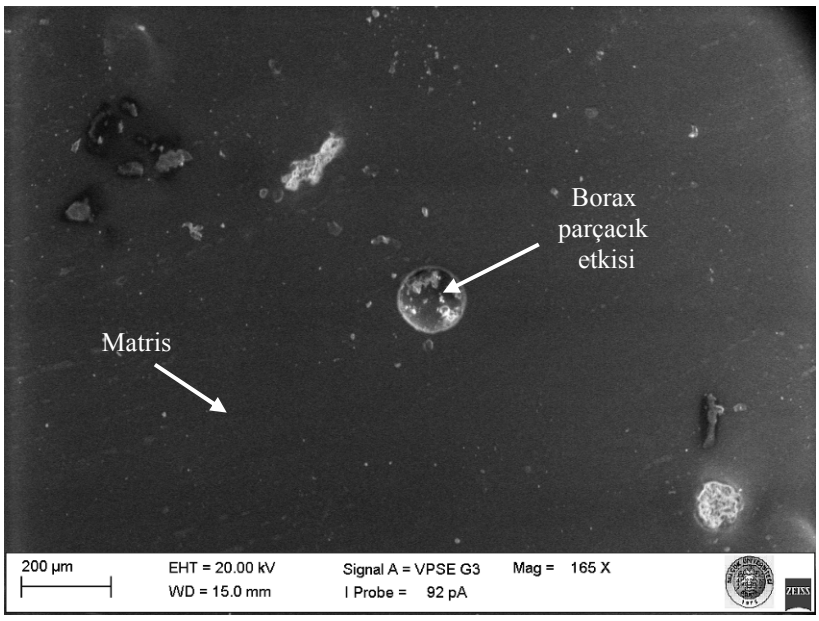

**Şekil 5.43.** Saf GF/EP deney numunesinin aşınma öncesindeki SEM görüntüsü

Herhangi bir dolgu maddesi ilave edilmemiş saf cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerle dolgu maddesi ilave edilmiş kompozit malzemelerin SEM

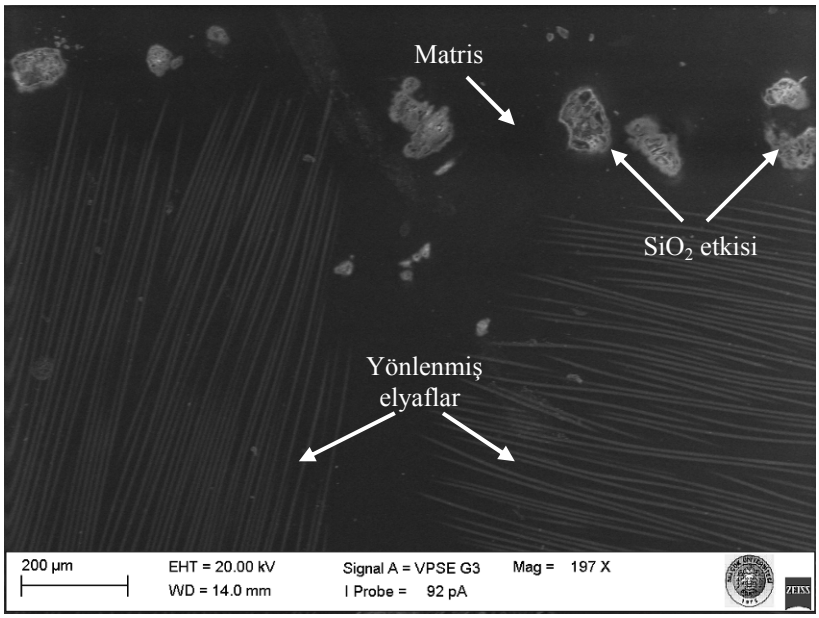
görüntüleri karşılaştırıldığında yeni oluşan kompozit malzemelerde yapıya ilave edilen dolgu maddeleri ayırt edilebilmektedir. Yani yapıdaki ilave bir katkının varlığı belirgin bir hal almıştır.



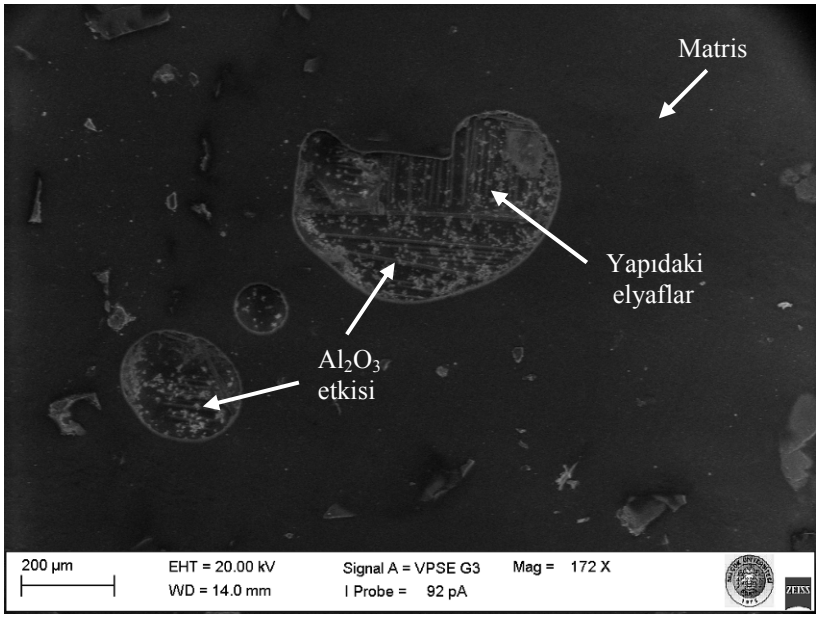

**Şekil 5.44.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin aşınma öncesindeki SEM görüntüsü




**Şekil 5.45.** Boraxlı GF/EP deney numunesinin aşınma öncesindeki SEM görüntüsü

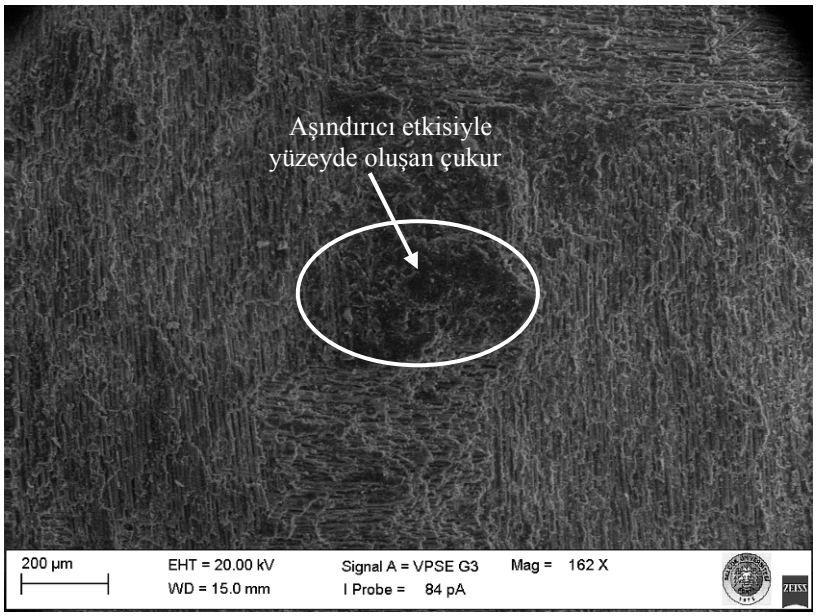



**Şekil 5.46.** Silisyum Oksitli GF/EP deney numunesinin aşınma öncesindeki SEM görüntüsü



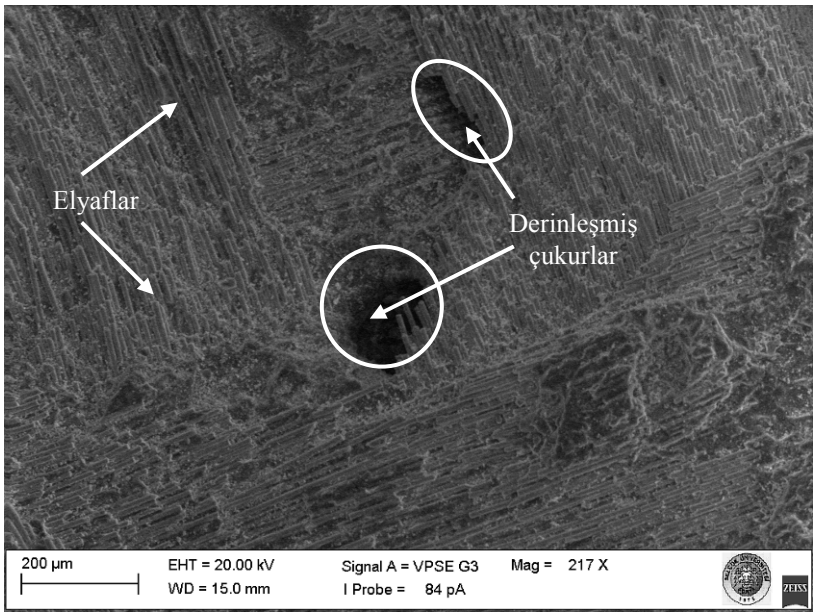

**Şekil 5.47.** Alüminyum Oksitli GF/EP deney numunesinin aşınma öncesindeki SEM görüntüsü

Aşınmadan önceki SEM görüntülerinde sadece dolgu maddelerinin varlığı gözlemlenirken yapıya ilave edilen Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit dolgu maddelerinin erozyon aşınması üzerine nasıl bir etki oluşturduğunu belirlemek amacıyla 34 m/s çarpma hızı, 90° çarpma açısı, 400 µm aşındırıcı boyutu ve 0° fiber doğrultusu için Şekil 5.48., Şekil 5.49., Şekil 5.50., Şekil 5.51. ve Şekil 5.52.'de aşınmış deney numunelerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.

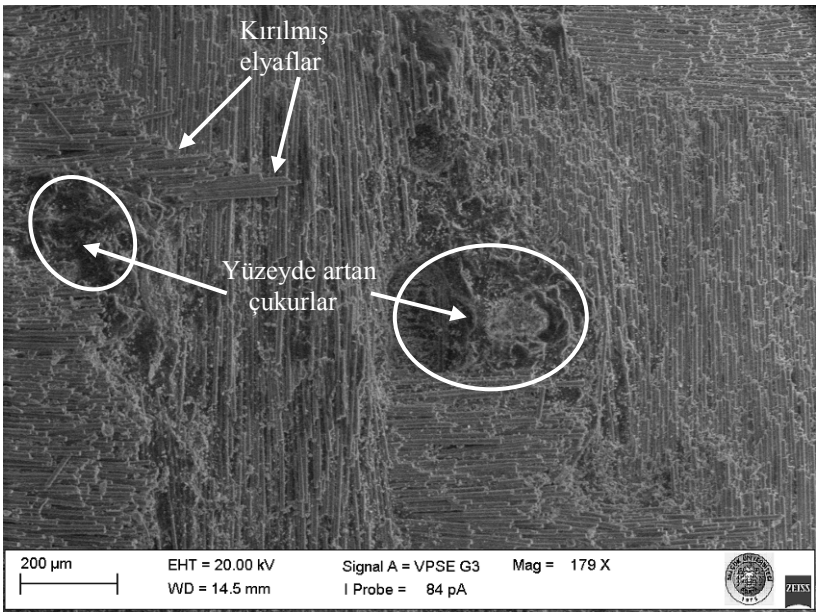



**Şekil 5.48.** Saf GF/EP deney numunesinin aşınma sonrasındaki SEM görüntüsü

Herhangi bir katkı maddesi ilavesi olmayan cam elyaf takviyeli epoksi kompozit deney numunelerinin erozyon aşınması sonrasındaki SEM görüntüsü incelendiğinde, aşındırıcı partiküllerin yüzeyde oluşturduğu deformasyon sonucunda numune yüzeyindeki matris malzeme kaldırılmış ve elyafların daha baskın bir hal aldığı belirlenmiştir. Ayrıca aşındırıcı partikül etkinliğinin devamıyla birlikte numune yüzeyinde çukur oluşumları gözlemlenmiştir.

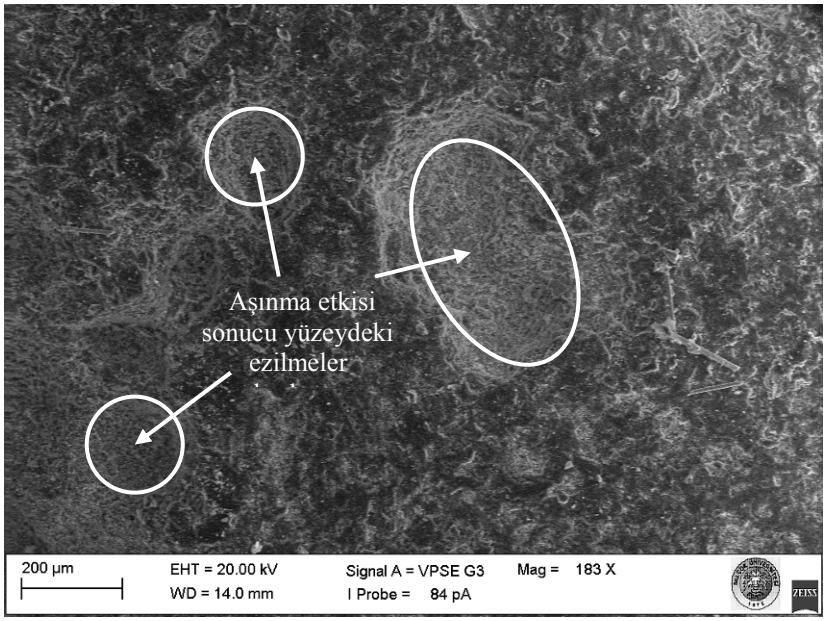



**Şekil 5.49.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin aşınma sonrasındaki SEM görüntüsü

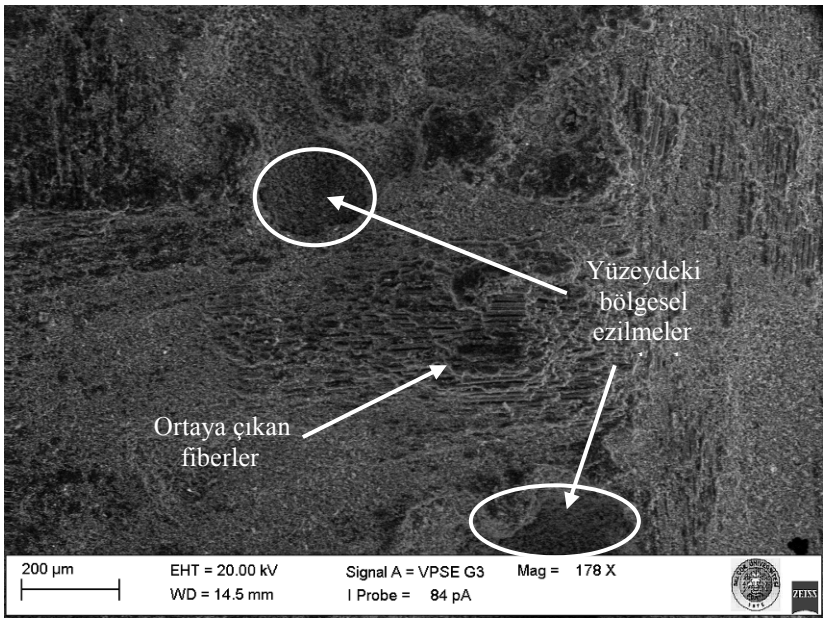



**Şekil 5.50.** Boraxlı GF/EP deney numunesinin aşınma sonrasındaki SEM görüntüsü

Şekil 5.49. ve Şekil 5.50.'deki Borik Asitli ve Boraxlı deney numunelerinin SEM görüntülerinde ise numune yüzeylerindeki deformasyonlar daha olumsuz boyutlara ulaşmıştır. Çünkü elyaflar daha belirginleşmiş olup yüzeydeki çukurlar ise daha derinleşmiştir. Sonuç olarak bu dolgu maddelerinin ana yapı ile tam olarak uyum sağlayamadığı ve zayıf bağ kuvvetleri oluşturduğu sonucuna varılmıştır.




**Şekil 5.51.** Silisyum Oksitli GF/EP deney numunesinin aşınma sonrasındaki SEM görüntüsü




**Şekil 5.52.** Alüminyum Oksitli GF/EP deney numunesinin aşınma sonrasındaki SEM görüntüsü

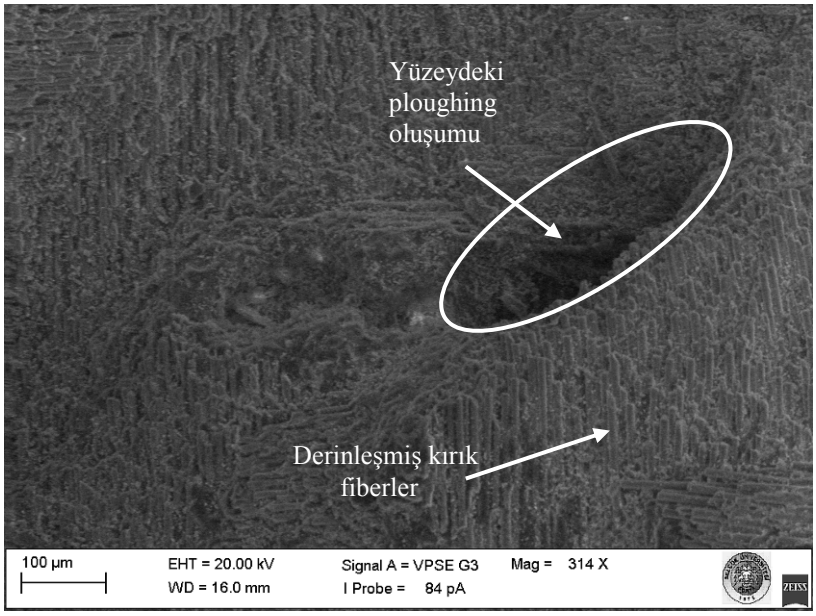
Şekil 5.51. ve Şekil 5.52.'deki Silisyum Oksit katkılı ve Alüminyum Oksit katkılı numunelere ait SEM görüntüleri incelendiğinde ise aşındırıcı partiküllerin deney numunelerine çarpması sonucu dolgu maddelerinin direnci ile karşılaşan aşındırıcılar yüzeylerde ezme etkisi yapmıştır. Bu yüzeydeki ezilmeler matris ayrılmasına engel oluşturarak elyafların daha fazla kırılmasının önüne geçmiş ve deney numunelerinin aşınma özelliklerinde bir miktar iyileşmeye sebep olmuştur.

Sonuç olarak farklı dolgu maddeleri ilave edilmiş cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin erozyon aşınma karakteristiklerindeki değişimin dolgu maddelerinin içeriğine ve tipine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Matrise $Al_2O_3$ ve $SiO_2$ ilave edilmiş kompozitler Borik Asit ve Borax ilave edilmiş kompozitlere göre daha iyi erozyon direnci sergilemiş olup erozyon direncindeki bu iyileşme ise iki sebebe bağlanmıştır. Birincisi, sert seramik partiküllerin ilavesi sonucu kompozitin hacim sertliği iyileşmiştir. İkincisi ise bu dolgu maddelerinin erozyon işlemi esnasında aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisini absorbe ettiği sonucuna varılmıştır. Bunun sonucunda da daha düşük miktardaki enerjinin matris ve takviyeli elyaf faza aktarılması sağlanmıştır. Dolayısıyla bu kompozitlerin erozyon oranlarında azalmalar gerçekleşmiştir.

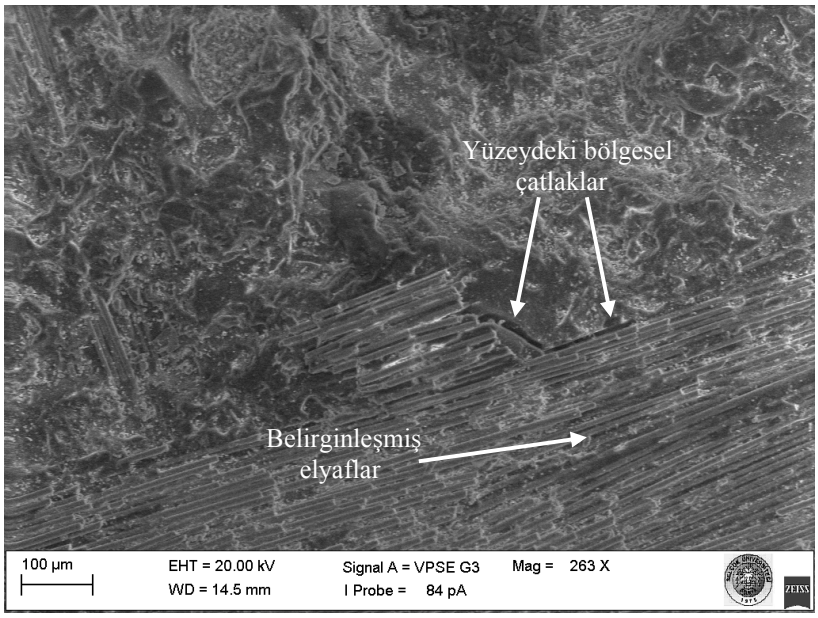
Dolgu maddelerinin erozyon aşınmasınındaki etkilerinin incelendiği SEM görüntülerinden yukarıda bahsedilen çıkarımlar yapılmış olup çarpma açısı, çarpma hızı, aşındırıcı partikül boyutu ve fiber doğrultusunun değişiminin SEM görüntüleri ile karşılaştırılmasında ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.53. ve Şekil 5.54.'de Borik Asit katkılı cam elyaf takviyeli epoksi kompozit deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, 400 μm aşındırıcı partikül boyutu ve 0° fiber doğrultusu için sırasıyla 30° ve 90° çarpma açılarındaki SEM görüntüleri verilmiştir.

30° çarpma açısında yüzeydeki aşınmanın daha yoğun olduğu ve enlemesine bir ploughing (derin yatay oyuk) oluştuğu görülmüştür. 90° çarpma açısında ise yüzeydeki fiberler belirgin bir hal almış olup yüzeyde bölgesel olarak çatlaklar ortaya çıkmıştır. Ancak bu etkilerin yanında 90° çarpma açısındaki aşınma 30° çarpma açısındaki aşınmaya göre daha ılımlı seviyede kalmıştır.

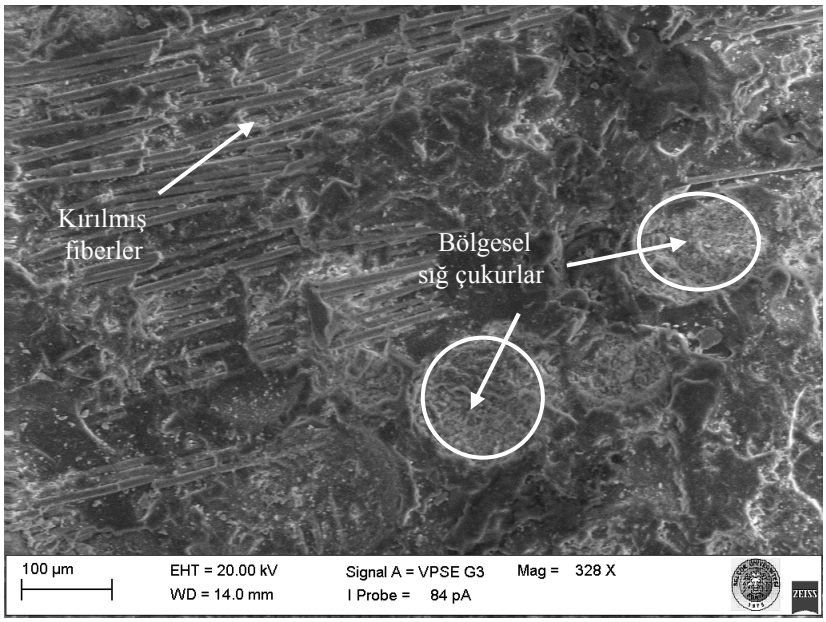



**Şekil 5.53.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (30° çarpma açısında)

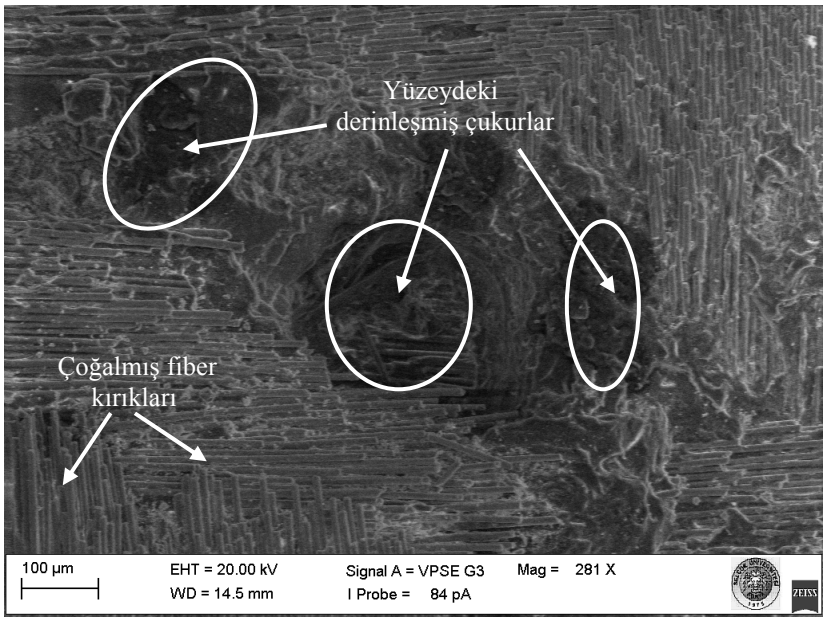



**Şekil 5.54.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (90° çarpma açısında)

Şekil 5.55. ve Şekil 5.56.'da Borik Asitli deney numunelerinin 90° çarpma açısı, 400 µm aşındırıcı partikül boyutu ve 0° fiber doğrultusu için sırasıyla 34 m/s ve 53 m/s çarpma hızlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. 34 m/s çarpma hızı yapıdaki fiberlerin ortaya çıkmasını sağlayacak kadar derinlemesine etki yapmakla birlikte 53 m/s çarpma hızı ise bu etkinliğin daha fazla olmasını yani çukurların varlığının artmasını sağlamıştır. Bu etkiye de kinetik enerjideki artış sebep olmuştur.

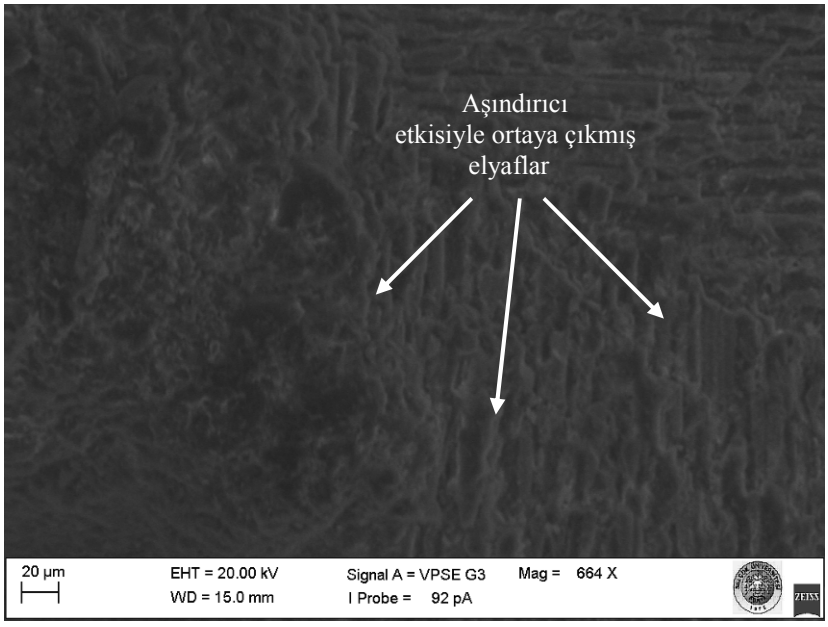



**Şekil 5.55.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (34 m/s çarpma hızında)

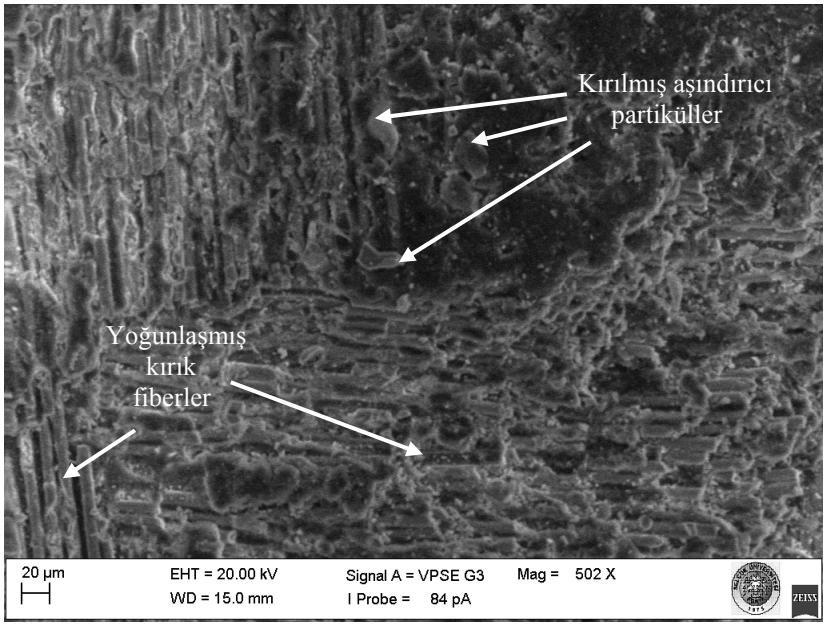



**Şekil 5.56.** Borik Asitli GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (53 m/s çarpma hızında)

Şekil 5.57. ve Şekil 5.58.'deki görüntüler ise herhangi bir katkı maddesi ilavesi olmayan saf cam elyaf takviyeli epoksi kompozit deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, 90° çarpma açısı ve 0° fiber doğrultusu için 200 µm ve 400 µm aşındırıcı partikül boyutlarındaki SEM görüntüleridir. Her iki aşındırıcı partikül boyutunun da tekil olarak düşünülmesi durumunda numune yüzeyine etki eden partikül kütlesi artış göstereceği için deney numunelerinin yüzeylerindeki deformasyonda da artışa sebep olduğu görülmüştür. SEM görüntülerinde ayrıca aşınma sonrası yüzeyde kalan kırılmış aşındırıcı partikül görüntülerine de rastlanmıştır.

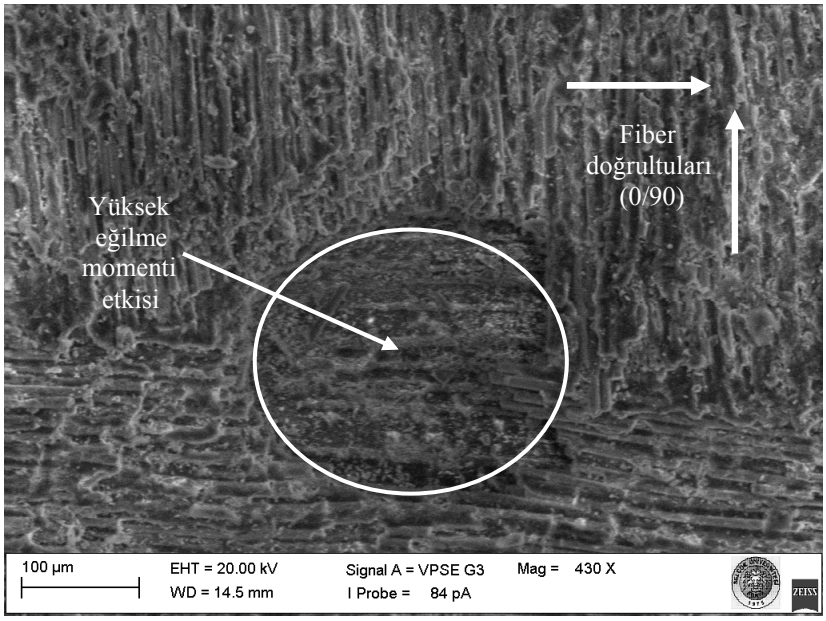



**Şekil 5.57.** Saf GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (≈200 µm aşındırıcı partikül boyutunda)

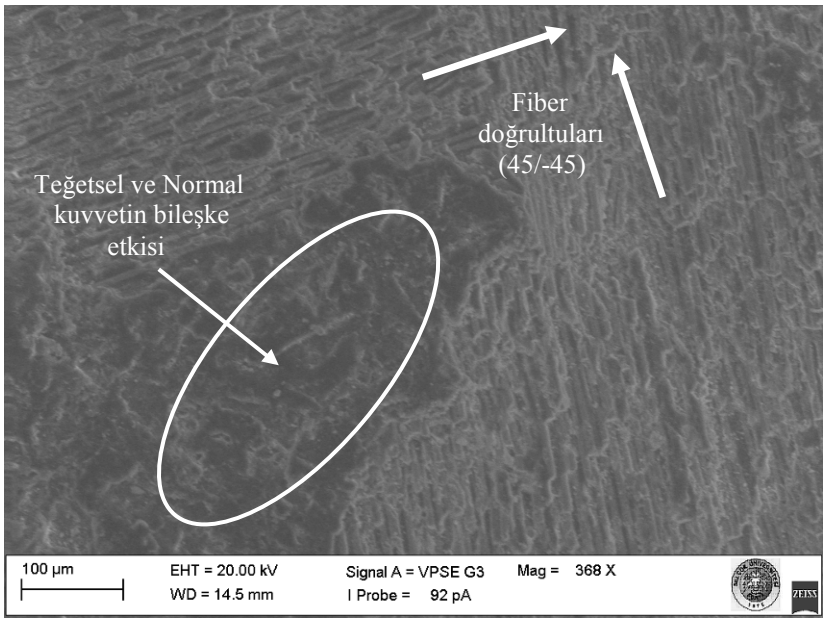



**Şekil 5.58.** Saf GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (≈400 µm aşındırıcı partikül boyutunda)

Şekil 5.59. ve Şekil 5.60. ise katkısız cam elyaf takviyeli epoksi kompozit deney numunelerinin 34 m/s çarpma hızı, 90° çarpma açısı ve 400 µm aşındırıcı partikül boyutundaki sırasıyla 0° ve 45° fiber doğrultularındaki SEM görüntülerini göstermektedir.




**Şekil 5.59.** Saf GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (0° fiber doğrultusunda)




**Şekil 5.60.** Saf GF/EP deney numunesinin SEM görüntüsü (45° fiber doğrultusunda)

Bu deney numunelerine belli bir hız ve açı değerinde çarpan aşındırıcı partiküller matris malzemenin kaldırılmasından sonra direk fiberlere etki ederek 0° fiber doğrultusuna sahip deney numunelerinin fiberleri üzerinde daha büyük eğilme momentleri oluşturmaktadırlar. Bununla birlikte 45° fiber doğrultusuna sahip deney numunelerinde ise fiberlere etki eden kuvvet bileşeni normal ve teğetsel olmak üzere ikiye ayrıldığı için normal kuvvet bileşeninde meydana gelen azalmaya bağlı olarak fiberler üzerine etki eden eğilme momenti azalmış ve bunun sonucunda da numunelerin erozyon aşınma direnci bir miktar artış göstermiştir.

Sonuç olarak deney numunelerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde erozyon aşınmasından dolayı numunelerde oluşan malzeme kaldırılması işleminin birkaç aşamada gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Bunlar;

- Aşındırıcı partikülün numuneye etkisiyle birlikte bölgesel olarak matris malzeme kaldırılmıştır,
- Aşındırıcı partiküllerin elyaflara direk temasının artmasına bağlı olarak da elyaflar üzerinde eğilme gerilmeleri oluşmuştur. Bunun sonucunda da elyaflar çatlamış ve kırılmıştır,
- Son olarak da matris ve elyaflardaki deformasyon, elyaflar ile bitişik matris arasındaki ara yüzeyin etkinliğinin azalmasına ve numunelerdeki zararın artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla yüzeyde çukurlar meydana gelmiştir.

## 5.6. İstatistiksel Değerlendirme

Saf GF/EP deney numuneleri ile Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit parçacık katkılı GF/EP deney numunelerinin erozyon aşınma deneyleri çarpma açısının, çarpma hızının, aşındırıcı partikül boyutunun ve fiber doğrultusunun değiştirilmesi ile yapıldı. Yapılan deneyler sonunda erozyon aşınma deney sonuçları arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olup olmadığını belirlemek için Çok Faktörlü Varyans Analizi (MANOVA) uygulandı. Deneysel çalışmaya birden fazla bağımsız değişkenin (boyut, hız, fiber doğrultusu, açı ve madde) etki etmesi ve bu değişkenlerin farklılaşma durumunun aynı anda incelenmesi gerektiği için bu yöntemden faydalanıldı. Ayrıca bu yöntemin istatistikî açıdan analizlerinde SPSS 15.0 istatistik paket programı kullanıldı.

Yapılan inceleme sonunda EK–8'de de görüldüğü üzere fiber doğrultusu (derece) faktörünün dışındaki diğer tüm faktörlerde (boyut, hız, açı ve madde) fark anlamlı bulunmuştur (sig < 0,05). Bu genel istatistikî değerlendirmeden sonra deneysel çalışmada etkili olan tüm faktörler, olası bütün kombinasyonlar göz önünde bulundurularak kendi aralarında ikili kıyaslanmış ve analizleri yapılmıştır.

Boyut faktöründe 200 μm ve 400 μm olmak üzere iki düzey vardır ve bu düzeyler ikiden fazla olmadığında sadece ortalamaları göz önünde bulundurularak kıyaslama yapılabilir. Ana inceleme sonunda farklı boyuttaki aşındırıcılar arasındaki fark (sig < 0,05) anlamlı bulunmuş olup deneyde aşındırıcı partikül boyutunun etkisi önemli görülmüştür. Yani 200 μm luk aşındırıcılarla yapılan deneylerde 400 μm luk aşındırıcılarla yapılan deneylere göre aşınmada daha çok istenen sonuçlara ulaşılmıştır.

Çarpma hızındaki değişim üzerine yapılan istatistiksel değerlendirme sonunda çarpma hızının incelenmesinde ikili kombinasyonlardan faydalanılarak kıyaslamalar yapılmış ve 23 m/s çarpma hızının 34 m/s çarpma hızından daha iyi sonuçlar verdiği ve erozyon aşınması üzerine daha az etki yaptığı sonucuna varılmış olup bununla birlikte aşınmaya 34 m/s çarpma hızının da 53 m/s çarpma hızından daha iyi sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Yani çarpma hızındaki değişim deneysel çalışmada önemli bir etki ortaya koymuş olup çarpma hızındaki artışın aşınmayı olumsuz etkilediği görülmüştür.

Deneysel çalışmada iki farklı değere sahip olan fiber doğrultusunun değişimi, erozyon aşınması üzerine istatistik açıdan belirgin bir farklılık ortaya koymamıştır. Yani fiber doğrultusunun 0° ve 45° olması sonucu erozyon oranında meydana gelen değişim önemsiz bulunmuş olup bu değerler arasındaki farkın incelenmesine gerek duyulmamıştır.

Ana yapı içerisine farklı katkı maddelerinin ilavesi sonucu yeni deney numunelerin elde edilmesi ile başlayan süreçte, bu maddelerin erozyon aşınması üzerindeki etkisi istatistik boyutta değerlendirilmiş ve bu değerlendirmede de ikili kıyaslamalardan faydalanılmıştır. Yapılan analiz sonunda Saf maddenin erozyon aşınması ile yapı içerisine Alüminyum Oksit ve Silisyum Oksit ilavesi ile oluşturulan yeni deney numunelerinin erozyon aşınması, benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Yapıya katılan Borik Asit ilavesi ise bu üç maddeden daha olumsuz bir etki yaparak erozyon aşınmasının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte ana yapıya Borax ilave edilerek oluşturulan deney numunelerinin erozyon oranı, yapıya ilave edilen diğer maddelerle kıyaslandığında en olumsuz etkiyi yapmıştır.

Çarpma açısının değişiminin istatistikî olarak anlamlı sonuçlar verdiği yapılan analiz sonucu ortaya çıkmış olup 30° çarpma açısı erozyon aşınmasına en az direnç gösteren açı olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte 60° ve 90° çarpma açılarında birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkmış olup 90° deki çarpma açısının erozyon direnci, 60° deki çarpma açısından daha yüksek bulunmuştur.

# 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Erozyon aşınması; çarpma hızına, çarpma açısına, parçacık tipine, parçacık şekline, parçacık boyutuna, aşındırıcı parçacıkların sertliğine, aşındırıcı parçacık akış oranına, hedef malzeme özelliklerine ve çevresel parametrelere bağlı çok karmaşık bir olaydır.

Cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin ve bu saf yapıya ayrı ayrı hacimsel olarak %15 oranında Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit ilave edilerek oluşturulmuş kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışları çarpma hızı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül boyutu ve fiber doğrultusu değiştirilerek incelenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak yapılan deneyler sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çarpma açısının değiştirilmesinin deney numunelerinin tümünde erozyon oranının farklılaşmasını sağladığı görülmüş olup erozyon oranındaki en olumsuz etki 30° çarpma açısında gerçekleşmiştir. Yani sünek malzemelerde karşılaşılan duruma benzer bir eğilim ortaya çıkmış olup çarpma açısındaki artış (30° den 90° ye) erozyon oranındaki azalmayı beraberinde getirmiştir.

- Çarpma hızında (≈23, 34, 53 m/s) meydana gelen ≈1,5 katlık artışlar sonunda katkısız GF/EP, Borik Asit parçacık katkılı GF/EP, Borax parçacık katkılı GF/EP, Silisyum Oksit parçacık katkılı GF/EP ve Alüminyum Oksit parçacık katkılı GF/EP deney numunelerinin tamamında erozyon oranlarında artışlara sebep olmuştur.

- Fiber doğrultularının erozyon oranında oluşturduğu etkinin diğer değişkenlere göre daha sınırlı bir aralıkta olduğu sonucuna varılmış olup hatta bu etki istatistikî verilerle de desteklenmiştir. Bunun yanında fiber doğrultusunun 45° olması durumunda aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpma açısı değiştirildiği için deney numunelerinin yüzeylerinin direnci bir miktar olsa da artırılmıştır.

- Aşındırıcı partikül boyutu, erozyon aşınmasının seyri üzerine olumsuz bir etki yapmış olup aşındırıcı partikül boyutunun artırılması aşınmanın artmasına sebep

olmuştur. Boyuttaki 2 katlık artış, erozyon aşınmasında aynı oranda artış meydana getirmese de numunelerin erozyon oranında belirgin farkların ortaya çıkmasını sağlamıştır.

- Kompozitlerin erozyon davranışı önemli ölçüde matrisin erozyon davranışına bağımlılık göstermektedir. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmada ana matrise ilave edilen Borik Asit, Borax, Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksitin erozyon aşınması üzerine dikkate değer etkiler yaptığı görülmüştür. Yapılan tüm deneyler incelendiğinde ve erozyon oranındaki değişimler göz önüne alındığında genel olarak erozyon direncindeki sıralama aşağıdaki şekilde gerçekleşmiştir;

  *Borax katkılı GF/EP < Borik Asit katkılı GF/EP < saf GF/EP < Silisyum Oksit katkılı GF/EP < Alüminyum Oksit katkılı GF/EP*

  Bu sonuca göre ana yapıya ilave edilen katkı maddelerinin erozyon direnci üzerine olumlu ve olumsuz etkileri görülmüştür. Oluşan bu farklılıkta katkı maddelerinin matris ile kuvvetli ve zayıf bağ oluşturmasının ana rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla matris ile en zayıf bağı Borax katkı maddesi yaparken en kuvvetli bağ ise Alüminyum Oksit ilavesi ile sağlanmıştır.

- Deney numune yüzeylerinin sayısal haritalanması yöntemi ile üç boyutlu (3B) tarama işleminden faydalanılarak hacimsel kayıpları tespit edilmiş ve ağırlık kaybı değişimlerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslaması yapılmıştır. Sonuçlar arasında benzer bir eğilimin bulunmuş olması, ağırlık kaybı veya hacimsel kayıp işlemlerinin her ikisinin de kullanılabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Dolayısıyla sonuçların elde edilmesinin kolaylığı ve değerlendirme sürecinin daha hızlı olmasından dolayı ağırlık kaybındaki değişimin kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür.

- Mikroskop görüntüleri ve SEM incelemelerinden deney numunelerinin yüzeylerinde ortaya çıkan plastik deformasyon, mikro kesilmeler, mikro çatlaklar, oyuklar, ploughingler, elyaf-matris ayrılmaları, elyaf kırılmaları ve aşındırıcı partikül kırılmaları gözlemlenmiş olup erozyon etkisiyle yüzeylerde ortaya çıkan bu durumlar karakterize edilmiştir.

- Yapılan istatistiki değerlendirme sonucunda çarpma hızı, çarpma açısı, aşındırıcı partikül boyutu ve katkı maddelerindeki değişimin erozyon oranı üzerine etkisinin anlamlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Fiber doğrultusundaki değişimin ise genel olarak erozyon oranında belirleyici bir farklılığa sebep olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca katkı maddeleri arasında Borik Asit ve Borax ilavelerinin aşınma üzerindeki etkilerinin oldukça belirgin olduğu Silisyum Oksit ve Alüminyum Oksit ilavelerinin ise aşınmaya daha sınırlı bir aralıkta etkisinin olduğu istatistiksel olarak belirlenmiştir.

**KAYNAKLAR**


Akkurt, M., 1990. Makine Elemanları Cilt 1, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.

Arjula, S. and Harsha, A.P., 2006. Study of erosion efficiency of polymers and polymer composites, *Polymer Testing*, 25, 188–196.

Arjula, S., Harsha, A.P. and Ghosh, M.K., 2008. Erosive wear of unidirectional carbon fibre reinforced polyetherimide composite, *Materials Letters*, 62, 3246–3249.

Arjula, S., Harsha, A.P. and Ghosh, M.K., 2008. Solid-particle erosion behavior of high-performance thermoplastic polymers, *Journal of Material Science*, 43, 1757–1768.

Arnold, J.C. and Hutchings, I.M., 1989. Flux rate effects in the erosive wear of elastomers, *Journal of Materials Science*, 24, 833–839.

Arnold, J.C. and Hutchings, I.M., 1990. The mechanisms of erosion of unfilled elastomers by solid particle impact, *Wear*, 138, 33–46.

Arnold, J.C. and Hutchings, I.M., 1993. Erosive wear of rubber by solid particles at normal incidence, *Wear*, 161, 213–221.

Ashby, M.F. and Jones, D.R.H., 1998. Engineering Materials 2, *Butterworth-Heinemann*, Oxford.

Askeland, D.R. (Çev. Mehmet Erdoğan), 1998. Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, *Nobel Yayınları*, Ankara.

ASTM G40–05., 1993. Standard Terminology Related to Erosion and Wear, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.02, West Conshohocken, PA.

ASTM G76–95., 2000. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, *Annual Book of Standards*, ASTM, Vol. 03.02, West Conshohocken, PA.

Ay, İ., 2008. Hasar Analizi; Aşınma Hasarları, *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik–Mimarlık Fakültesi Yayınları*, Balıkesir.

Barkalow, R.H., Goebel, J.A. and Pettit, F.S., 1979. Erosion-corrosion of coatings and superalloys in high-velocity hot gases, Erosion: prevention and useful applications, *ASTM STP 664*, W.F. Adler (ed.), pp. 163–192.

Barkoula, N.-M. and Karger-Kocsis, J., 2002. Solid particle erosion of unidirectional GF reinforced EP composites with different fiber/matrix adhesion, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21 (15), 1377–1388.

Barkoula, N.M., Karger-Kocsis, J., 2000. Solid particle erosion of unidirectional GF reinforced EP composites with different fibre/matrix adhesion, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19, 1–12.

Barkoula, N.M. and Karger-Kocsis, J., 2002. Effects of fibre content and relative fibre-orientation on the solid particle erosion of GF/PP comp., *Wear*, 252 (1–2), 80–87.

Barkoula, N.-M., Karger-Kocsis, J. and Papanicolaou, G.C., 2002. Prediction of the residual tensile strength after solid particle erosion of UD-GF/PP composites, *Journal of Composite Materials*, 36, 1745–1756.

Bijwe, J. and Rattan, R., 2007. Influence of weave of carbon fabric in polyetherimide composites in various wear situations, *Wear*, 263, 984–991.

Brandstädter, A., Goretta, K.C., Routbort, J.L., Groppi, D.P. and Karasek, K.R., 1991. Solid-particle erosion of bismaleimide polymers, *Wear*, 147 (1), 155–164.

Camacho, J., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S., 2009. Solid particle erosion caused by rice grains, *Wear*, 267, 223–232.

Chen, Q. and Li, D.Y., 2003. Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials, *Wear*, 255, 78–84.

DIN 50320., 1979. Wear; Terms; Systems Analysis of Wear Processes; Classification of the Field of Wear, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin, Germany.

Finnie I., 1958. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals, *Proc. 3rd U.S. National Congress of Applied Mechanics*, 527–532.

Finnie, I., 1960. Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3, 87–103.

Finnie, I., Wolak, J. and Kabil, Y., 1967. Erosion of metals by solid particles, *Journal of Materials*, 2, 682–700.

Finnie, I., 1972. Some observations on the erosion of ductile metals, *Wear*, 19, 81–90.

Friedrich, K., 1986. Erosive wear of polymer surfaces by steel ball blasting, *Journal of Materials Science*, 21, 3317–3332.

Getu, H., Ghobeity, A., Spelt, J.K. and Papini, M., 2007. Abrasive jet micromachining of polymethylmethacrylate, *Wear*, 263, 1008–1015.

Görür, B., Akdoğan, A., Yurci, M., Aralık 2005. Optik Ölçme Yöntemlerinin Sac ve Plastik Parçaların İmalatındaki Sayısallaştırma, *Tersine Mühendislik ve Muayene Prosesleri*, www.turkcadcam.net

Gürleyik, M.Y., Aralık 1986. Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları, *Mühendis ve Makine*, Cilt 27, Sayı 323, Sayfa 3–14.

Häger, A., Friedrich, K., Dzenis, Y.A. and Paipetis, S.A., 1995. Study of erosion wear of advanced polymer composites, *ICCM–10 Conference Proceedings*, Woodhead Publishing, Canada, pp. 155–162.

Harsha, A.P., Tewari, U.S. and Venkatraman, B., 2003. Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites, *Wear*, 254, 693–712.

Harsha, A.P. and Thakre, A.A., 2007. Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites, *Wear*, 262 (7–8), 807–818.

Harsha, A.P. and Jha, S.K., 2008. Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence, *Wear*, 265, 1129–1135.

Hutchings, I.M., 1979. Erosion: Prevention and Useful Applications, *ASTM Sp. Tech. Pub.*, 664, in Adler W.F. (Ed.), pp. 59–76.

Hutchings, I.M., 1987. Wear by particulates, *Chemical Engineering Sci.*, 42, 869–878.

Hutchings, I.M. and Deuchar, D.W.T., 1987. Erosion of unfilled elastomers by solid particle impact, *Journal of Materials Science*, 22, 4071–4076.

Hutchings, I.M., 1992. Ductile–Brittle Transitions and Wear Maps for the Erosion and Abrasion of Brittle Mat., *Journal of Physics D: Applied Phys.*, 25: A212–A221.

Hutchings, I.M., 1996. Tribology; Friction and Wear of Engineering Materials, *St. Edmundsbury Press*, London.

Kim, A. and Kim, I., 2009. Solid particle erosion of CFRP composite with different laminate orientations, *Wear*, doi:10.1016/j.wear.2009.03.038.

Kulkarni, S.M. and Kishore, K., 2001. Influence of matrix modification on the solid particle erosion of glass/epoxy composites, *Polym Polym Compos*, 9, 25–30.

Li, J. and Hutchings, I.M., 1990. Resistance of cast polyurethane elastomers to solid particle erosion, *Wear*, 135, 293–303.

Ludema, K.C., 1996. Friction, Wear, Lubrication, *A Textbook in Tribology*, U.S.A.

Mahapatra, S.S., Patnaik, A. and Satapathy, A., 2008. Taguchi method applied to parametric appraisal of erosion behavior of GF-reinforced polyester composites, *Wear*, 265, 214–222.

Manish, R., Vishwanathan, B. and Sundararajan, G., 1994. The solid particle erosion of polymer matrix composites, *Wear*, 171, 149–161.

Milton, G.W., 2004. The Theory of Composites, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom.

Miyazaki, N. and Hamao, T., 1996. Effect of interfacial strength on erosion behaviour of FRPs, *Journal of Composite Materials*, 30, 35–50.

Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S. and Dash, R.R., 2008. Implementation of Taguchi design for erosion of fiber-reinforced polyester composite systems with SiC filler, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 1093–1111.

Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S. and Dash, R.R., 2008. A modeling approach for prediction of erosion behavior of glass fiber–polyester composites, *Journal of Polymer Research*, 15 (2), 147–160.

Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S. and Dash, R.R., 2008. A Taguchi approach for investigation of erosion of glass fiber polyester composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 871–888.

Pool, K.V., Dharan, C.K.H. and Finnie, I., 1986. Erosive wear of composite materials, *Wear*, 107 (1), 1–12.

Rajesh, J.J., Jayashree, B., Tewari, U.S. and Venkataraman, B., 2001. Erosive wear behavior of various polyamides, *Wear*, 249 (8), 702–714.

Rajesh, J.J., Bijwe, J., Venkataraman, B. and Tewari, U.S., 2004. Effect of impinging velocity on the erosive wear behaviour of Polyamides, *Tribology Int.*, 37, 219–226.

Rattan, R. and Bijwe, J., 2006. Carbon fabric reinforced polyetherimide composites: Influence of weave of fabric and processing parameters on performance properties and erosive wear, *Materials Science and Engineering*, A 420, 342–350.

Rattan, R. and Bijwe, J., 2007. Influence of impingement angle on solid particle erosion of carbon fabric reinforced polyetherimide comp., *Wear*, 262 (5–6), 568–574

Ruff, A.W. and Ives, L.K., 1975. Measurement of solid particle velocity in erosive wear, *Wear*, 35, 195–199.

Sarı, N. and Sınmazçelik, T., 2007. Erosive wear behaviour of carbon fibre / polyetherimide composites under low particle speed, *Mat. & Design*, 28 (1), 351–355

Sınmazçelik, T. and Taşkıran, İ., 2007. Erosive wear behaviour of polyphenylenesulphide (PPS) comp., *Materials & Design*, 28 (9), 2471–2477.

Sinmazçelik, T., Fidan, S. and Günay, V., 2008. Residual mechanical properties of carbon/polyphenylenesulphide composites after solid particle erosion, *Materials and Design*, 29, 1419–1426.

Srivastava, V.K., Prakash, R. and Shembekar, P.S., 1988. Fracture behaviour of fly ash filled FRP composites, *Compos Struct*, 10, 271–279.

Srivastava, V.K., 2006. Effects of wheat starch on erosive wear of E-glass fibre reinforced epoxy resin composite materials, *Materials Science and Engineering*, A 435–436, 282–287.

Srivastava, V.K. and Pawar, A.G., 2006. Solid particle erosion of glass fibre reinforced flyash filled epoxy resin composites, *Composites Science and Technology*, 66 (15), 3021–3028.

Suresh, A., Harsha, A.P. and Ghosh, M.K., 2009. Solid particle erosion of unidirectional fibre reinforced thermoplastic composites, *Wear*, doi:10.1016/j.wear. 2009.03.041.

Stevenson, A.N.J. and Hutchings, I.M., 1995. Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test, *Wear*, 181–183, 56–62.

Tewari, U.S., Harsha, A.P., Häger, A.M. and Friedrich, K., 2002. Solid particle erosion of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheretherketone composites, *Wear*, 252, 992–1000.

Tewari, U.S., Harsha, A.P., Hager, A.M. and Friedrich, K., 2003. Solid particle erosion of carbon fibre– and glass fibre–epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 63 (3–4), 549–557.

Tilly, G.P., 1969. Sand erosion of metals and plastics: a brief review, *Wear*, 14, 241–248.

Tilly, G.P. and Sage, W., 1970. The interaction of particle and material behaviour in erosion processes, *Wear*, 16 (6), 447–465.

Tsiang, T.H., 1989. Sand Erosion of Fibre Composites: Testing and Evaluation, in: C.C. Chamis (Ed.), *Test Methods for Design Allowables for Fibrous Composites*, vol. 2, pp. 55, Philadelphia, PA.

Tsuda, K., Kubouchi, M., Sakai, T., Saputra, A.H. and Mitomo, N., 2006. General method for predicting the sand erosion rate of GFRP, *Wear*, 260, 1045–1052.

Walley, S.M., Field, J.E. and Yennadhiou, P., 1984. Single solid particle impact erosion damage on polypropylene, *Wear*, 100, 263–280.

Zahavi, J. and Schmitt, Jr. G.F., 1981. Solid particle erosion of reinforced composite materials, *Wear*, 71, 179–190.

Zhang, Z., Barkoula, N.-M., Karger-Kocsis, J. and Friedrich, K., 2003. Artificial neural network predictions on erosive wear of polymers, *Wear*, 255, 708–713.

Zum Gahr, K.H., 1987. Microstructure and Wear of Materials, *Tribology Series*, 10, pp. 531–558, Elsevier, Amsterdam–Oxford–Newyork–Tokyo.

# EKLER

## EK–1 Basınçlı Kumlamada Kullanılan En Yaygın Aşındırıcılar ve Özellikleri

| Aşındırıcı/ Abrasive | Şekil/ Shape | Sertlik/ Hardness (MOHS) | Hacimsel Yoğunluk/ Bulk Density (lbs/ft3) | Kullanım Sayısı/ Number of Uses |
|---|---|---|---|---|
| Kum / Sand | Yuvalakımsı/ Rounded Irregular | 5.0-7.0 | 100 | 1 |
| Staurolite | Yuvalakımsı/ Rounded Irregular | 6.5-7.0 | 128-148 | 1* 5** |
| Garnet | Hafif Köşeli/ Subangular | 7.0-8.0 | 130-147 | 3-5* / 4-10** |
| Olivine/Olivine | Köşeli/ Angular | 6.5-7.0 | 90-109 | 1 |
| Hematit/ Specular Hematite | Yarı yuvarlak/ Semi-rounded | 6.5-7.0 | 183.5 | 6-7** |
| Kömür curufu/ Coal Slag | Köşeli/Angular | 6.0-7.0 | 75-100 | 1 |
| Bakır curufu/ Copper Slag | Köşeli/Angular | 7.0-8.0 | 110 | 1* / many** |
| Nikel curufu/ Nickel Slag | Köşeli/Angular | 7.0-8.0 | 110 | 1 |
| Cam Küre/ Crushed Glass | Düzensiz Köşeli/ Angular Irregular | 5.5-6.5 | 75 | 1 |
| Çelik Grit/ Steel Grit | Köşeli/ Angular | 40-70 HRc | 260 | 50-100* / 200-1500** |
| Alüminyum Oksit/ Aluminum Oxide | Irregular | 9.0 | 120-131 | 3-5* / 15-20** |

* Çelik grit, alüminyum oksit ve garnet'in 50-100, 3-5 ve 4-10 ölçülerinde bazı hassas kullanımlar listelenmiştir [Austin 1991 ve Willams 1986]

** Temizleme amaçlı aşındırıcı tedarikçileri çelik grit, alüminyum oksit ve garnet 'in 1500, 20 ve 10 defa tekrar kullanılabileceğini; kullanılan ürünün ölçüsüne bağlı olarak tahmin etmektedirler. Fakat temizleme amaçlı aşındırıcı tedarikçilerinin maksimum kullanım listelerinin sıklıkla dayandığı temel şartlar vardır. Bunlar düşük nem vb dir, fakat bu her zaman mevcut olmaz.

## EK–2 Aşındırıcıların Kıyaslanması

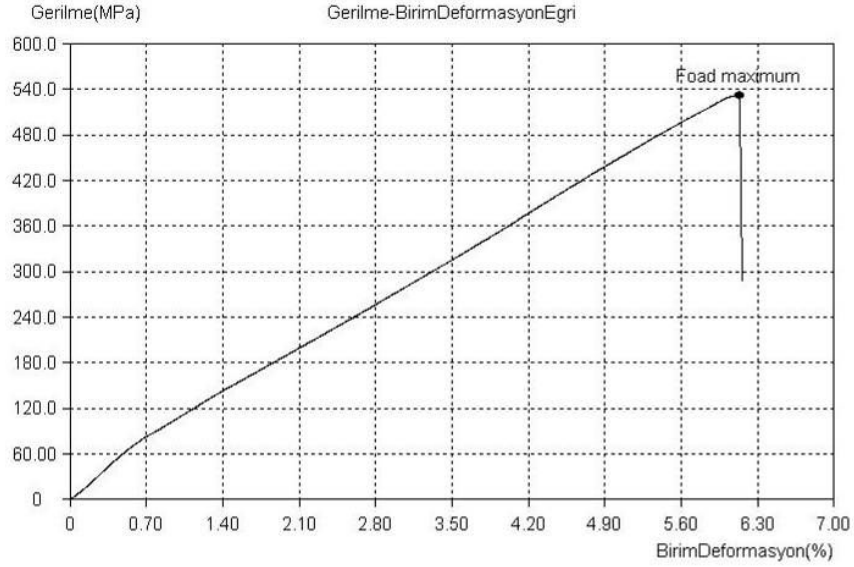
Rakamlar Ham madde ve Üretim Proseslerine göre değişiklik arzadebilir.
Figures may vary depending on raw materials and manufacturing processes.
M – Üretilmiş / Manufactured, N – Doğal Olarak Mevcut / Naturally occurring
B = Yan Ürün / By product

| Aşındırıcı / Abrasive | Tipi/ Type | Şekil / Shape | Sertlik / Hardness | Hacimsel Yoğunluk/ Bulk Density (kg/m³) | Özgül Ağırlık / Specific Gravity | Tekrar Kullanılabilme/ Comparative Recyclability |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Çelik Bilya / Steel Shot | M | Yuvarlak/ Spherical | 40-62 HRC | 4500 | 7,4 | Yüksek/High |
| Çelik Grit / Steel Grit | M | Köşeli/ Angular | 46-65 HRC | 4500 | 7,6 | Yüksek/High |
| Garnet / Garnet | N | Köşeli/ Angular | 7.5-8.5 Moh | 2400 | 4,1 | Orta-Düşük/ Medium-Low |
| Cam kürecik / Glass Beads | M | Yuvarlak/ Spherical | 5.5 Moh | 2500 | 2.45-2.50 | Orta / Medium |
| Alüminyum Oksit / Alox | M | Köşeli/ Angular | 9 Moh | 2400 | 3,9 | Orta / Medium |
| Silikon Karbid / Silicon Carbide | M | Köşeli/ Angular | 9,2 Moh | 1760 | 3,2 | Orta / Medium |
| Silis Kumu / Silica Sand | N | Köşeli/ Angular | 5-6 Moh | 1600 | 2,8 | Düşük / Low |
| Bakır Curufu / Copper Slag | B | Köşeli/ Angular | 6-7 Moh | 1900 | 3,4 | Düşük / Low |
| Kömür Curufu / Coal Slag | B | Köşeli/ Angular | 6-7 Moh | 1350 | 2,63 | Düşük / Low |
| Kalay Curufu / Tin Slag | B | Köşeli/ Angular | 7 Moh | 1800 | 3,2 | Düşük / Low |
| Plastik Tip I / Plastic Type I | M | Köşeli/ Angular | 3,0 Moh | 642-802 | 1,15-1,25 | Orta / Medium |
| Plastik TipII / Plastic Type II | M | Köşeli/ Angular | 3,5 Moh | 930-962 | 1.47-1.52 | Orta / Medium |
| Plastik TipIII / Plastic Type III | M | Köşeli/ Angular | 4,0 Moh | 930-962 | 1.47-1.52 | Orta / Medium |
| Plastik Tip X / Plastic Type X | M | Köşeli/ Angular | 3,2 Moh | 642-802 | 1,1-1,2 | Orta / Medium |
| Plastik Tip V / Plastic Type V | M | Köşeli/ Angular | 3,5 Moh | 642-802 | 1,1-1,2 | Orta / Medium |
| Plastik Tip VI / Plastic Type VI | M | Köşeli/ Angular | 3,0 Moh | 642-802 | 1.28-1.33 | Orta / Medium |
| Plastik Tip L / Plastic Type L | M | Köşeli/ Angular | 3,5 Moh | 642-802 | 1,1-1,2 | Orta / Medium |
| Mısır Koçanı / Corn | N | Köşeli/ Angular | 2,0-2,5 Moh | 600 | 1.15 | Orta / Medium |
| Mısır Koçanı / Wallnut | N | Köşeli/ Angular | 2,3-3,0 Moh | 725 | 1.28 | Orta-Düşük/ Medium - Low |
| Şeftali Çekirdeği / Apricot | N | Köşeli/ Angular | 3,0-4,0 Moh | 725 | 1.4 | Orta-Düşük/ Medium - Low |
| Pik Grit / Chilled Iron Grit | M | Köşeli/ Angular | 62 HRC | 4250 | 7.0 | Orta-Düşük/ Medium - Low |
| Pik bilya / Chilled Iron Shot | M | Yuvarlak/ Spherical | 62 HRC | 4250 | 7.0 | Orta - Yüksek/ Medium - High |
| Çinko Tel Kesme/ Cut Wire - Zinc | M | Yuvarlak/ Cylinderical-Spherical | 35-55 HV | 4100 | 7.1 | Orta - Yüksek/ Medium - High |
| Paslanmaz Tel Kesme Cut Wire - Stainless Steel | M | Yuvarlak/ Cylinderical-Spherical | 300-600 HV | 4400 | 7.6 | Yüksek / High |
| Alüminyum Tel Kesme / Cut Wire - Aluminium | M | Yuvarlak/ Cylinderical-Spherical | 40-125 HV | 1500 | 2.7 | Orta - Yüksek/ Medium - High |
| Tel Kesme Steel / Cut Wire - Carbon | M | Yuvarlak/ Cylinderical-Spherical | 400-500 HV | 4400 | 7.6 | Yüksek / High |
| Çinko Bilya / Zinc Shot | M | Yuvarlak/ Spherical | 35-55 HV | 4200 | 7.1 | Orta - Yüksek/ Medium - High |
| Alüminyum Bilya / Aluminium Shot | M | Yuvarlak/ Spherical | 40-125 HV | 1500 | 2.7 | Orta - Yüksek/ Medium - High |
| Seramik Bilya / Ceramic Beads | M | Yuvarlak/ Spherical | 65 HRC | 2300 | 3.76 | Yüksek / High |
| Sodyum Bi Karbonat / Sodium Bi Carbonate | N | Köşeli/ Angular | 3 Moh | 800 | 2.25 | Düşük / Low |
| Paslanmaz Çelik Bilya / Stainless Steel Shot | M | Yuvarlak/ Spherical | 200 HV | 4450 | 7.6 | Yüksek / High |
| Zirkon Kumu / Zircon Sand | N | Köşeli/ Angular | 6-8 Moh | 2200 | 3.5 | Düşük / Low |

## EK–3 Deney Numunelerinin Gerilme – Birim Deformasyon Grafikleri

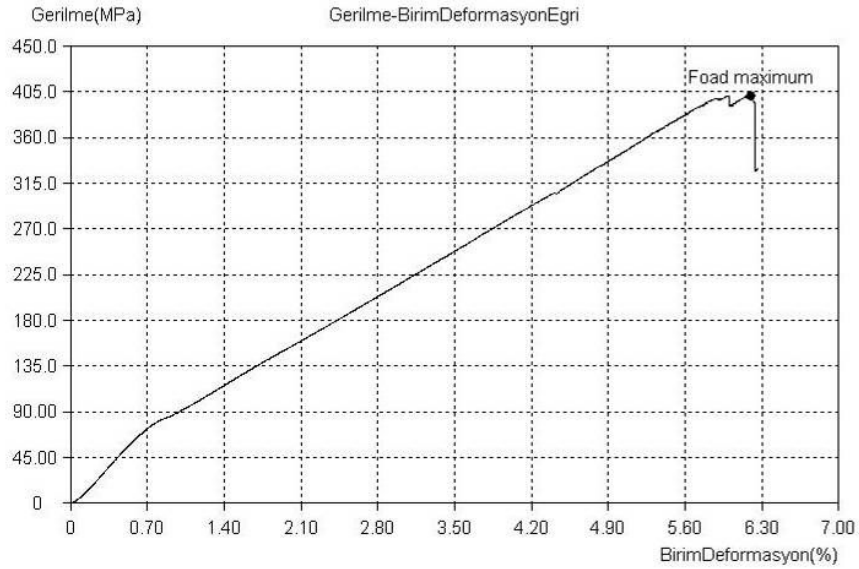
*Saf GF/EP Deney Numunesi*

| SampleID | | TestDate | 26/03/2010 |
|---|---|---|---|
| Operator | ErmanAKGUN | Length(mm) | 150 |
| Width(mm) | 10.45 | Thickness(mm) | 3.40 |
| So(mm2) | 35.53 | Gage length(mm) | 91 |
| Load maximum(kN) | 18.92 | Tensile strength(MPa) | 533 |
| Breaking Factor(kN/m) | 1.81 | Load at break(kN) | / |
| Strength at break(MPa) | / | Elastic Modulus(GPa) | 8.25 |



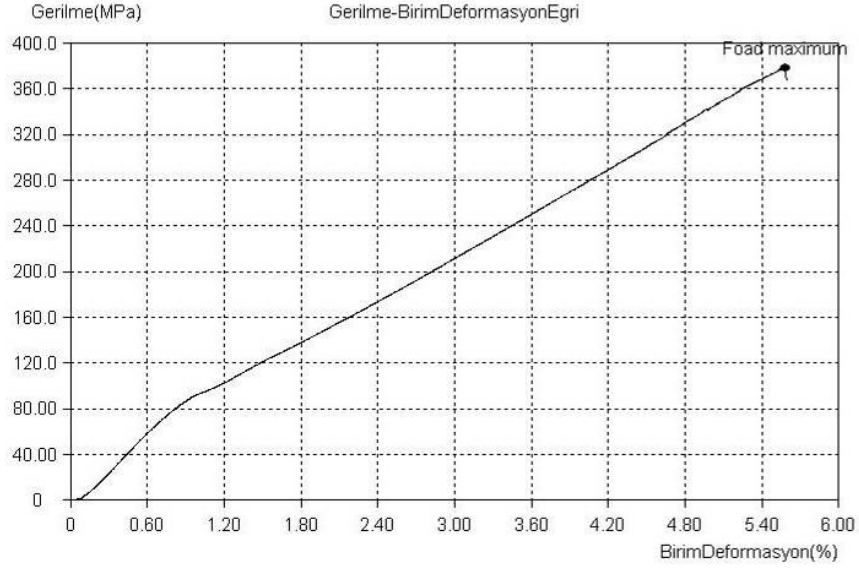
*Borik Asit Katkılı GF/EP Deney Numunesi*

| SampleID | | TestDate | 26/03/2010 |
|---|---|---|---|
| Operator | ErmanAKGUN | Length(mm) | 150 |
| Width(mm) | 10.06 | Thickness(mm) | 3.86 |
| So(mm²) | 38.83 | Gage length(mm) | 91 |
| Load maximum(kN) | 15.59 | Tensile strength(MPa) | 401 |
| Breaking Factor(kN/m) | 1.55 | Load at break(kN) | 12.78 |
| Strength at break(MPa) | 329 | Elastic Modulus(GPa) | 6.23 |



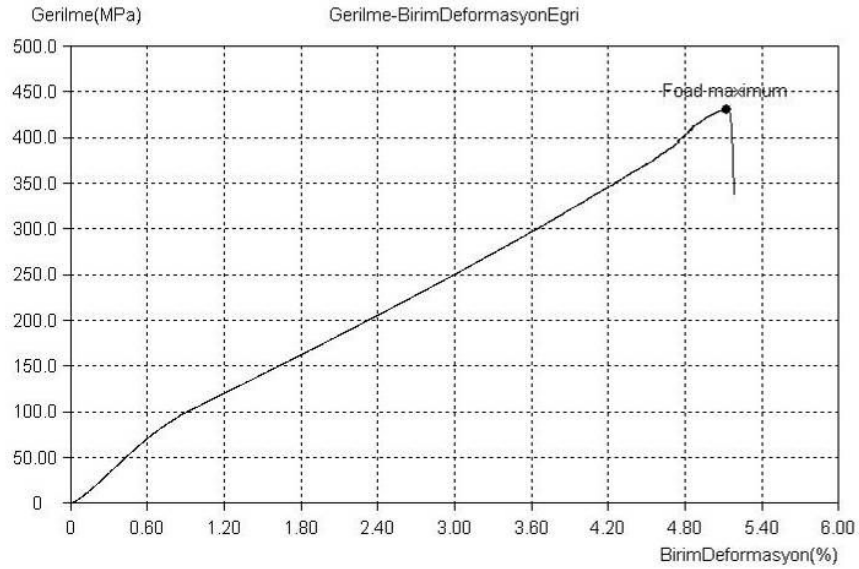

*Borax Katkılı GF/EP Deney Numunesi*

| SampleID | | TestDate | 26/03/2010 |
|---|---|---|---|
| Operator | ErmanAKGUN | Length(mm) | 150 |
| Width(mm) | 9.86 | Thickness(mm) | 3.74 |
| So(mm²) | 36.88 | Gage length(mm) | 91 |
| Load maximum(kN) | 13.96 | Tensile strength(MPa) | 379 |
| Breaking Factor(kN/m) | 1.42 | Load at break(kN) | / |
| Strength at break(MPa) | / | Elastic Modulus(GPa) | 6.09 |



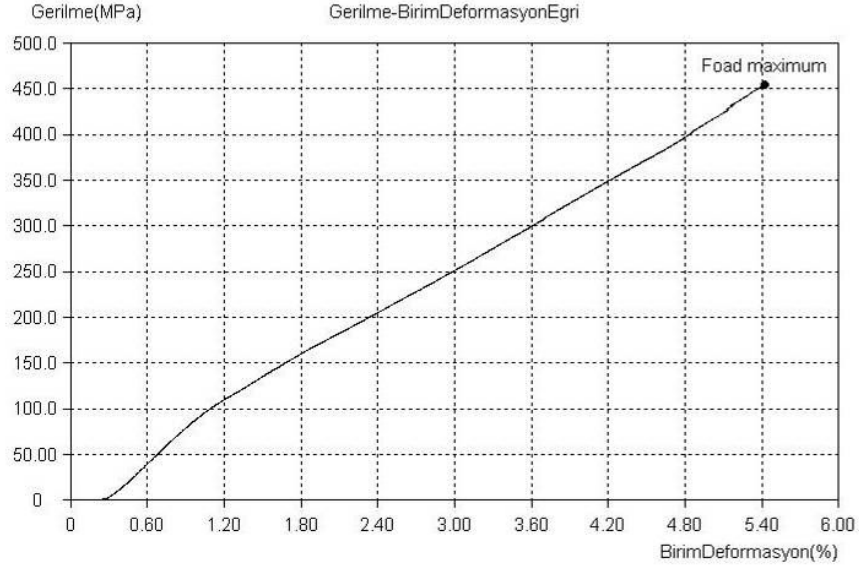
*Silisyum Oksit Katkılı GF/EP Deney Numunesi*

| SampleID | | TestDate | 26/03/2010 |
|---|---|---|---|
| Operator | ErmanAKGUN | Length(mm) | 150 |
| Width(mm) | 10.85 | Thickness(mm) | 3.82 |
| So(mm2) | 41.45 | Gage length(mm) | 94 |
| Load maximum(kN) | 17.88 | Tensile strength(MPa) | 431 |
| Breaking Factor(kN/m) | 1.65 | Load at break(kN) | / |
| Strength at break(MPa) | / | Elastic Modulus(GPa) | 7.28 |

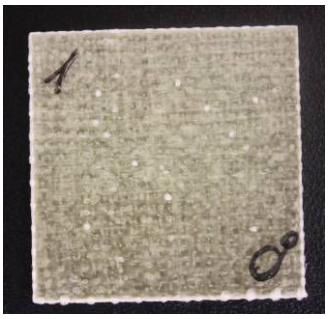



*Alüminyum Oksit Katkılı GF/EP Deney Numunesi*

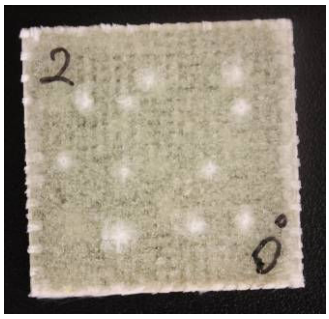
| SampleID | | TestDate | 26/03/2010 |
|---|---|---|---|
| Operator | ErmanAKGUN | Length(mm) | 150 |
| Width(mm) | 10.87 | Thickness(mm) | 3.45 |
| So(mm2) | 37.50 | Gage length(mm) | 94 |
| Load maximum(kN) | 17.04 | Tensile strength(MPa) | 454 |
| Breaking Factor(kN/m) | 1.57 | Load at break(kN) | / |
| Strength at break(MPa) | / | Elastic Modulus(GPa) | 7.60 |



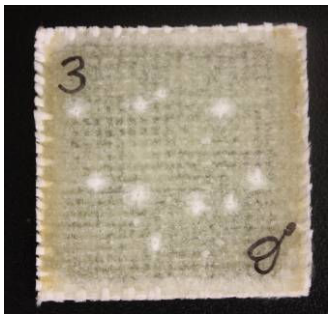
## EK–4 Sertlik Testi Uygulanmış Numuneler ve Birim Dönüşüm Tabloları



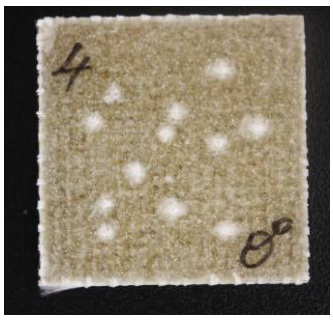

Saf GF/EP



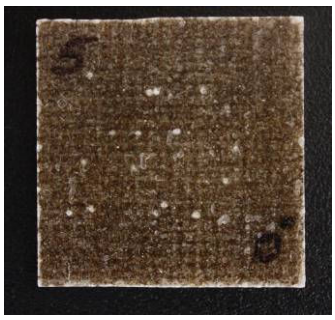

Borik Asitli GF/EP



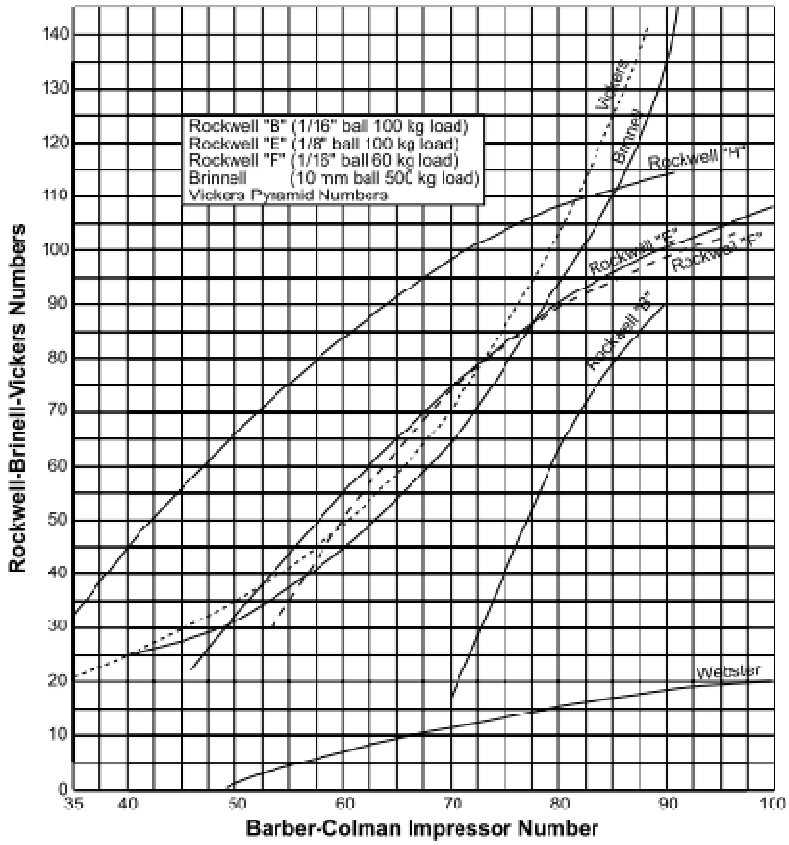

Boraxlı GF/EP




Silisyum Oksitli GF/EP




Alüminyum Oksitli GF/EP



## GYZJ–934–1 İçin Yaklaşık Sertlik Dönüşüm Tablosu

| GYZJ-934-1 | Brinnel 10mm 500kg | Vickers 5kg | Webster Model B | Rockwell | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | B | E | F | H |
| 35 | | 21 | | | | | 32 |
| 36 | | 22 | | | | | 35 |
| 37 | | 23 | | | | | 37 |
| 38 | | 24 | | | | | 40 |
| 39 | | 25 | | | | | 42 |
| 40 | 25 | 26 | | | | | 45 |
| 41 | 25 | 27 | | | | | 47 |
| 42 | 26 | 28 | | | | | 49 |
| 43 | 27 | 29 | | | | | 51 |
| 44 | 27 | 30 | | | | | 54 |
| 45 | 28 | 30 | | | | | 56 |
| 46 | 29 | 31 | | | | | 58 |
| 47 | 30 | 32 | | | 23 | | 60 |
| 48 | 30 | 33 | 0.7 | | 25 | | 62 |
| 49 | 31 | 34 | 1.3 | | 28 | | 64 |
| 50 | 32 | 35 | 1.9 | | 31 | | 66 |
| 51 | 33 | 36 | 2.5 | | 34 | | 68 |
| 52 | 34 | 38 | 3.1 | | 36 | | 70 |
| 53 | 35 | 39 | 3.6 | | 39 | 30 | 72 |
| 54 | 37 | 40 | 4.2 | | 41 | 34 | 73 |
| 55 | 38 | 41 | 4.7 | | 44 | 37 | 75 |
| 56 | 39 | 43 | 5.3 | | 45 | 40 | 77 |
| 57 | 40 | 44 | 5.8 | | 48 | 43 | 78 |
| 58 | 42 | 45 | 6.3 | | 50 | 46 | 80 |
| 59 | 43 | 47 | 6.8 | | 53 | 48 | 82 |
| 60 | 45 | 49 | 7.3 | | 55 | 51 | 83 |
| 61 | 46 | 50 | 7.8 | | 57 | 54 | 85 |
| 62 | 48 | 52 | 8.3 | | 59 | 56 | 86 |
| 63 | 50 | 54 | 8.8 | | 61 | 59 | 88 |
| 64 | 51 | 56 | 9.2 | | 63 | 61 | 89 |
| 65 | 53 | 58 | 9.7 | | 65 | 63 | 90 |
| 66 | 55 | 60 | 10.1 | | 67 | 66 | 92 |
| 67 | 57 | 62 | 10.6 | | 69 | 68 | 93 |
| 68 | 60 | 65 | 11.0 | | 71 | 70 | 94 |
| 69 | 62 | 67 | 11.4 | | 73 | 72 | 95 |
| 70 | 64 | 70 | 11.8 | 17 | 75 | 74 | 97 |
| 71 | 67 | 72 | 12.2 | 23 | 76 | 75 | 98 |
| 72 | 69 | 75 | 12.6 | 28 | 78 | 77 | 99 |
| 73 | 72 | 78 | 12.9 | 33 | 80 | 79 | 100 |
| 74 | 75 | 81 | 13.3 | 38 | 81 | 80 | 101 |
| 75 | 78 | 85 | 13.7 | 42 | 83 | 82 | 102 |
| 76 | 80 | 88 | 14.0 | 47 | 84 | 83 | 103 |
| 77 | 84 | 92 | 14.3 | 51 | 86 | 85 | 104 |
| 78 | 87 | 95 | 14.7 | 55 | 87 | 86 | 105 |
| 79 | 90 | 99 | 15.0 | 59 | 89 | 88 | 106 |
| 80 | 94 | 103 | 15.3 | 63 | 90 | 89 | 106 |
| 81 | 97 | 108 | 15.6 | 66 | 91 | 90 | 107 |
| 82 | 101 | 112 | 15.9 | 70 | 92 | 91 | 108 |
| 83 | 105 | 117 | 16.2 | 73 | 94 | 92 | 109 |
| 84 | 109 | 121 | 16.4 | 76 | 95 | 93 | 109 |
| 85 | 113 | 126 | 16.7 | 79 | 96 | 94 | 110 |
| 86 | 117 | 131 | 16.9 | 81 | 97 | 95 | 111 |
| 87 | 121 | 137 | 17.2 | 84 | 98 | 96 | 111 |
| 88 | 126 | 142 | 17.4 | 86 | 99 | 97 | 112 |
| 89 | 130 | | 17.6 | 88 | 100 | 98 | 112 |
| 90 | 135 | | 17.8 | 90 | 101 | 98 | 113 |
| 91 | 140 | | 18.0 | | 102 | 99 | 114 |
| 92 | 145 | | 18.2 | | 103 | 100 | |
| 93 | | | 18.4 | | 103 | 100 | |
| 94 | | | 18.6 | | 104 | 101 | |
| 95 | | | 18.7 | | 105 | 102 | |
| 96 | | | 18.9 | | 106 | 102 | |
| 97 | | | 19.0 | | 106 | 103 | |
| 98 | | | 19.2 | | 107 | | |
| 99 | | | 19.3 | | 107 | | |
| 100 | | | 19.4 | | 108 | | |

## Mohs Sertlik Cetveli

Mineralin sertliği diğer bir mineralin çizmesi ile tanınır.

| Sertlik | Mineral | Formülü | Mutlak Sertlik | Resim | Çizme denemesi |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Talk | $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ | 1 |  | Tırnakla çizilenler |
| 2 | Jips | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | 2 |  | Çakı ve iğne ile çizilenler |
| 3 | Kalsit | $(CaCO_3)$ | 9 |  | Çakı ve iğne ile çizilenler |
| 4 | Fluorit | $CaF_2$ | 21 |  | Çakı ve iğne ile çizilenler |
| 5 | Apatit | $Ca_5(PO_4)_3(OH^-,Cl^-,F^-)$ | 48 |  | Eğe ile çizilenler |
| 6 | Ortoz | $KAlSi_3O_8$ | 72 |  | Eğe ile çizilenler |
| 7 | Kuvars | $SiO_2$ | 100 |  | Camı kuvvetle çizenler |
| 8 | Topaz | $Al_2SiO_4(OH^-,F^-)_2$ | 200 |  | Camı kuvvetle çizenler |
| 9 | Korund | $Al_2O_3$ | 400 |  | Camı kuvvetle çizenler |
| 10 | Elmas | C | 1500 |  | Camı kuvvetle çizenler |

## EK–5 Deney Numunelerindeki Hacimsel Kayıplar

| 53 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Çarpma Açısı (°) | Bulunan Değerler | | |
| | | İlk Hacim ($cm^3$) | Son Hacim ($cm^3$) | Hacim Kaybı ($cm^3$) |
| GF/EP (Saf) | 30 | 2.74 | 2.57 | 0.17 |
| GF/EP (Borik Asit) | 30 | 2.78 | 2.44 | 0.34 |
| GF/EP (Borax) | 30 | 2.93 | 2.49 | 0.44 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 30 | 2.87 | 2.72 | 0.15 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 30 | 2.73 | 2.60 | 0.13 |

## EK–6 Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Ortalama Değerleri

| 23 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.4904 | 4.4397 | 0.0507 | 5.07 |
| | | 60 | 4.6634 | 4.6441 | 0.0193 | 1.93 |
| | | 90 | 4.5122 | 4.4977 | 0.0145 | 1.45 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8161 | 4.6279 | 0.1882 | 18.82 |
| | | 60 | 4.8612 | 4.7426 | 0.1186 | 11.86 |
| | | 90 | 4.7818 | 4.6732 | 0.1086 | 10.86 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.9337 | 4.6868 | 0.2469 | 24.69 |
| | | 60 | 4.7603 | 4.6062 | 0.1541 | 15.41 |
| | | 90 | 4.6728 | 4.5400 | 0.1328 | 13.28 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.9962 | 4.9475 | 0.0487 | 4.87 |
| | | 60 | 5.1847 | 5.1660 | 0.0187 | 1.87 |
| | | 90 | 5.1667 | 5.1544 | 0.0123 | 1.23 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1436 | 5.1009 | 0.0427 | 4.27 |
| | | 60 | 5.2463 | 5.2292 | 0.0171 | 1.71 |
| | | 90 | 5.2821 | 5.2694 | 0.0127 | 1.27 |

| 23 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.4788 | 4.4334 | 0.0454 | 4.54 |
| | | 60 | 4.4774 | 4.4587 | 0.0187 | 1.87 |
| | | 90 | 4.4706 | 4.4565 | 0.0141 | 1.41 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6276 | 4.4583 | 0.1693 | 16.93 |
| | | 60 | 4.6100 | 4.4979 | 0.1121 | 11.21 |
| | | 90 | 4.5945 | 4.4973 | 0.0972 | 9.72 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7291 | 4.4935 | 0.2356 | 23.56 |
| | | 60 | 4.7693 | 4.6272 | 0.1421 | 14.21 |
| | | 90 | 4.6718 | 4.5474 | 0.1244 | 12.44 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1138 | 5.0705 | 0.0433 | 4.33 |
| | | 60 | 5.0214 | 5.0060 | 0.0154 | 1.54 |
| | | 90 | 5.1653 | 5.1526 | 0.0127 | 1.27 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1238 | 5.0831 | 0.0407 | 4.07 |
| | | 60 | 5.1953 | 5.1796 | 0.0157 | 1.57 |
| | | 90 | 5.0499 | 5.0371 | 0.0128 | 1.28 |

| 34 m/s Çarpma Hızı – ≈200 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6151 | 4.5265 | 0.0886 | 8.86 |
| | | 60 | 4.6863 | 4.6531 | 0.0332 | 3.32 |
| | | 90 | 4.5947 | 4.5732 | 0.0215 | 2.15 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7609 | 4.4358 | 0.3251 | 32.51 |
| | | 60 | 4.8356 | 4.7019 | 0.1337 | 13.37 |
| | | 90 | 4.7356 | 4.6143 | 0.1213 | 12.13 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8223 | 4.3785 | 0.4438 | 44.38 |
| | | 60 | 4.6869 | 4.5141 | 0.1728 | 17.28 |
| | | 90 | 4.8174 | 4.6632 | 0.1542 | 15.42 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1473 | 5.0611 | 0.0862 | 8.62 |
| | | 60 | 5.0376 | 5.0125 | 0.0251 | 2.51 |
| | | 90 | 5.2588 | 5.2355 | 0.0233 | 2.33 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0678 | 4.9850 | 0.0828 | 8.28 |
| | | 60 | 5.2911 | 5.2680 | 0.0231 | 2.31 |
| | | 90 | 5.1872 | 5.1683 | 0.0189 | 1.89 |

| 34 m/s Çarpma Hızı – ≈200 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.5510 | 4.4679 | 0.0831 | 8.31 |
| | | 60 | 4.6714 | 4.6408 | 0.0306 | 3.06 |
| | | 90 | 4.6221 | 4.6008 | 0.0213 | 2.13 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.9110 | 4.5984 | 0.3126 | 31.26 |
| | | 60 | 4.6401 | 4.5155 | 0.1246 | 12.46 |
| | | 90 | 4.6902 | 4.5779 | 0.1123 | 11.23 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8853 | 4.4562 | 0.4291 | 42.91 |
| | | 60 | 4.7555 | 4.6013 | 0.1542 | 15.42 |
| | | 90 | 4.8794 | 4.7377 | 0.1417 | 14.17 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1058 | 5.0239 | 0.0819 | 8.19 |
| | | 60 | 5.1036 | 5.0788 | 0.0248 | 2.48 |
| | | 90 | 4.9979 | 4.9774 | 0.0205 | 2.05 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0857 | 5.0043 | 0.0814 | 8.14 |
| | | 60 | 5.1938 | 5.1763 | 0.0175 | 1.75 |
| | | 90 | 5.2086 | 5.1951 | 0.0135 | 1.35 |

| 53 m/s Çarpma Hızı – ≈200 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.4953 | 4.3370 | 0.1583 | 15.83 |
| | | 60 | 4.5686 | 4.5235 | 0.0451 | 4.51 |
| | | 90 | 4.5118 | 4.4760 | 0.0358 | 3.58 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8549 | 4.3912 | 0.4637 | 46.37 |
| | | 60 | 4.8502 | 4.7105 | 0.1397 | 13.97 |
| | | 90 | 4.8245 | 4.7047 | 0.1198 | 11.98 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6968 | 4.1024 | 0.5944 | 59.44 |
| | | 60 | 4.8443 | 4.6721 | 0.1722 | 17.22 |
| | | 90 | 4.7612 | 4.6043 | 0.1569 | 15.69 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0908 | 4.9451 | 0.1457 | 14.57 |
| | | 60 | 5.2443 | 5.2038 | 0.0405 | 4.05 |
| | | 90 | 5.2132 | 5.1789 | 0.0343 | 3.43 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.2982 | 5.1554 | 0.1428 | 14.28 |
| | | 60 | 5.3730 | 5.3321 | 0.0409 | 4.09 |
| | | 90 | 5.2340 | 5.1986 | 0.0354 | 3.54 |

| 53 m/s Çarpma Hızı – ≈200 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7038 | 4.5697 | 0.1341 | 13.41 |
| | | 60 | 4.5647 | 4.5259 | 0.0388 | 3.88 |
| | | 90 | 4.5454 | 4.5158 | 0.0296 | 2.96 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7357 | 4.2940 | 0.4417 | 44.17 |
| | | 60 | 4.7419 | 4.6108 | 0.1311 | 13.11 |
| | | 90 | 4.7750 | 4.6675 | 0.1075 | 10.75 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6155 | 4.0913 | 0.5242 | 52.42 |
| | | 60 | 4.8140 | 4.6617 | 0.1523 | 15.23 |
| | | 90 | 4.7484 | 4.6089 | 0.1395 | 13.95 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1389 | 5.0140 | 0.1249 | 12.49 |
| | | 60 | 5.1987 | 5.1585 | 0.0402 | 4.02 |
| | | 90 | 5.0793 | 5.0568 | 0.0225 | 2.25 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0945 | 4.9642 | 0.1303 | 13.03 |
| | | 60 | 5.1586 | 5.1207 | 0.0379 | 3.79 |
| | | 90 | 5.1986 | 5.1705 | 0.0281 | 2.81 |

| 23 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6444 | 4.5749 | 0.0695 | 6.95 |
| | | 60 | 4.6094 | 4.5890 | 0.0204 | 2.04 |
| | | 90 | 4.7096 | 4.6925 | 0.0171 | 1.71 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7569 | 4.5132 | 0.2437 | 24.37 |
| | | 60 | 4.8090 | 4.6838 | 0.1252 | 12.52 |
| | | 90 | 4.8434 | 4.7340 | 0.1094 | 10.94 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8710 | 4.5341 | 0.3369 | 33.69 |
| | | 60 | 4.8833 | 4.7067 | 0.1766 | 17.66 |
| | | 90 | 4.8156 | 4.6712 | 0.1444 | 14.44 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0093 | 4.9466 | 0.0627 | 6.27 |
| | | 60 | 5.2816 | 5.2623 | 0.0193 | 1.93 |
| | | 90 | 5.1136 | 5.0954 | 0.0182 | 1.82 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1282 | 5.0688 | 0.0594 | 5.94 |
| | | 60 | 5.1943 | 5.1769 | 0.0174 | 1.74 |
| | | 90 | 5.2584 | 5.2430 | 0.0154 | 1.54 |

| 23 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.4964 | 4.4336 | 0.0628 | 6.28 |
| | | 60 | 4.6373 | 4.6174 | 0.0199 | 1.99 |
| | | 90 | 4.7259 | 4.7101 | 0.0158 | 1.58 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7095 | 4.4956 | 0.2139 | 21.39 |
| | | 60 | 4.7461 | 4.6308 | 0.1153 | 11.53 |
| | | 90 | 4.7587 | 4.6548 | 0.1039 | 10.39 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8675 | 4.5520 | 0.3155 | 31.55 |
| | | 60 | 4.8533 | 4.6912 | 0.1621 | 16.21 |
| | | 90 | 4.7642 | 4.6298 | 0.1344 | 13.44 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0874 | 5.0311 | 0.0563 | 5.63 |
| | | 60 | 5.1302 | 5.1139 | 0.0163 | 1.63 |
| | | 90 | 5.2151 | 5.2012 | 0.0139 | 1.39 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0703 | 5.0201 | 0.0502 | 5.02 |
| | | 60 | 4.9920 | 4.9758 | 0.0162 | 1.62 |
| | | 90 | 5.0789 | 5.0658 | 0.0131 | 1.31 |

| 34 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.3864 | 4.1760 | 0.2104 | 21.04 |
| | | 60 | 4.6995 | 4.6642 | 0.0353 | 3.53 |
| | | 90 | 4.3426 | 4.3171 | 0.0255 | 2.55 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6783 | 4.1758 | 0.5025 | 50.25 |
| | | 60 | 4.8589 | 4.6958 | 0.1631 | 16.31 |
| | | 90 | 4.8423 | 4.7191 | 0.1232 | 12.32 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7824 | 4.2110 | 0.5714 | 57.14 |
| | | 60 | 4.8251 | 4.6262 | 0.1989 | 19.89 |
| | | 90 | 4.7667 | 4.6001 | 0.1666 | 16.66 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1996 | 5.0194 | 0.1802 | 18.02 |
| | | 60 | 4.9526 | 4.9177 | 0.0349 | 3.49 |
| | | 90 | 5.1598 | 5.1356 | 0.0242 | 2.42 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.3756 | 5.1838 | 0.1918 | 19.18 |
| | | 60 | 5.2436 | 5.2194 | 0.0242 | 2.42 |
| | | 90 | 5.2906 | 5.2712 | 0.0194 | 1.94 |

| 34 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.5322 | 4.3404 | 0.1918 | 19.18 |
| | | 60 | 4.6979 | 4.6665 | 0.0314 | 3.14 |
| | | 90 | 4.4773 | 4.7555 | 0.0218 | 2.18 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8501 | 4.3983 | 0.4518 | 45.18 |
| | | 60 | 4.8843 | 4.7314 | 0.1529 | 15.29 |
| | | 90 | 4.7561 | 4.6323 | 0.1238 | 12.38 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.9427 | 4.3881 | 0.5546 | 55.46 |
| | | 60 | 4.9476 | 4.7648 | 0.1828 | 18.28 |
| | | 90 | 4.8604 | 4.6942 | 0.1662 | 16.62 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0908 | 4.9311 | 0.1597 | 15.97 |
| | | 60 | 5.1246 | 5.0988 | 0.0258 | 2.58 |
| | | 90 | 5.0852 | 5.0641 | 0.0211 | 2.11 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.2647 | 5.1225 | 0.1422 | 14.22 |
| | | 60 | 5.0803 | 5.0618 | 0.0185 | 1.85 |
| | | 90 | 5.1443 | 5.1288 | 0.0155 | 1.55 |

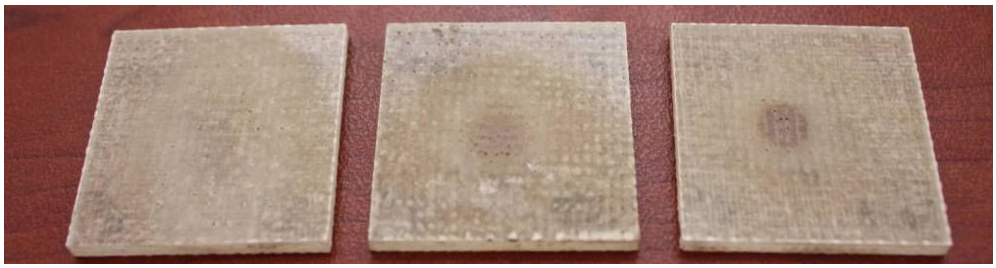
| 53 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7107 | 4.4221 | 0.2886 | 28.86 |
| | | 60 | 4.7034 | 4.6576 | 0.0458 | 4.58 |
| | | 90 | 4.6580 | 4.6208 | 0.0372 | 3.72 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6797 | 4.0966 | 0.5831 | 58.31 |
| | | 60 | 4.7581 | 4.5602 | 0.1979 | 19.79 |
| | | 90 | 4.7330 | 4.5593 | 0.1737 | 17.37 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6439 | 3.9246 | 0.7193 | 71.93 |
| | | 60 | 4.8752 | 4.6029 | 0.2723 | 27.23 |
| | | 90 | 4.8032 | 4.6072 | 0.1960 | 19.60 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0276 | 4.7559 | 0.2717 | 27.17 |
| | | 60 | 5.2206 | 5.1772 | 0.0434 | 4.34 |
| | | 90 | 5.2603 | 5.2252 | 0.0351 | 3.51 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1940 | 4.9248 | 0.2692 | 26.92 |
| | | 60 | 5.2143 | 5.1727 | 0.0416 | 4.16 |
| | | 90 | 5.2737 | 5.2375 | 0.0362 | 3.62 |

| 53 m/s Çarpma Hızı – ≈400 µm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme | Deney No | Çarpma Açısı (°) | Tespit Edilen Değerler | | | |
| | | | İlk Ağırlık (g) | Son Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (g) | Erozyon Oranı (mg/kg) |
| GF/EP (Saf) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.6760 | 4.4176 | 0.2584 | 25.84 |
| | | 60 | 4.6677 | 4.6265 | 0.0412 | 4.12 |
| | | 90 | 4.7081 | 4.6782 | 0.0299 | 2.99 |
| GF/EP (Borik Asit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.7026 | 4.1596 | 0.5430 | 54.30 |
| | | 60 | 4.8137 | 4.6225 | 0.1912 | 19.12 |
| | | 90 | 4.8546 | 4.7235 | 0.1311 | 13.11 |
| GF/EP (Borax) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 4.8636 | 4.1653 | 0.6983 | 69.83 |
| | | 60 | 4.8840 | 4.6339 | 0.2501 | 25.01 |
| | | 90 | 4.8111 | 4.6298 | 0.1813 | 18.13 |
| GF/EP (Silisyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.0056 | 4.7744 | 0.2312 | 23.12 |
| | | 60 | 5.0509 | 5.0101 | 0.0408 | 4.08 |
| | | 90 | 5.0545 | 5.0298 | 0.0247 | 2.47 |
| GF/EP (Alüminyum Oksit) | 1, 2, 3 Ort. | 30 | 5.1344 | 4.8962 | 0.2382 | 23.82 |
| | | 60 | 5.1410 | 5.1023 | 0.0387 | 3.87 |
| | | 90 | 5.1136 | 5.0844 | 0.0292 | 2.92 |

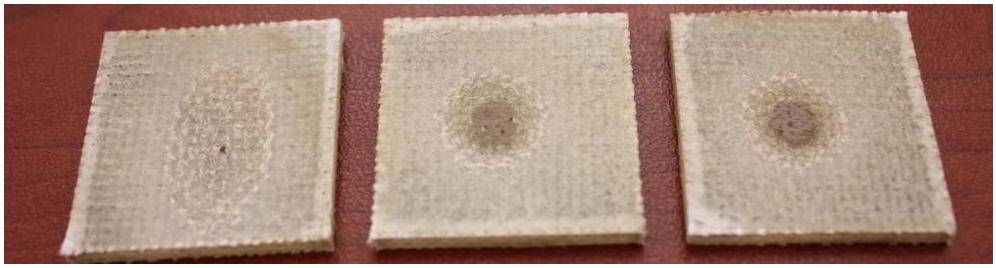
## EK–7 Aşınmış Deney Numunelerinin Fotograf Görüntüleri

*23 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

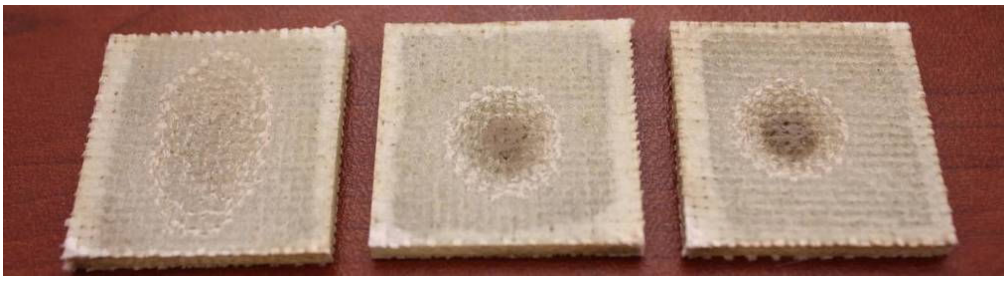
*30°* *60°* *90°*



*GF/EP (Saf)*



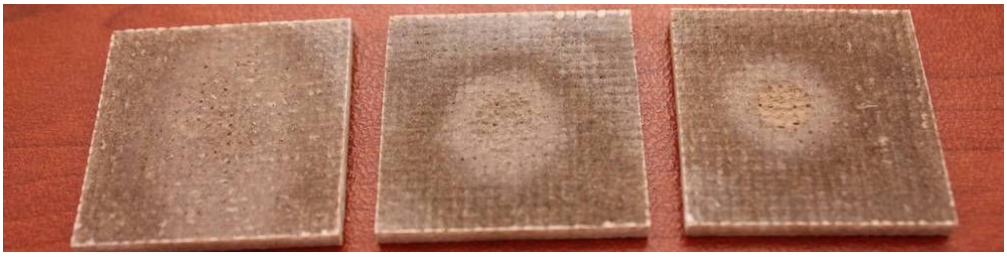
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



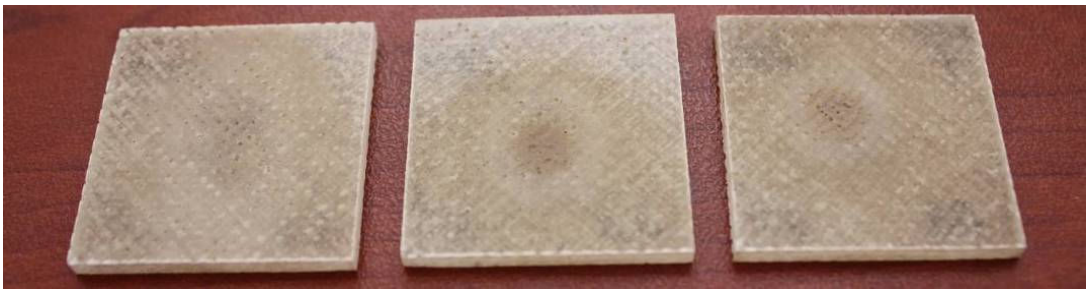
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



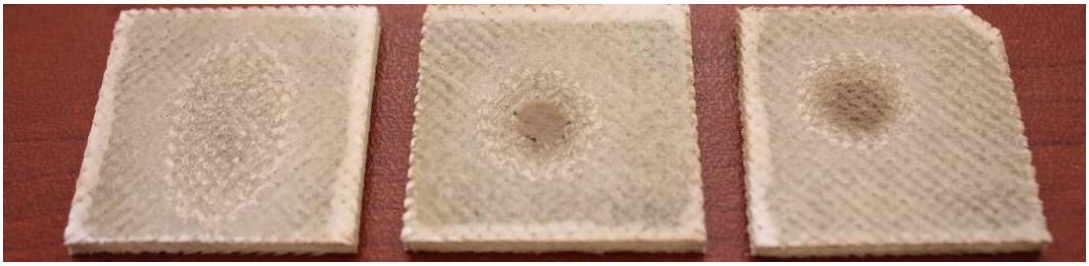
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*23 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

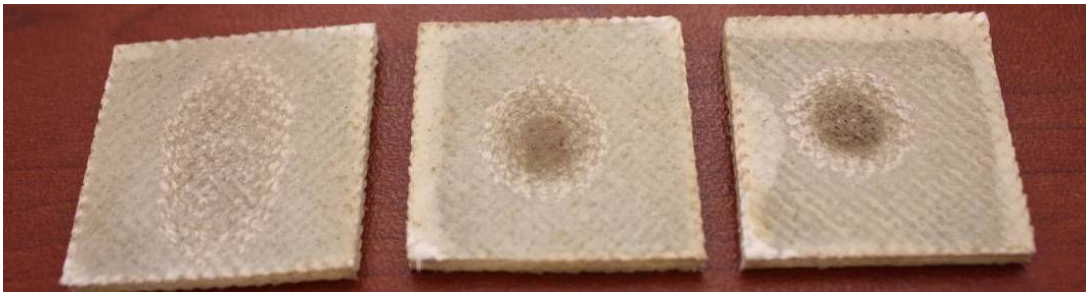
*30°* *60°* *90°*



*GF/EP (Saf)*



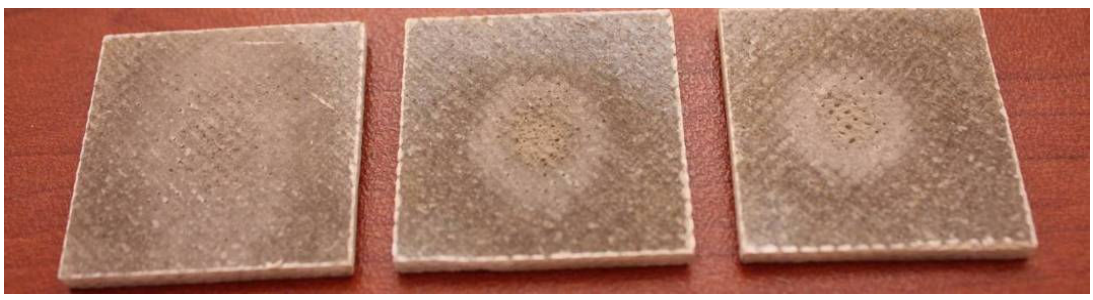
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



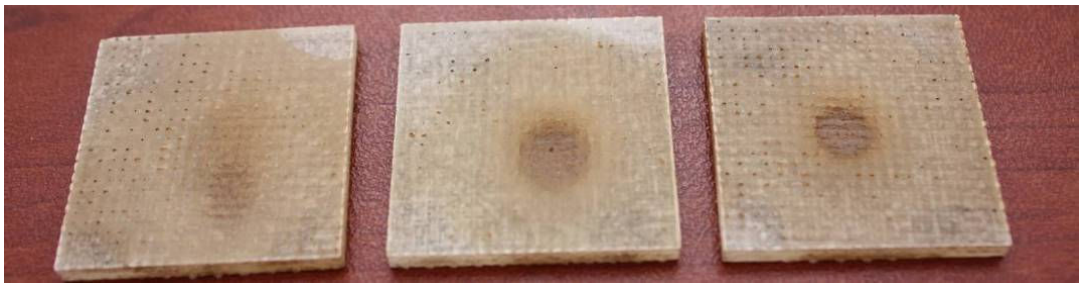
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



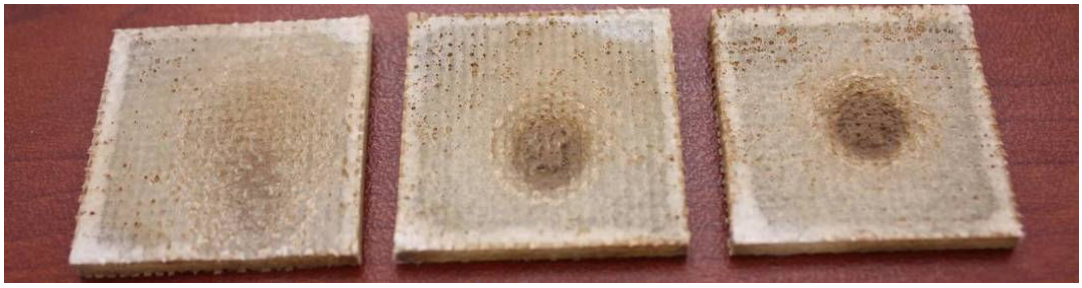
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*34 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

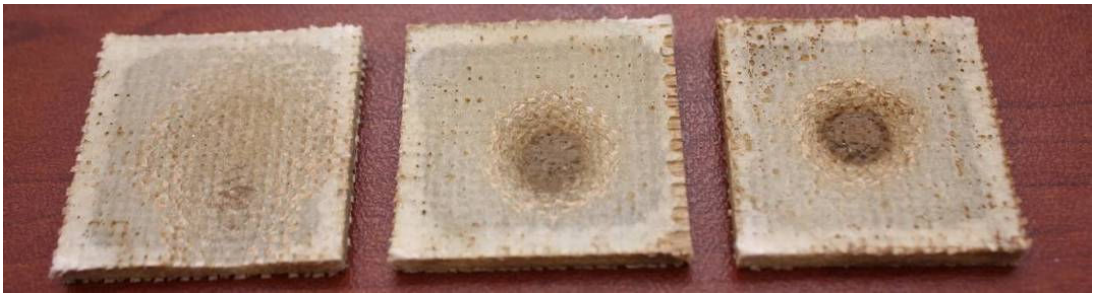
*30°* *60°* *90°*



*GF/EP (Saf)*



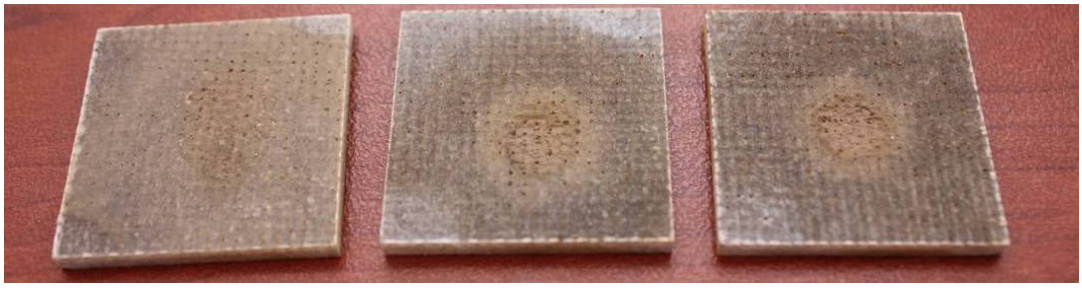
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



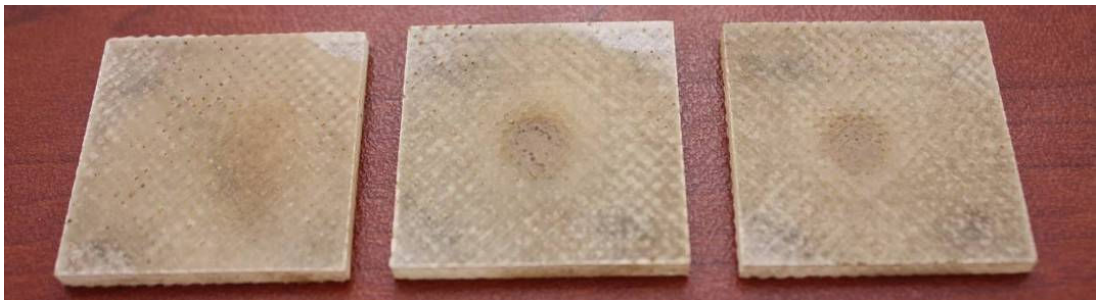
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



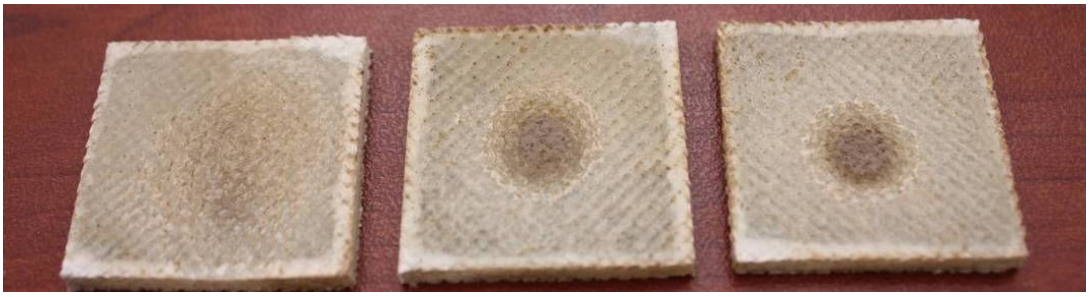
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*34 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

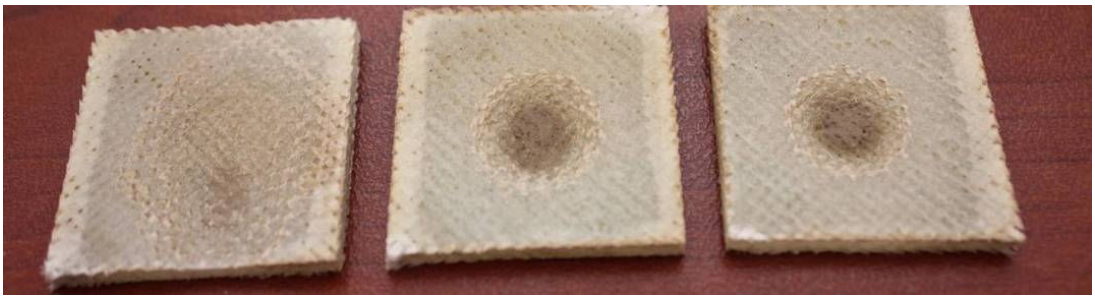
*30°* *60°* *90°*



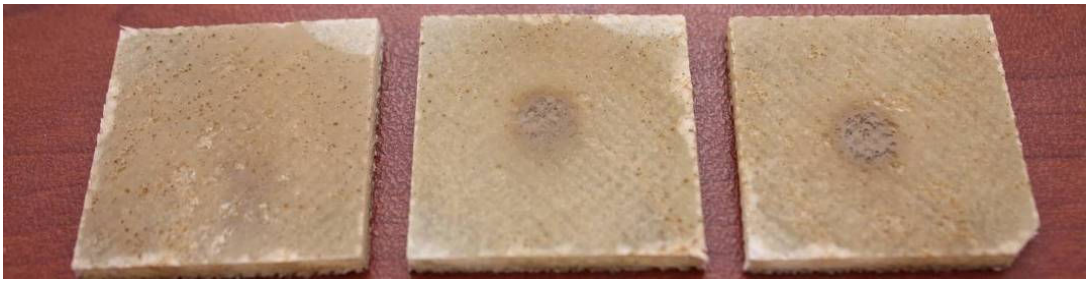
*GF/EP (Saf)*



*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



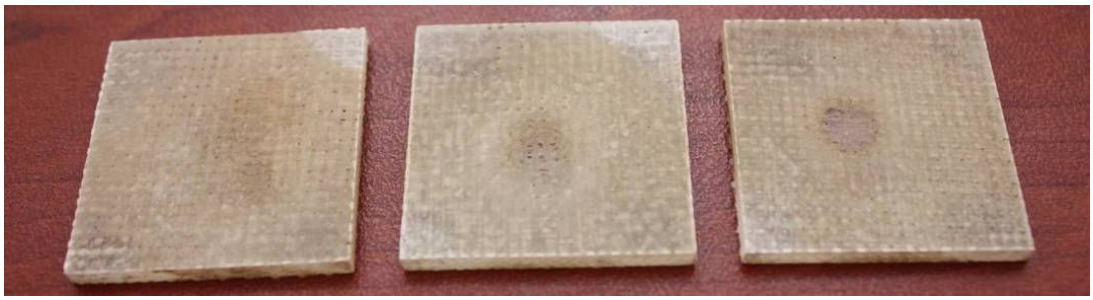
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



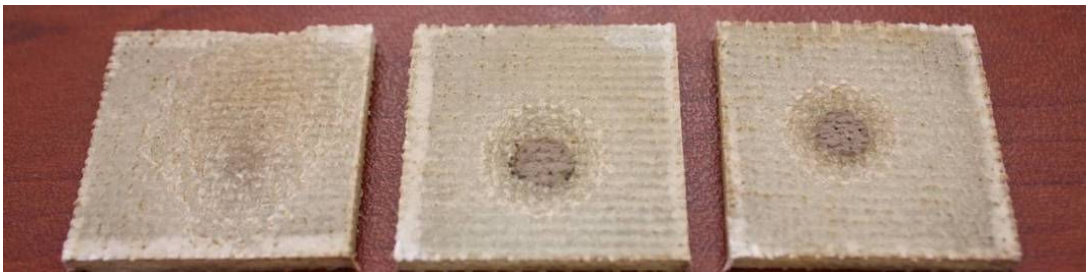
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*53 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

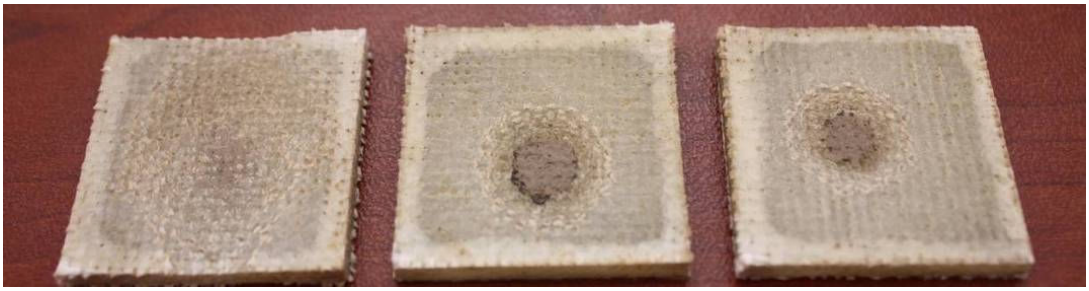
*30°* *60°* *90°*



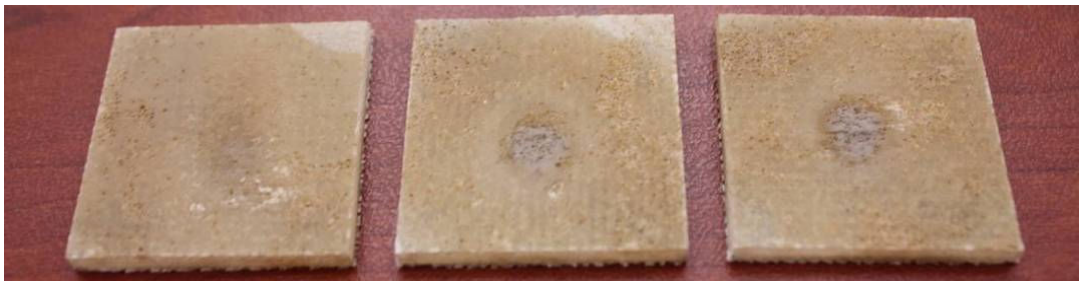
*GF/EP (Saf)*



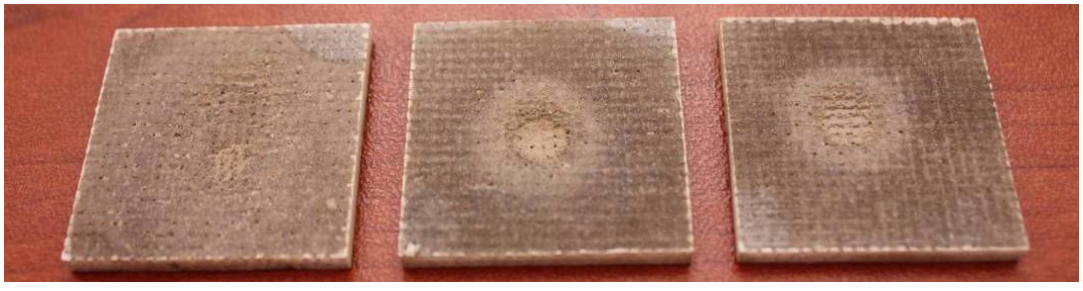
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



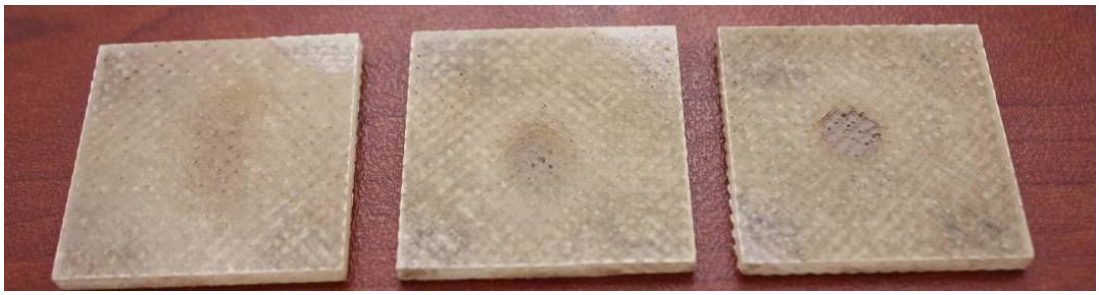
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



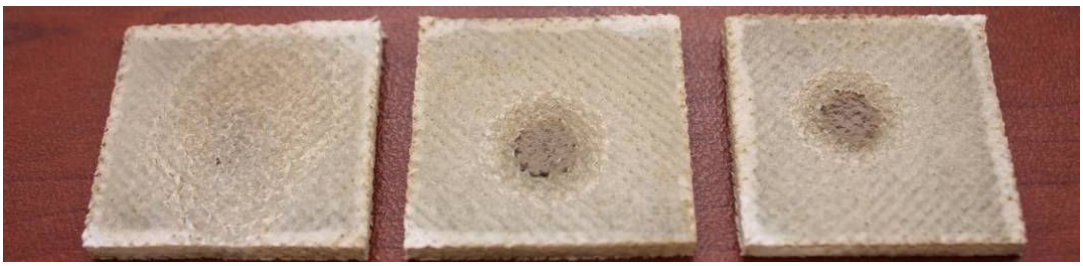
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*53 m/s Çarpma Hızı – ≈200 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

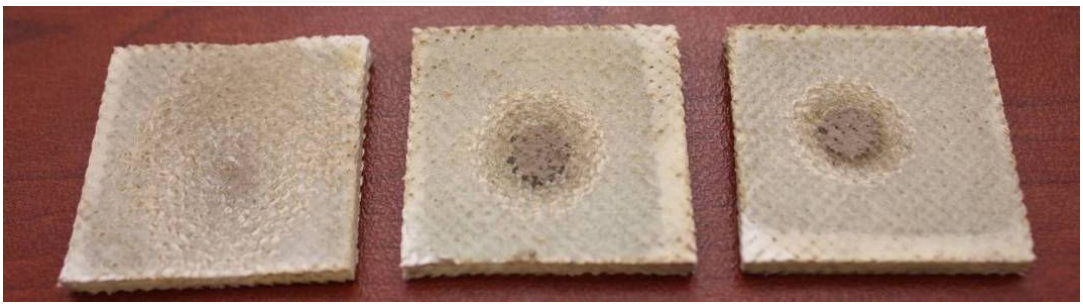
*30°* *60°* *90°*



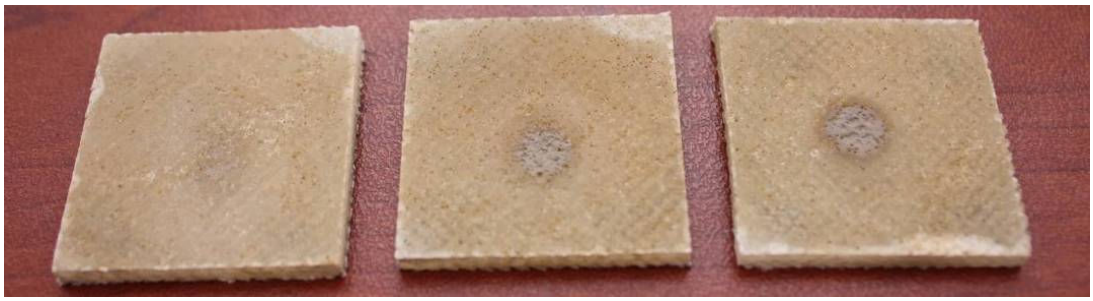
*GF/EP (Saf)*



*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



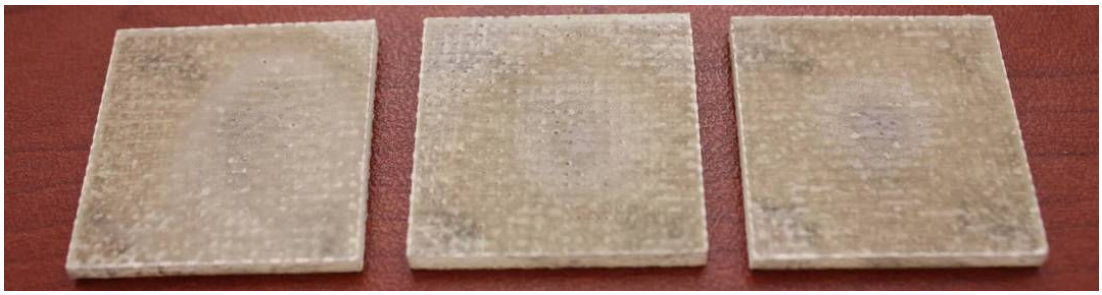
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



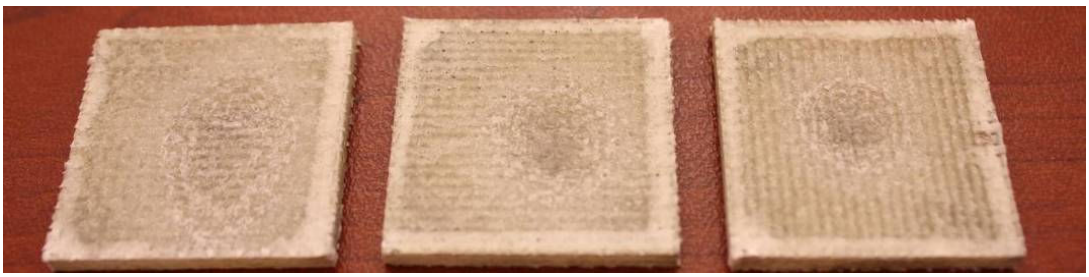
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*23 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

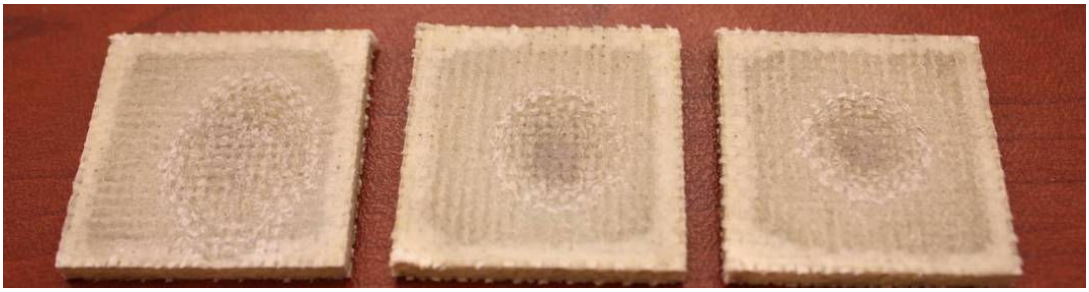
*30°* *60°* *90°*



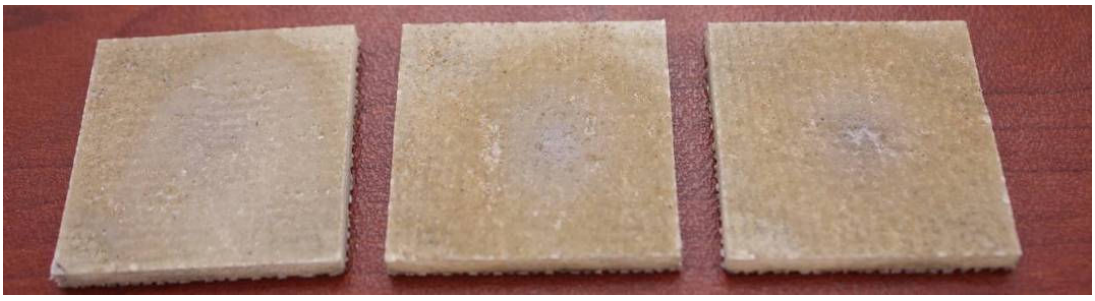
*GF/EP (Saf)*



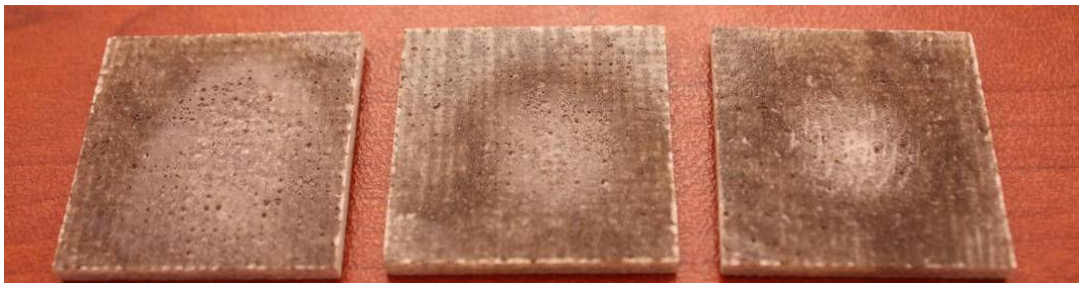
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



*GF/EP (Silisyum Oksit)*



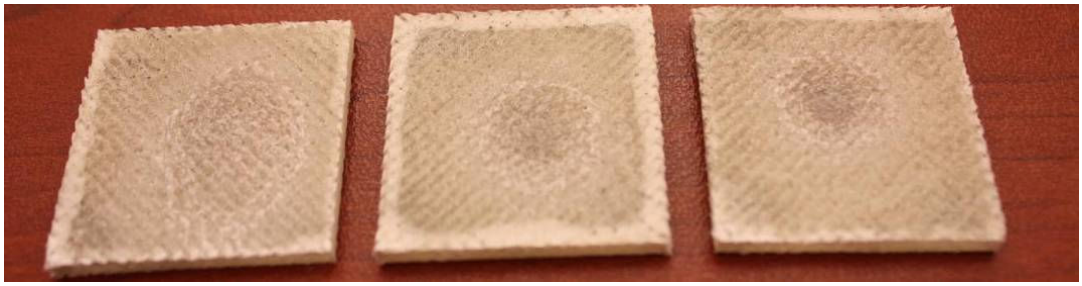
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*23 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

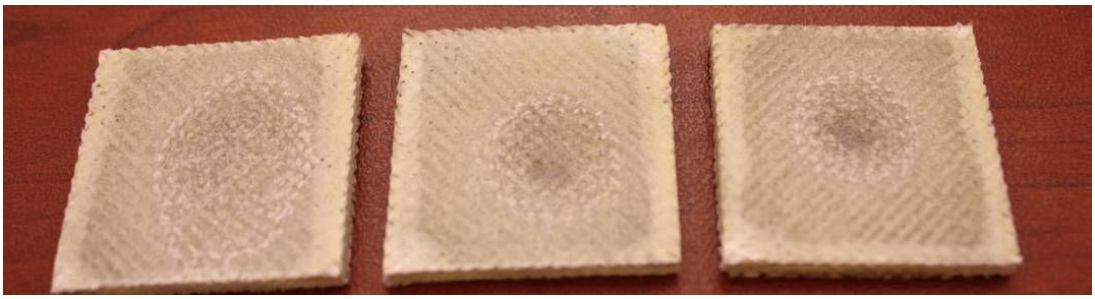
*30°* *60°* *90°*



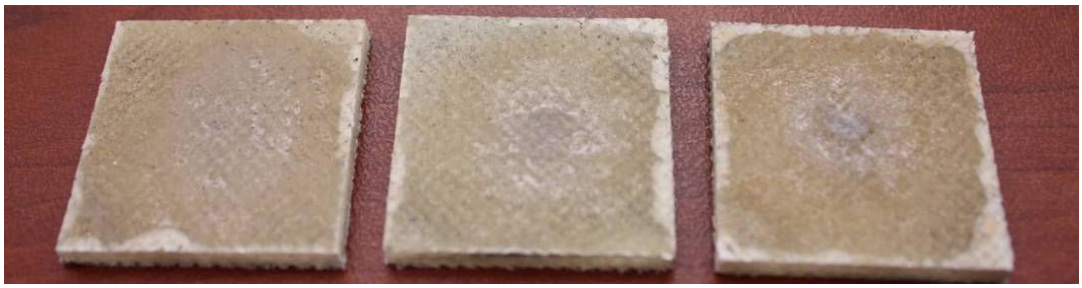
*GF/EP (Saf)*



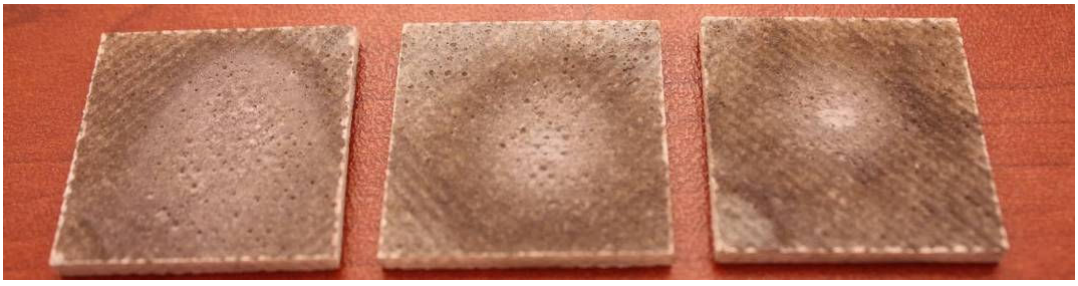
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



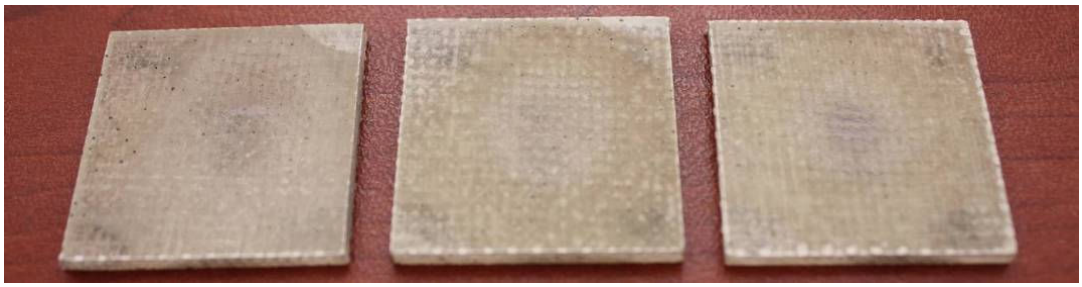
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



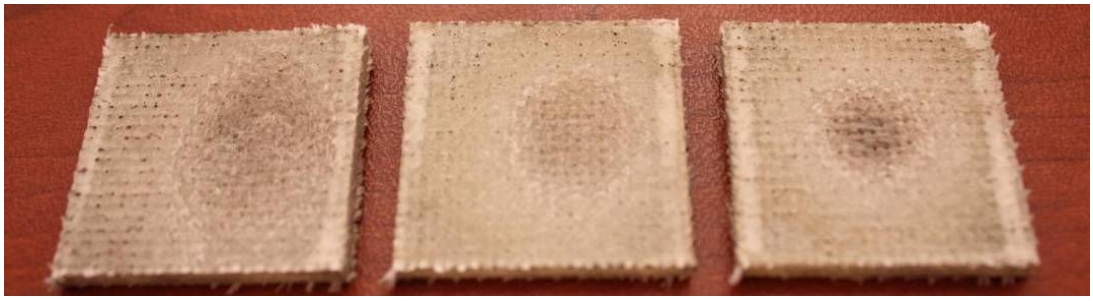
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*34 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

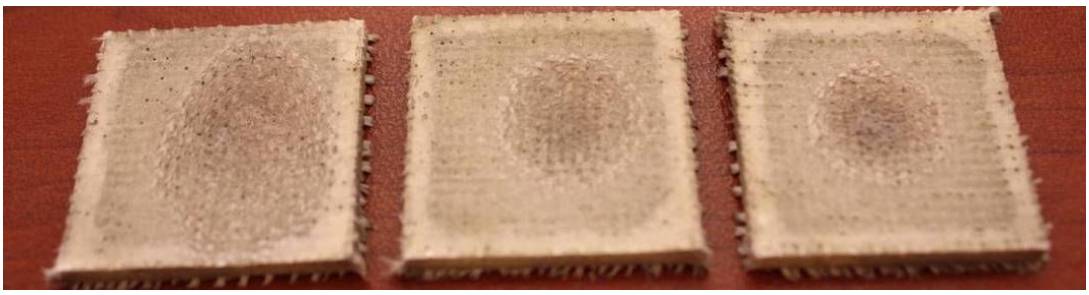
*30°* *60°* *90°*



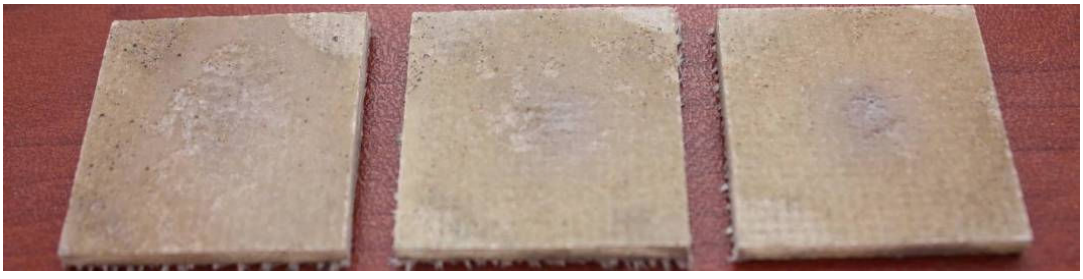
*GF/EP (Saf)*



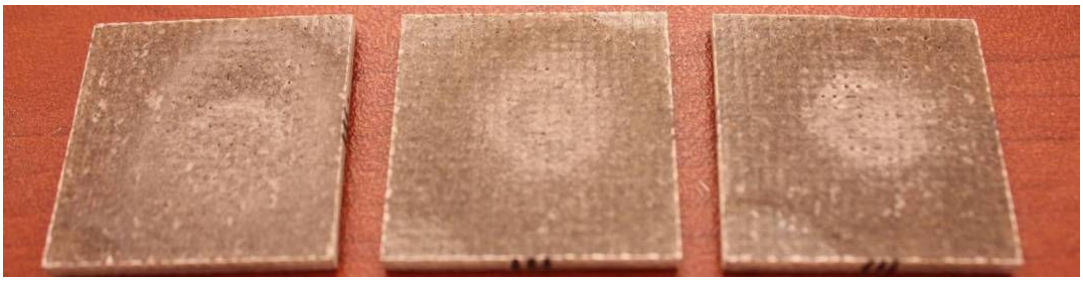
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



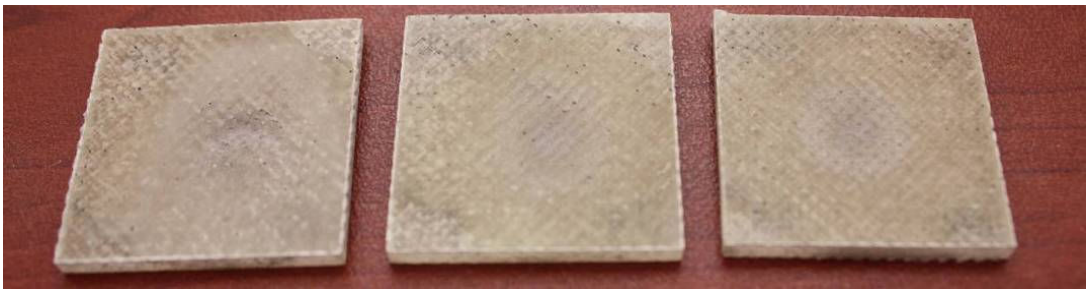
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



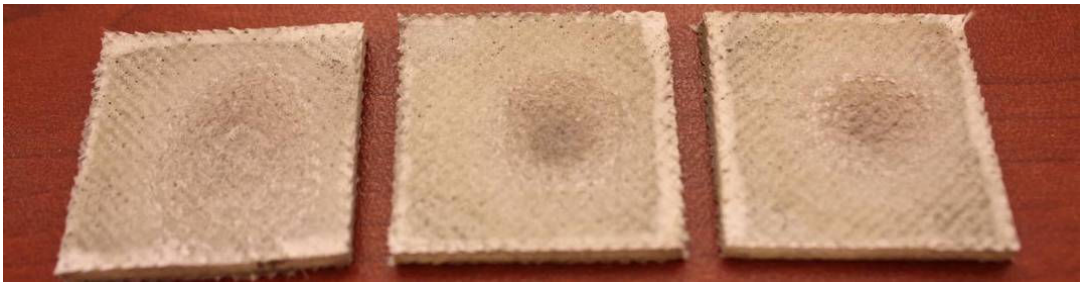
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*34 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

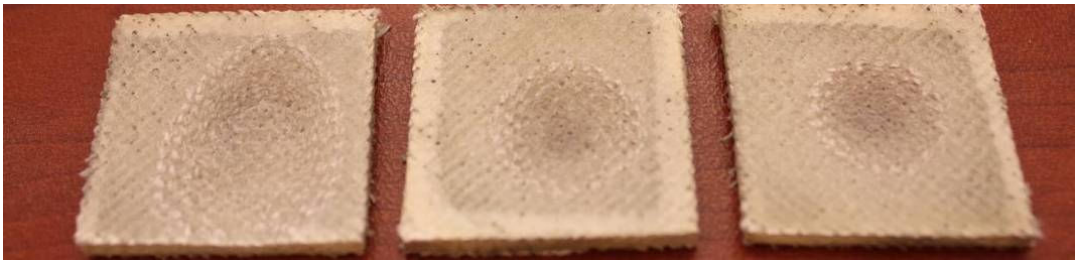
*30°* *60°* *90°*



*GF/EP (Saf)*



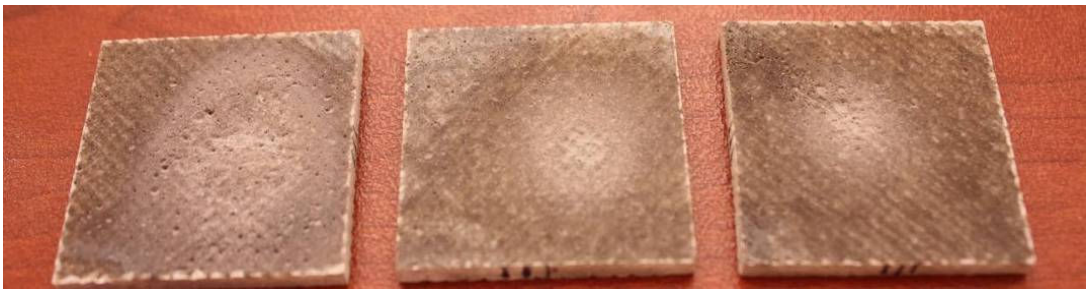
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



*GF/EP (Silisyum Oksit)*



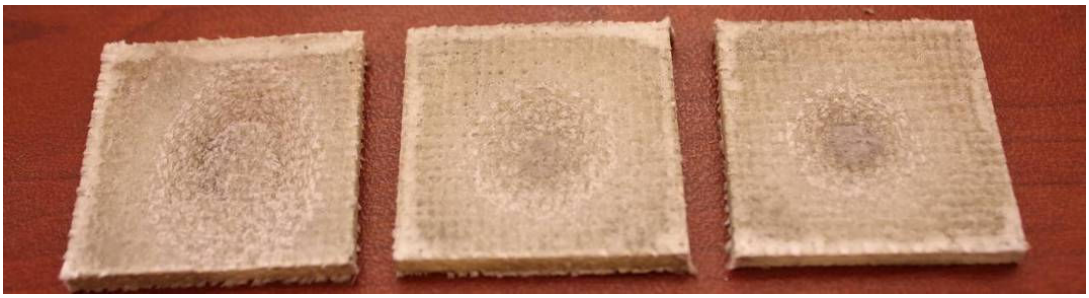
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*53 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 0° Fiber Doğrultusu*

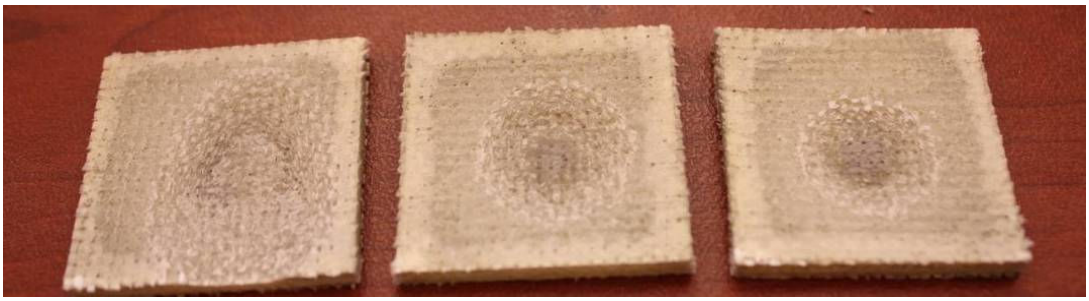
*30°* *60°* *90°*



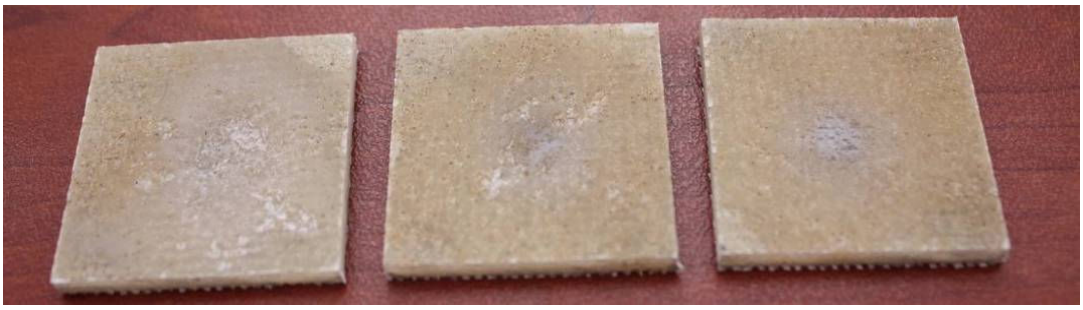
*GF/EP (Saf)*



*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



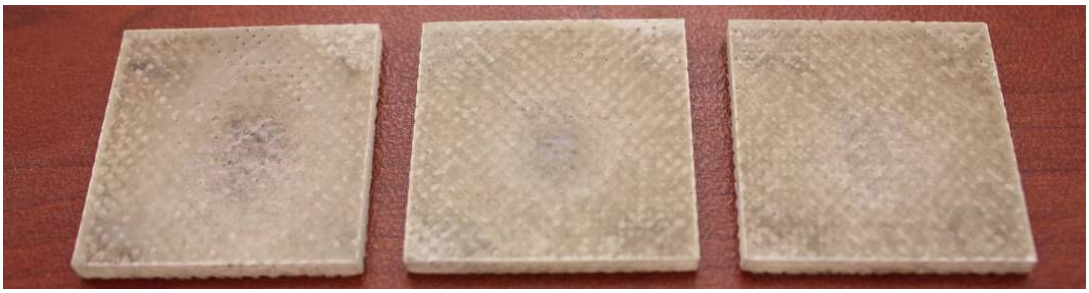
*GF/EP (Silisyum Oksit)*



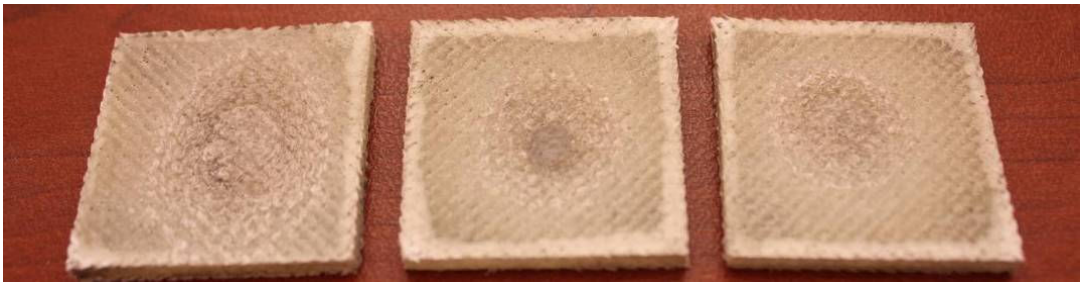
*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

*53 m/s Çarpma Hızı – ≈400 μm Aşındırıcı Partikül Boyutu – 45° Fiber Doğrultusu*

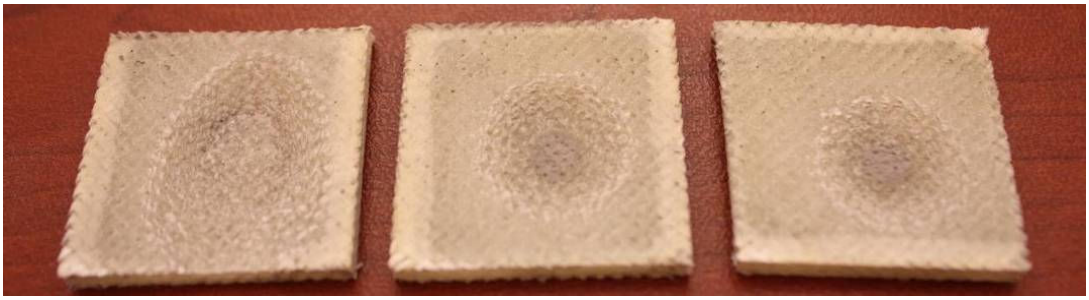
*30°* *60°* *90°*



*GF/EP (Saf)*



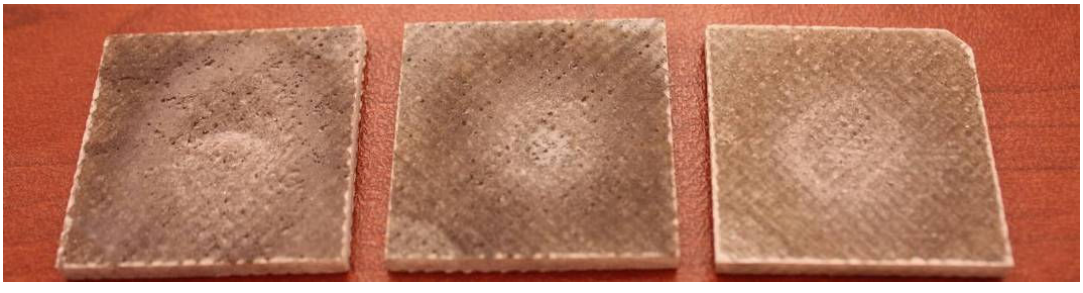
*GF/EP (Borik Asit)*



*GF/EP (Borax)*



*GF/EP (Silisyum Oksit)*



*GF/EP (Alüminyum Oksit)*

## EK–8 İstatistiksel Değerlendirmenin Detayları

### *Genel Analiz*

**Between-Subjects Factors**

| | | Value Label | N |
|---|---|---|---|
| boyut | 1,00 | 200 m | 90 |
| | 2,00 | 400 m | 90 |
| hiz | 1,00 | 23 s | 60 |
| | 2,00 | 34 s | 60 |
| | 3,00 | 53 s | 60 |
| derece | 1,00 | 0 derece | 90 |
| | 2,00 | 45 derece | 90 |
| madde | 1,00 | saf | 36 |
| | 2,00 | borikasit | 36 |
| | 3,00 | borax | 36 |
| | 4,00 | silisyumoksit | 36 |
| | 5,00 | alüminyum | 36 |
| açi | 1,00 | 30 | 60 |
| | 2,00 | 60 | 60 |
| | 3,00 | 90 | 60 |

**Tests of Between-Subjects Effects**

Dependent Variable: deðer

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 29642,043[a] | 10 | 2964,204 | 67,253 | ,000 |
| Intercept | 31235,027 | 1 | 31235,027 | 708,671 | ,000 |
| boyut | 687,886 | 1 | 687,886 | 15,607 | ,000 |
| hiz | 2548,792 | 2 | 1274,396 | 28,914 | ,000 |
| derece | 61,858 | 1 | 61,858 | 1,403 | ,238 |
| madde | 14685,134 | 4 | 3671,283 | 83,295 | ,000 |
| açi | 11658,372 | 2 | 5829,186 | 132,255 | ,000 |
| Error | 7448,759 | 169 | 44,075 | | |
| Total | 68325,829 | 180 | | | |
| Corrected Total | 37090,801 | 179 | | | |

a. R Squared = ,799 (Adjusted R Squared = ,787)

## ***Boyut***

Dependent Variable: deðer

| boyut | Mean | Std. Error | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 200 m | 11,218 | ,700 | 9,837 | 12,600 |
| 400 m | 15,128 | ,700 | 13,746 | 16,509 |

**Independent Samples Test**

| | | Levene's Test for Equality of Variances | | t-test for Equality of Means | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | 95% Confidence Interval of the Difference | |
| | | F | Sig. | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | Std. Error Difference | Lower | Upper |
| deðer | Equal variances assumed | 5,472 | ,020 | -1,834 | 178 | ,048 | -3,90978 | 2,13183 | -8,11668 | ,29713 |
| | Equal variances not assumed | | | -1,834 | 165,060 | ,048 | -3,90978 | 2,13183 | -8,11894 | ,29939 |

## ***Fiber Doğrultusu (Derece)***

Dependent Variable: deðer

| derece | Mean | Std. Error | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 0 derece | 13,759 | ,700 | 12,378 | 15,141 |
| 45 derece | 12,587 | ,700 | 11,205 | 13,968 |

**Independent Samples Test**

| | | Levene's Test for Equality of Variances | | t-test for Equality of Means | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | 95% Confidence Interval of the Difference | |
| | | F | Sig. | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | Std. Error Difference | Lower | Upper |
| deðer | Equal variances assumed | ,311 | ,578 | ,545 | 178 | ,586 | 1,17244 | 2,15008 | -3,07048 | 5,41537 |
| | Equal variances not assumed | | | ,545 | 177,315 | ,586 | 1,17244 | 2,15008 | -3,07059 | 5,41548 |

## ***Hız***

Dependent Variable: deðer

| hiz | Mean | Std. Error | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 23 s | 8,384 | ,857 | 6,692 | 10,076 |
| 34 s | 13,557 | ,857 | 11,865 | 15,249 |
| 53 s | 17,578 | ,857 | 15,886 | 19,270 |

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: deðer

| | (I) hiz | (J) hiz | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| Tukey HSD | 23 s | 34 s | -5,1727* | 1,21210 | ,000 | -8,0387 | -2,3066 |
| | | 53 s | -9,1933* | 1,21210 | ,000 | -12,0594 | -6,3273 |
| | 34 s | 23 s | 5,1727* | 1,21210 | ,000 | 2,3066 | 8,0387 |
| | | 53 s | -4,0207* | 1,21210 | ,003 | -6,8867 | -1,1546 |
| | 53 s | 23 s | 9,1933* | 1,21210 | ,000 | 6,3273 | 12,0594 |
| | | 34 s | 4,0207* | 1,21210 | ,003 | 1,1546 | 6,8867 |
| Tamhane | 23 s | 34 s | -5,1727* | 2,11461 | ,048 | -10,3134 | -,0319 |
| | | 53 s | -9,1933* | 2,52777 | ,001 | -15,3538 | -3,0329 |
| | 34 s | 23 s | 5,1727* | 2,11461 | ,048 | ,0319 | 10,3134 |
| | | 53 s | -4,0207 | 2,94178 | ,437 | -11,1510 | 3,1097 |
| | 53 s | 23 s | 9,1933* | 2,52777 | ,001 | 3,0329 | 15,3538 |
| | | 34 s | 4,0207 | 2,94178 | ,437 | -3,1097 | 11,1510 |

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

**deðer**

| | hiz | N | Subset | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Tukey HSD[a,b] | 23 s | 60 | 8,3843 | | |
| | 34 s | 60 | | 13,5570 | |
| | 53 s | 60 | | | 17,5777 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on Type III Sum of Squares
The error term is Mean Square(Error) = 44,075.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 60,000.

b. Alpha = ,05.

## ***Madde***

Dependent Variable: deðer

| madde | Mean | Std. Error | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lower Bound | Upper Bound |
| saf | 6,404 | 1,106 | 4,220 | 8,588 |
| borikasit | 21,044 | 1,106 | 18,860 | 23,228 |
| borax | 26,941 | 1,106 | 24,757 | 29,126 |
| silisyumoksit | 5,835 | 1,106 | 3,650 | 8,019 |
| alüminyum | 5,641 | 1,106 | 3,457 | 7,825 |

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: deðer

| | (I) madde | (J) madde | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| Tukey HSD | saf | borikasit | -14,6397* | 1,56481 | ,000 | -18,9546 | -10,3248 |
| | | borax | -20,5372* | 1,56481 | ,000 | -24,8521 | -16,2223 |
| | | silisyumoksit | ,5694 | 1,56481 | ,996 | -3,7455 | 4,8843 |
| | | alüminyum | ,7633 | 1,56481 | ,988 | -3,5516 | 5,0782 |
| | borikasit | saf | 14,6397* | 1,56481 | ,000 | 10,3248 | 18,9546 |
| | | borax | -5,8975* | 1,56481 | ,002 | -10,2124 | -1,5826 |
| | | silisyumoksit | 15,2092* | 1,56481 | ,000 | 10,8943 | 19,5241 |
| | | alüminyum | 15,4031* | 1,56481 | ,000 | 11,0882 | 19,7180 |
| | borax | saf | 20,5372* | 1,56481 | ,000 | 16,2223 | 24,8521 |
| | | borikasit | 5,8975* | 1,56481 | ,002 | 1,5826 | 10,2124 |
| | | silisyumoksit | 21,1067* | 1,56481 | ,000 | 16,7918 | 25,4216 |
| | | alüminyum | 21,3006* | 1,56481 | ,000 | 16,9857 | 25,6155 |
| | silisyumoksit | saf | -,5694 | 1,56481 | ,996 | -4,8843 | 3,7455 |
| | | borikasit | -15,2092* | 1,56481 | ,000 | -19,5241 | -10,8943 |
| | | borax | -21,1067* | 1,56481 | ,000 | -25,4216 | -16,7918 |
| | | alüminyum | ,1939 | 1,56481 | 1,000 | -4,1210 | 4,5088 |
| | alüminyum | saf | -,7633 | 1,56481 | ,988 | -5,0782 | 3,5516 |
| | | borikasit | -15,4031* | 1,56481 | ,000 | -19,7180 | -11,0882 |
| | | borax | -21,3006* | 1,56481 | ,000 | -25,6155 | -16,9857 |
| | | silisyumoksit | -,1939 | 1,56481 | 1,000 | -4,5088 | 4,1210 |
| Tamhane | saf | borikasit | -14,6397* | 2,64536 | ,000 | -22,3775 | -6,9019 |
| | | borax | -20,5372* | 3,14238 | ,000 | -29,7750 | -11,2994 |
| | | silisyumoksit | ,5694 | 1,58805 | 1,000 | -4,0226 | 5,1615 |
| | | alüminyum | ,7633 | 1,60008 | 1,000 | -3,8630 | 5,3897 |
| | borikasit | saf | 14,6397* | 2,64536 | ,000 | 6,9019 | 22,3775 |
| | | borax | -5,8975 | 3,75379 | ,724 | -16,7630 | 4,9680 |
| | | silisyumoksit | 15,2092* | 2,59582 | ,000 | 7,5968 | 22,8215 |
| | | alüminyum | 15,4031* | 2,60319 | ,000 | 7,7722 | 23,0339 |
| | borax | saf | 20,5372* | 3,14238 | ,000 | 11,2994 | 29,7750 |
| | | borikasit | 5,8975 | 3,75379 | ,724 | -4,9680 | 16,7630 |
| | | silisyumoksit | 21,1067* | 3,10079 | ,000 | 11,9705 | 30,2429 |
| | | alüminyum | 21,3006* | 3,10696 | ,000 | 12,1494 | 30,4518 |
| | silisyumoksit | saf | -,5694 | 1,58805 | 1,000 | -5,1615 | 4,0226 |
| | | borikasit | -15,2092* | 2,59582 | ,000 | -22,8215 | -7,5968 |
| | | borax | -21,1067* | 3,10079 | ,000 | -30,2429 | -11,9705 |
| | | alüminyum | ,1939 | 1,51677 | 1,000 | -4,1906 | 4,5784 |
| | alüminyum | saf | -,7633 | 1,60008 | 1,000 | -5,3897 | 3,8630 |
| | | borikasit | -15,4031* | 2,60319 | ,000 | -23,0339 | -7,7722 |
| | | borax | -21,3006* | 3,10696 | ,000 | -30,4518 | -12,1494 |
| | | silisyumoksit | -,1939 | 1,51677 | 1,000 | -4,5784 | 4,1906 |

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

**deðer**

| | madde | N | Subset | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Tukey HSD [a,b] | alüminyum | 36 | 5,6408 | | |
| | silisyumoksit | 36 | 5,8347 | | |
| | saf | 36 | 6,4042 | | |
| | borikasit | 36 | | 21,0439 | |
| | borax | 36 | | | 26,9414 |
| | Sig. | | ,988 | 1,000 | 1,000 |

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on Type III Sum of Squares
The error term is Mean Square(Error) = 44,075.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 36,000.

b. Alpha = ,05.

## ***Açı***

Dependent Variable: deðer

| açi | Mean | Std. Error | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 30 | 24,524 | ,857 | 22,832 | 26,216 |
| 60 | 8,216 | ,857 | 6,524 | 9,908 |
| 90 | 6,779 | ,857 | 5,087 | 8,471 |

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: deðer

| | (I) açi | (J) açi | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| Tukey HSD | 30 | 60 | 16,3082* | 1,21210 | ,000 | 13,4421 | 19,1742 |
| | | 90 | 17,7453* | 1,21210 | ,000 | 14,8793 | 20,6114 |
| | 60 | 30 | -16,3082* | 1,21210 | ,000 | -19,1742 | -13,4421 |
| | | 90 | 1,4372 | 1,21210 | ,463 | -1,4289 | 4,3032 |
| | 90 | 30 | -17,7453* | 1,21210 | ,000 | -20,6114 | -14,8793 |
| | | 60 | -1,4372 | 1,21210 | ,463 | -4,3032 | 1,4289 |
| Tamhane | 30 | 60 | 16,3082* | 2,56957 | ,000 | 10,0343 | 22,5820 |
| | | 90 | 17,7453* | 2,51873 | ,000 | 11,5857 | 23,9050 |
| | 60 | 30 | -16,3082* | 2,56957 | ,000 | -22,5820 | -10,0343 |
| | | 90 | 1,4372 | 1,19243 | ,545 | -1,4524 | 4,3267 |
| | 90 | 30 | -17,7453* | 2,51873 | ,000 | -23,9050 | -11,5857 |
| | | 60 | -1,4372 | 1,19243 | ,545 | -4,3267 | 1,4524 |

Based on observed means.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

**deðer**

| | açi | N | Subset | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 |
| Tukey HSD [a,b] | 90 | 60 | 6,7788 | |
| | 60 | 60 | 8,2160 | |
| | 30 | 60 | | 24,5242 |
| | Sig. | | ,463 | 1,000 |

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on Type III Sum of Squares
The error term is Mean Square(Error) = 44,075.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 60,000.

b. Alpha = ,05.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


**Adı Soyadı** : Mehmet BAĞCI
**Uyruğu** : T.C.
**Doğum Yeri ve Tarihi** : KONYA / 09.05.1981
**Telefon** : 0.332.223.27.54 / 0.535.688.08.86
**Faks** : 0.332.241.06.51
**e-mail** : mehmetbagci@selcuk.edu.tr / meh_bagci@yahoo.com


## EĞİTİM

| Derece | | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---|---|---|---|
| Lise | : | Meram Konya Süper Lisesi, Meram, KONYA | 1999 |
| Üniversite | : | Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA | 2003 |
| Yüksek Lisans | : | Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA | 2005 |
| Doktora | : | - | |

## İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|---|---|---|
| 2003 – 2005 | ORGANİZE Eğitim Danışmanlık ve Ticaret | Makine Mühendisi |
| 2005 – … | Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü | Araştırma Görevlisi |

**UZMANLIK ALANI:** Triboloji, Makine Elemanları, Makine Tasarımı

**YABANCI DİLLER:** İngilizce

## YAYINLAR:

**Mehmet Bagci,** Huseyin Imrek, "Effects of sliding speed in a CuZn10 brass material on wear", Journal of Balkan Tribological Association (JBTA), Vol. 15, No 1, Pages 35–44, 2009 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

Hüseyin İmrek, **Mehmet Bağcı**, "Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerde Fiber Doğrultusunun Erozyon Aşınmasına Etkisi", V. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi (MATİT 2009), sf. 255–262, 17–18 Ekim 2009 (Doktora tezinden yapılmıştır)

**Mehmet Bagci**, Huseyin Imrek "Erosive Wear of Glass Fiber and $B_2O_3$ Reinforced Epoxy Composites" The International Conference on Advanced in Materials and Processing Technologies (AMPT 2009), page 92–93, 26–29 October 2009 (Doktora tezinden yapılmıştır).

Huseyin Imrek, **Mehmet Bagci**, Omari Mashi Khalfan, "Solid Particle Erosion of $SiO_2$ Reinforced Epoxy Composites", 13$^{th}$ International Materials Symposium (IMSP'2010), 13–15 October 2010, Kabul edildi, (Doktora tezinden yapılmıştır).

**Mehmet Bagci**, Huseyin Imrek "Solid Particle Erosion Wear of GF/EP Composites with Added $Al_2O_3$" The American Institute of Physics (AIP), Kabul edildi, (Doktora tezinden yapılmıştır).