



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyoteknoloji Ana Bilim Dalı**

**C VİTAMİNİ KULLANILARAK İNDİRGENMİŞ GRAFEN
OKSİT (RGOC) KATKILI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER
AĞIRLIKLİ POLİETİLEN (UHMWPE) KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Alime ÇOLAK
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN**

**BİLECİK, 2019
Ref.No: 10316660**



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyoteknoloji Ana Bilim Dalı**

**C VİTAMİNİ KULLANILARAK İNDİRGENMİŞ GRAFEN
OKSİT (RGOC) KATKILI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER
AĞIRLIKLİ POLİETİLEN (UHMWPE) KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Alime ÇOLAK
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Biotechnology**

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ULTRA
HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE
(UHMWPE) COMPOSITES WITH REDUCED
GRAPHENE OXIDE (RGOC) USING VITAMIN C**

**Alime COLAK
Master's Thesis**

**Thesis Advistor
Assist. Prof. Dr. Ferda MINDIVAN**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ

ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 11.12.2019 tarih ve 73/21 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/12/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Alime ÇOLAK'ın "C Vitamini ile İndirgenmiş Grafen Oksit (RGOC) Katkılı Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı tez çalışması Biyoteknoloji Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI): Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN

ÜYE

: Doç. Dr. Mustafa Oğuzhan ÇAĞLAYAN

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet UYSAL

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başlamamda ve sonrasında hep yanımda olan, tecrübelerini ve birikimlerini benimle paylaşan çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım süresince laboratuvar imkanlarından yararlandığım Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine, Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve özellikle deneyisel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımızın her aşamasında bizimle birlikte olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Meryem GÖKTAŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak beni her daim destekleyen aileme ve bu süreçte motivasyon sağlayan sevgili arkadaşım ve ablam Hatice DEMİR TÜRK'e teşekkür ederim.

Alime ÇOLAK

Aralık, 2019

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

- / - / -

Alime ÇOLAK

C VİTAMİNİ KULLANILARAK İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT (RGOC)

KATKILI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLı POLİETİLEN

(UHMWPE) KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve biyouyumluluğu ile yapay kalça ve diz implantlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, düşük elastisite modülü, düşük yük taşıma ve düşük yorulma önleme kapasitesi gibi bazı dezavantajlı özelliklerinden dolayı uygulama alanı sınırlıdır ve UHMWPE bileşenlerinin aşınma ürünleri implant kaybına sebep olmaktadır. Bu amaçla, C vitamini ile sentezlenen indirgenmiş grafen oksit (RGOC) dolgusu, özellikle aşınmaya karşı gelişmiş özelliklere sahip kompozit malzemeler üretmek için UHMWPE matriksine dahil edilmiştir. Kompozitlerin mikroyapısal ve tribolojik özelliklerini araştırmak için RGOC dolgusunun farklı ağırlıkça (ağ.) % değerleri (0.1, 0.3, 1.0 ve 2.0 ağ.%) ilave edilerek UHMWPE/RGOC kompozitleri önce sıvı faz ultrasonik karıştırma ardından sıcak pres kalıplama ile üretilmiştir. Kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları, kuru kayma, saf su, serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları ortamlarında, ileri-geri aşınma test cihazı ile karşı malzeme olarak Al_2O_3 bilye kullanılarak incelenmiştir. Kompozitlerin mikroyapısal analizlerinin sonuçları, RGOC dolgusunun polimer matrikste iyi dağıldığını ve RGOC-UHMWPE arasındaki etkileşimi doğrulamıştır. UHMWPE/RGOC kompozitler saf su ortamında serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları ortamlarına göre saf su ve RGOC'nin yağlayıcı etkisinden dolayı en düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olmuşlardır. Ancak serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvılarının yüzey ıslatma kabiliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kuru kayma ve saf su ortamına göre kompozitlerin aşınma hızı değerleri bu ortamlarda daha düşük bulunmuştur. Ayrıca polimer matrikse RGOC ilavesi ile yorulma aşınması izleri tüm ortamlarda önemli derecede azalmıştır. Yüksek sertliğe, en yüksek kristallığe ve en az miktarda aşınma ürünlerine sahip ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin tüm koşullarda en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda UHMWPE yerine biyomalzeme olarak iyi tribolojik davranış sergileyen bu kompozitin kullanılması önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen; İndirgenmiş Grafen Oksit; C Vitamini; Kompozit; Triboloji.

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ULTRA HIGH
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE) COMPOSITES WITH
REDUCED GRAPHENE OXIDE (RGOC) USING VITAMIN C**

ABSTRACT

Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) has been broadly utilized in hip and knee artificial implants due to its low friction coefficient, high wear resistance and good biocompatibility. However some disadvantages such as its low Young's modulus, low load bearing and anti-fatigue capacity limit application areas and wear debris of UHMWPE components also, cause implant failure. For this reason, reduced graphene oxide (RGOC) filler that was reduced using vitamin C was used as filler for the UHMWPE matrix to produce composite materials possessing advanced properties especially against wear. UHMWPE composites filled with different loading (0.1, 0.3, 1.0 and 2.0 wt.%) of RGOC were fabricated by firstly liquid phase ultrasonic mixing and then hot press molding to investigate microstructural and tribological properties. The wear and friction behavior of composites were investigated in sliding against an Al_2O_3 counterface and experiments carried out in a reciprocating friction testing machine under dry, distilled water, serum and Hank's solutions lubricating conditions. The microstructural analysis results of composites showed that RGOC well-dispersed in polymer matrix and confirmed that there was interaction between the RGOC and UHMWPE. UHMWPE/RGOC composites exhibited the lowest friction coefficient under distilled water lubricating condition than serum and Hank's solutions conditions, due to the lubricating effect of both distilled water and RGOC. But the lowest wear rate values of composites were found in the serum and Hank's lubrication conditions because the wettability of composites in these solutions was better than that of distilled water and dry sliding conditions. Furthermore, fatigue wear tracks were significantly reduced when RGOC was added in the polymer matrix at all lubrication conditions. Composite with 1.0 wt.% RGOC had high hardness, the highest crystallinity and the least wear debris resulting in the lowest friction coefficient and wear rate under all lubricating conditions. This study suggests the use of this composite that had excellent tribological behaviour as biomaterial instead of UHMWPE.

Key Words: Ultra High Molecular Weight Polyethylene; Reduced Graphene Oxide; Vitamin C; Composite; Tribology.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR	
BEYANNAME	
TEŞEKKÜR	5
BEYANNAME	6
ÖZET	I
ABSTRACT.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
ÇİZELGE DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
1.GİRİŞ	1
2.ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLIL POLİETİLEN (UHMWPE).....	3
3. GRAFEN.....	9
4. TRİBOLOJİ	17
5.MATERYAL VE METOT.....	29
5.1. Kullanılan Malzemeler	29
5.2. Grafitten Modifiye Hummers Metodu ile GO Sentezi	29
5.3. Sentezlenen GO'dan RGOC Sentezi	30
5.4. UHMWPE/RGOC Kompozit Üretimi.....	31
5.5. Karakterizasyon	33
5.5.1. X-ışını difraktometre (XRD)	33
5.5.2. Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR).....	33
5.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	33
5.5.4. Mikrosertlik testi.....	33
5.5.5. Aşınma testi	34
5.5.6. Optik mikroskop	35
5.5.7. UV-Vis spektrofotometresi (UV)	35
6.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
6.1. XRD Analiz Sonuçları.....	36
6.2. FTIR analiz sonuçları	39
6.3. SEM analiz sonuçları.....	41

6.4. Mikrosertlik analiz sonucu	43
6.5. Aşınma Testi Analiz Sonuçları.....	43
6.5.1. Kuru aşınma test sonuçları.....	43
6.5.2. Saf su ortamında aşınma test sonuçları.....	50
6.5.3. Serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma test sonuçları	55
6.5.4. Hank sıvısı ortamında aşınma test sonuçları.....	60
6.6. UV-Vis Spektroskopi Analiz Sonuçları	68
7.SONUÇLAR.....	71
8.ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	82



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. UHMWPE'nin kimyasal yapısı	3
Şekil 2.2. UHMWPE morfolojisinin şematik gösterimi	4
Şekil 2.3. (a) Ticari kalça ve (b) diz protezi	5
Şekil 3.1. Grafenin yapısı	9
Şekil 3.2. Grafen bazlı malzemelerin endüstriyel uygulamaları.....	10
Şekil 3.3. Grafen üretim metodları	11
Şekil 3.4. GO için tahmini moleküler yapılar	12
Şekil 3.5. Oksidasyon ve indirgeme reaksiyonları sonucu sentezlenen GO ve RGO'nun kimyasal yapıları.....	13
Şekil 3.6. Hidrazin ile epoksi grubunun indirgenme reaksiyon mekanizması	14
Şekil 4.1. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi	17
Şekil 4.2. Metal karşı malzemeye transfer olan Poliamid	18
Şekil 4.3. Poliamid 66 yüzeyinin abrazif aşınma izleri	18
Şekil 4.4. Poliamid 66 yüzeyine gömülü abrazif partiküller	19
Şekil 4.5. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi	19
Şekil 4.6 Delaminasyon aşınma tabakaları	20
Şekil 5.1. RGOC sentezi	30
Şekil 5.2. GF, GO ve RGOC örneklerine ait XRD difraktogramı.....	31
Şekil 5.3. UHMWPE/RGOC kompozitlerinin üretim aşamaları.....	32
Şekil 5.4. Karakterizasyon için hazırlanan örneklerin görüntüsü.....	32
Şekil 5.5. Aşınma test cihazı.....	34
Şekil 5.6. Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi	35
Şekil 6.1. UHMWPE ve kompozitlerin XRD difraktogramı	38
Şekil 6.2. UHMWPE ve kompozitlerin FTIR spektrumu.....	40
Şekil 6.3. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS haritalama analizleri	42
Şekil 6.4. Katkısız polimer ve farklı miktarlarda RGOC içeren kompozitlerin mikrosertlik değerleri	43
Şekil 6.5. UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma sonucu elde edilen aşınma hızı değerleri	45

Şekil 6.6. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM yüzey görüntüleri	47
Şekil 6.7. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri	49
Şekil 6.8. UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri	51
Şekil 6.9. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM yüzey görüntüleri	52
Şekil 6.10. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri	54
Şekil 6.11. UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri.....	56
Şekil 6.12. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri	57
Şekil 6.13. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri	59
Şekil 6.14. UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri	61
Şekil 6.15. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri	63
Şekil 6.16. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri	65
Şekil 6.17. UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testleri sonrası elde edilen aşınma hız değerleri	66
Şekil 6.18. Serum fizyolojik çözeltisinde bulunan aşınma ürünlerinin UV-Vis spektrumu.....	69
Şekil 6.19. Hank sıvısında bulunan aşınma ürünlerinin UV-Vis spektrumu	70

ÇİZELGE DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. UHMWPE' nin fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 5.1. Kompozitlerin ağırlıkça RGOC yüzdeleri ve kodları.....	32
Çizelge 6.1. UHMWPE ve kompozitlerin XRD analiz sonuçları	38
Çizelge 6.2. UHMWPE ve kompozitlerin FTIR spektrumundan elde edilen fonksiyonel gruplar ve dalga sayıları	40
Çizelge 6.3. UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma ortamında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.....	45
Çizelge 6.4. UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	50
Çizelge 6.5. UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	55
Çizelge 6.6. UHMWPE ve kompozitlerin hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	60
Çizelge 6.7. UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar**

CNT	: Karbon Nano Tüp
FTIR	: Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi
GF	: Grafit
GO	: Grafen Oksit
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik Birimi)
RGO	: İndirgenmiş Grafen Oksit
RGOC	: C Vitamini ile İndirgenmiş Grafen Oksit
SEM-EDS	: Taramalı Elektron Mikroskobu-Enerji Dağılım Spektrometresi
UHMWPE	: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
UV-Vis	: Ultraviyole ve görünür ışık
XRD	: X-Işını Difraktometre

1.GİRİŞ

Biyomalzemeler, insan vücudundaki biyolojik sistemler ile ara yüzey oluşturarak canlı dokuların işlevlerini yerine getirmek ya da desteklemek amacıyla kullanılan ve canlıyı olumsuz etkilemeyen doğal ya da sentetik malzemelerdir (Wong ve Bronzino, 2007). Biyomalzemeler, sürekli olarak vücut içinde akışkanlarla temas halindedir. Ayrıca günlük faaliyetler esnasında insan vücudu değişken gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu sebeple biyomalzemelerin vücut sıvısıyla uyumlu (biyouyumluluk) olması ve ayrıca korozyon direnci, mekanik dayanımı ve yorulma direncinin de yüksek olması gerekmektedir. Biyomalzemeler farklı kullanım alanları ve gereksinimlerine göre: metal, seramik, polimer ve kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadırlar (Güven, 2014).

Metaller mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı özelliklerinden dolayı tercih edilmelerine rağmen vücut sıvısı ile temasları sonucunda ortaya çıkan korozyon ürünleri nedeniyle düşük biyouyumluluğa sahiptirler (Coşkun, 2016). Yüksek korozyon dayanımı ve biyouyumluluk özellik gösteren seramikler ise zor işlenmeleri, düşük mekanik özellikleri ve yüksek yoğunluğa sahip olmalarından dolayı dezavantajlı özelliklere sahiptirler (Güven, 2010).

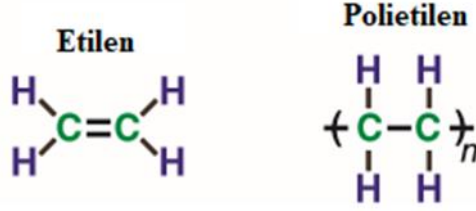
Polimerik biyomalzemeler kolay şekil verilebilmeleri, üretim kolaylığı, uygun maliyet, istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklerin sağlanabilmesi gibi özelliklerinden dolayı metal ve seramik biyomalzemelere göre daha avantajlıdırlar (Wong ve Bronzino, 2007).

En yaygın kullanılan biyopolimerlerden olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) düşük yoğunluk, kendi kendine yağlama özelliği, kolay şekil verilebilmesi, mükemmel darbe dayanımı, yüksek mukavemet, düşük sürtünme katsayısı ve kimyasal inertlik gibi mükemmel özelliklerinden dolayı 50 yılı aşkın süredir tıpta çeşitli kalça, diz ve bel kemiği implantlarında kullanılmaktadır (Firdous vd., 2009). Ancak UHMWPE'nin düşük yüzey sertliği ve düşük elastisite modülü nedeniyle uzun süreli işlemlerde aşınma sorunu ile karşılaşmaktadır. Bu yüzden yapılan araştırmalarda UHMWPE'nin özelliklerini iyileştirmek için en çok tercih edilen yöntem gama ışıması yoluyla polietilen moleküler zincirlerin çapraz bağ yoğunluğunun artırılmasıdır. Bu yöntem malzemelerin aşınma performanslarını artırmıştır ancak mekanik özelliklerini önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir. Özellikleri iyileştirmek için kullanılan diğer bir yöntem de organik ve inorganik dolgu elemanlarının ilavesidir.

Bu amaçla birçok çalışma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen henüz arzu edilen özellikler elde edilememiştir. Bu çalışmada düşük yoğunluğu, yağlayıcı özelliği ve mükemmel mekanik özellikleri ile dikkat çeken grafen, dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Grafen üretmek için en yaygın yöntem grafen oksitin (GO) kimyasal indirgenme reaksiyonudur, fakat indirgenme işleminin olumsuz tarafı indirgeyici maddelerin (hidrazin hidrat, di-metilhidrazin, hidrokinon, sodyum borhidrit, metal hidritler) toksik özelliklere sahip olmalarıdır. Özellikle implant malzemesi olarak kullanılan UHMWPE gibi polimerlere ilave edilecek dolgu malzemelerinin zararsız ve etkili özelliklere sahip olmaları oldukça önemlidir. GO'nun C vitamini ile indirgenmesi ile elde edilen indirgenmiş grafen oksit (RGOC) katkısının kompozitin mikroyapısal ve tribolojik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir ve farklı ağırlık % miktarlarında RGOC katkısıyla üretilen UHMWPE/RGOC kompozitlerin tribolojik özelliklerinin iyileştirildiği, ağırlık % miktarı en uygun RGOC katkılı UHMWPE kompozitin biyomalzeme olarak kullanımı önerilmiştir.

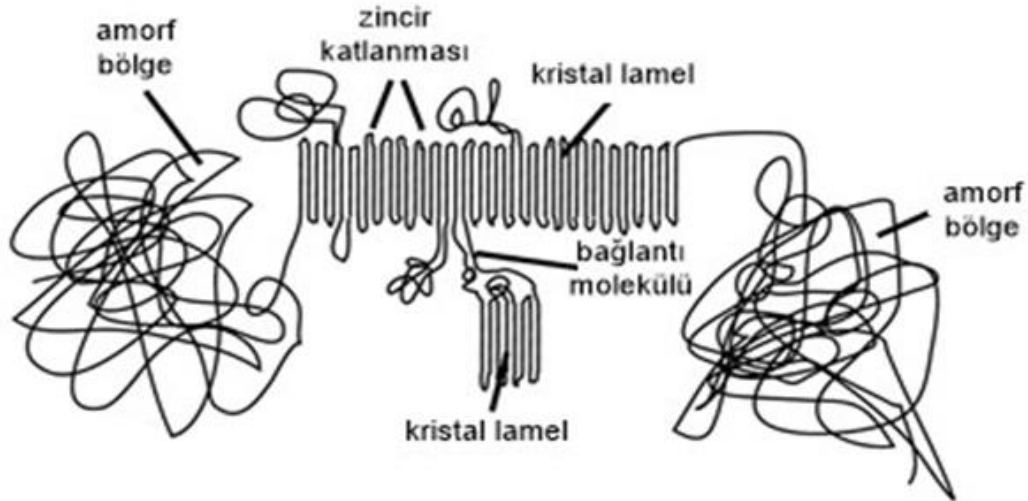
2.ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLı POLİETİLEN (UHMWPE)

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), etilen monomerinden elde edilen (C_2H_4) doğrusal homopolimer olarak sınıflandırılan bir polimerdir. Şekil 2.1’de etilen ve polietilen için kimyasal formüller verilmiştir (Kurtz, 2004). UHMWPE’nin molekül zinciri 400.000’e kadar karbon atomu içermektedir.



Şekil 2.1.UHMWPE’nin kimyasal yapısı (Kurtz, 2004).

UHMWPE’nin molekül zinciri, bir kilometreden uzun, karışık bir spagetti gibi bir yapıya benzetilmektedir. Zincir statik değildir fakat iç enerjisinden dolayı molekül zincirleri yüksek sıcaklıklarda hareketli hale gelebilmektedirler. Erime sıcaklığının altında soğutulduğunda, polietilen moleküler zincirleri C-C bağları etrafında dönme ve zincir kıvrımları oluşturma eğilimindedirler. Bu zincir katlanması sırasıyla molekülün bölgesel olarak düzenlenmesi ile kristal lameli olarak bilinen tabakalı bir yapı oluşturmaktadır. Bu lamellerle, amorf bölgelerin içerisine gömülü olan lameller bağlantı molekülleri ile ilişki kurabilirler. UHMWPE’nin bu morfolojik özelliklerinin tümü şematik olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Kristal lameller mikroskobiktir ve çıplak gözle görülmemektedir. Lameller görünür ışığı kırarak, UHMWPE’ye oda sıcaklığında beyaz, mat bir görünüm vermektedir. Erime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda, yaklaşık 137°C ’de, UHMWPE yarı saydam hale gelir. Lameller 10-15 nm kalınlık ve 10-50 μm uzunlukta dizilirler. Lameller arasındaki ortalama boşluk 50 nm’dir (Kurtz, 2004).



Şekil 2.2. UHMWPE morfolojisinin şematik gösterimi (Kurtz, 2004).

Çizelge 2.1’de UHMWPE’nin fiziksel ve mekanik özellikleri özetlenmektedir. Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi, UHMWPE yüksek çekme ve darbe dayanımına sahiptir (Kurtz 2004).

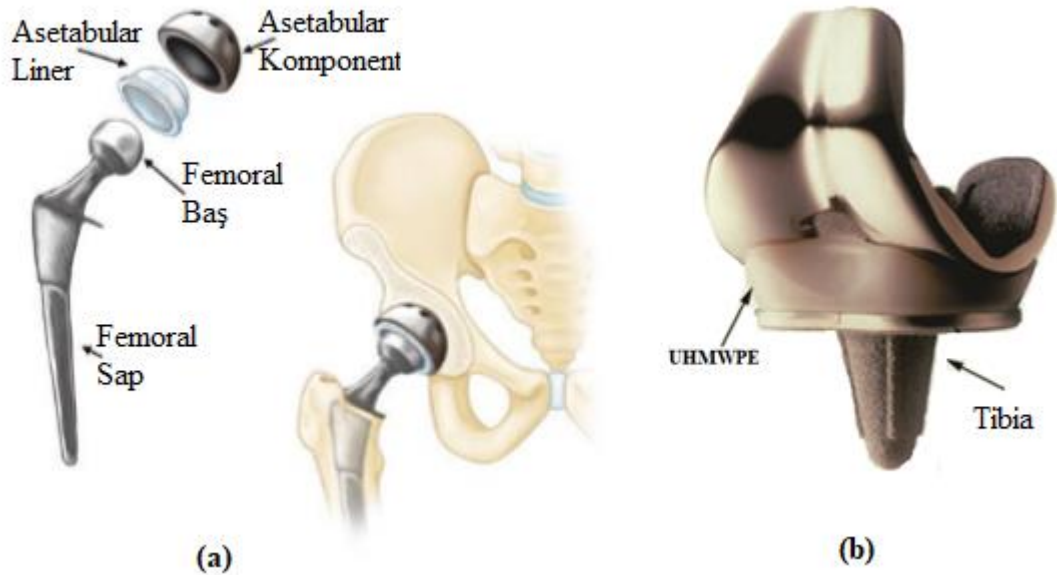
Çizelge 2.1. UHMWPE’ nin fiziksel özellikleri (Kurtz, 2004).

Özellik	UHMWPE
Moleküler ağırlık (10^6 g / mol)	2–6
Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	125–138
Poisson’ın oranı	0,46
Özgül ağırlık	0.932–0.945
Elastisite modülü * (GPa)	0.8–1.6
Akma mukavemeti * (MPa)	21–28
Çekme mukavemeti * (MPa)	39–48
Yüzde uzama * (%)	350–525
Izod, Darbe dayanımı * (J / m çentik; 3.175 mm kalınlıktaki numune)	> 1070 (kırılma yok)
Kristallik derecesi (%)	39–75

* 23°C 'de test edilmiştir.

UHMWPE’nin bahsedilen özelliklerinin yanında yağlama ve sürtünmeye, kimyasal maddelere ve darbeye karşı dayanıklılık özelliklerinden dolayı konstrüksiyon makinelerinde; buldozer kepçe kaplaması, damperli kamyon kasa kaplaması, kağıt üretim makinelerinde kasa sızdırmazlık malzemesi, raspa, musluk, silme paneli, maden makinelerinde bilyalı değirmen kaplaması, kesme makinesi kaplaması, tekstil makinalarında panel bağlayıcı, kimyasal madde makinelerinde valf, conta ve yiyecek

hijyeni, korozyona dayanıklılık ve ses giderme özellikleri sebebiyle; yiyecek işleme fabrikası ön kaplama levhaları, çarpma levhası vb. gibi oldukça fazla endüstriyel uygulama alanları mevcuttur (Kurtz, 2004). Bunun yanında UHMWPE, yüksek darbe dayanımı, iyi biyouyumluluk ve düşük sürtünme katsayısı gibi benzersiz özelliklerinden dolayı kalça ve diz implantlarında yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır (Tai vd., 2012). Kalçada metalik bileşen, femur içine açılan derin bir delik ile bağlanmış uzun bir gövdeye sahiptir. Bu sistem, biyomalzemelerde ve implant tasarımında onlarca yıllık gelişimin sonucu olarak düşük aşınma hızları göstermektedir (Schwartz vd., 2007). UHMWPE esaslı kap, metalik kap (acetabular) içerisine yerleştirildikten sonra metalik implant gövde ile metalik kafa kısmı kemiğe monte edilmektedir (Şekil 2.3 a). Metalik kafa içerisinde hareket eden UHMWPE esaslı acetabular kap sürtünme sonucu metal protez yüzeyinde çiziklerin oluşmasına yol açmaktadır. Benzer olarak diz implantında femur kısmı CoCr alaşımı ile sabitlenirken tibia kemiğinin üstü ise bir metal tepsi ile birlikte yatak görevi gören UHMWPE ile tutturulmuştur. Genellikle diz kapağının alt kısmı da UHMWPE esaslıdır (Şekil 2.3 b) (Kurtz, 2004).



Şekil 2.3. (a) Ticari kalça ve (b) diz protezi (Kurtz, 2004).

Biyomalzemelerde kullanılacak polimerler; gerekli statik ve dinamik mukavemete, aşınma dayanımına ve düşük sürtünmeli kayma yüzeyine, canlı doku içerisinde korozyon direncine, vücut dokusunda zehirli maddeleri muhteva etmeyecek yapıya sahip, bir başka deyişle biyolojik ortamlarda ve vücut içi sıvılarına karşı inert

yapıda olmalıdır. Bu özelliklere cevap verebilen, mekanik ve kliniksel olarak uygun bir malzeme olan UHMWPE bu alanda tercih edilmektedir. Ancak katkısız UHMWPE iyi aşınma performansı sergilese bile, zamanla ortaya çıkan ve eklemi çevreleyen dokularda biriken aşınma ürünleri, implantın gövdesini çevreleyen kemik dokusunun yavaş yavaş kaybolmasına (kemik erimesi) ve sonunda implantın gevşemesine neden olarak implantların kullanım ömrünü azaltmaktadır (Reinitz vd., 2014; Schwartz vd., 2007). Bu nedenle polimerde çapraz bağ yoğunluğunun artırılması ve polimere dolgu maddesi ilave edilerek kompozit malzeme üretilmesi implantın kullanım ömrünü artırmak için en çok kullanılan iki yöntem olarak bilinmektedir.

Bahsedilen aşınma ürünlerinin oluşumunu ve aşınma hızını azaltmak için çapraz bağ yoğunluğunu artırıcı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki toz veya sıvı halde bulunan dialkil peroksitlerin UHMWPE ile karıştırılarak preslenmesi veya sıcak izostatik preslenmesidir. Bu yöntemde yüksek sıcaklıklarda serbest radikalik reaksiyonla peroksit ayrışıp bitişik polimer zincirleri arasında çapraz bağların oluşumuna yol açmaktadır. Ancak peroksit ile çapraz bağ yoğunluğu artırılmış UHMWPE'nin aşınma direncinin arttığına dair çalışmalar olmasına rağmen, uzun süreli kullanımda oksidatif bozunmaya karşı direncinin azaldığı rapor edilmiştir (Kurtz vd., 1999). Oksidatif bozunmanın aşınma direncinde ve mekanik özelliklerde azalmaya sebep olduğu bilinmektedir (Fung vd., 2018). Bu nedenle ışınlama UHMWPE'nin çapraz bağ yoğunluğunun artırılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır.

İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları (gama veya elektron demetleri) ile yüksek oranda çapraz bağlı UHMWPE'nin üretildiği çalışmalar literatürde mevcuttur. Işınlama aynı zamanda oksidatif bozunmaya neden olan serbest radikaller üretir. Serbest radikal oksidasyonu keton ve karboksilik asit gibi çeşitli oksidatif ürünlerin ortaya çıkması ve polimer zincirinin kesilmesi gibi birçok basamakta farklı reaksiyon mekanizmaları içermektedir. Zincir kesilmesi molekül ağırlığının azalmasına ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerin kaybına neden olmaktadır. Böylece ışınlanmış malzemede radikallerin uzun süre kristalin bölgelerde hapsolması ve zamanla amorf ve kristalin bölgelerin ara yüzeylerine difüzlenerak oluşan oksidatif bozunma implantın başarısız olmasına neden olabilmektedir (Reinitz vd., 2014; Bakar Atıcı, 2018). Erime sıcaklığının altında tavlama işlemi ve E vitamini (a-tokoferol) gibi antioksidanları stabilizör olarak kullanılarak oksidatif bozunmayı önlemek için çeşitli yöntemler denenmiştir. Ancak erime sıcaklığının altındaki tavlama işleminde radikaller tamamen yok edilemediği için bu problem çözümlenememiştir (Bakar Atıcı, 2018). Oksitlenmeyi

önleyen ve mekanik özellikleri geliştiren etkili yöntemlerden biri, E vitamininin UHMWPE'ye dahil edilmesidir. E vitamini, etkin bir anti-oksidandır. UHMWPE içindeki serbest radikallerle reaksiyona girerek oksijenin bağlanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle E vitamini UHMWPE'yi oksidasyondan koruyarak oksidasyon direncini artırmaktadır. Aynı zamanda UHMWPE'nin E vitamini ile stabilize edilmesi, bazı mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde de olumlu etki göstermiştir. Örneğin; E vitamini içeren UHMWPE'nin yorulma dayanımı kristalliğinin artışından dolayı artmıştır. E vitamini içeren UHMWPE'nin çekme mukavemeti, aynı koşullar altında ışınlanmış UHMWPE ile karşılaştırıldığında 35 MPa'dan 46 MPa'ya yükselmiştir. Işınlanmış UHMWPE'nin yorulma dayanımı, 0.55-0.69'dan 0.7-0.07 MPa'ya artmıştır. E vitamini içeren UHMWPE ışınlanmış UHMWPE'ye göre en az % 22 daha yüksek yorulma çatlak ilerleme direncine sahip olduğu rapor da edilmiştir. Ancak E vitamini UHMWPE'nin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki iyileştirmelerde sınırlı etki yaratmıştır (Melk ve Emami, 2018).

UHMWPE'nin düşük Young modülü ve yüzey sertliği, düşük yük taşıma ve yorulma önleme kapasitesi özelliklerinden dolayı kullanım alanı sınırlanmaktadır (Pang vd., 2015). Bu nedenle, UHMWPE'nin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için UHMWPE bazlı kompozitler geliştirilerek kullanılmaktadır. Bu amaçla, kaolin (Guofang vd., 2004), zirkonyum (Plumlee ve Schwartz, 2009), nano çinko oksit (Prasad vd., 2018). gibi inorganik dolgu maddeleri kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Karbon lifi, karbon siyahı ve karbon nanotüpler gibi çeşitli karbon materyalleri, iyi termal kararlılık, düşük kayma mukavemeti ve yüzeye tutunma ve üstün katı yağlayıcı karakteristikleri nedeniyle UHMWPE'de dolgu elemanları olarak kullanılmıştır (He ve Shi, 2005; Xue vd., 2006). Ancak bahsedilen dolguların yüksek miktarda ilavesi ile üretilen UHMWPE kompozitlerin yüksek maliyet ve tatmin edici olmayan performanslarından dolayı implant malzemesi olarak kullanımını sınırlı kalmıştır. Bu nedenle düşük maliyetli, yüksek performanslı UHMWPE kompozitlerin implant olarak üretim çalışmaları önemlidir (Tai vd., 2012).

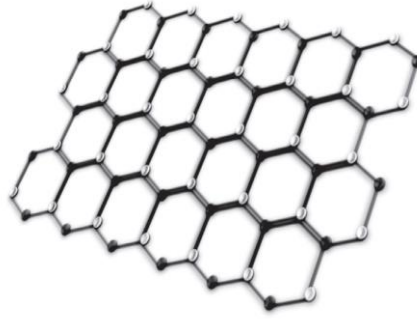
Karbon içerikli dolgu maddeleri arasında karbon nano tüpler (CNT), dikkate değer elektriksel iletkenliğe ve mükemmel mekanik özelliklere sahip olduklarından sert ve iletken polimer nanokompozitlerinin üretimi için uygun adaylar olarak bilinmektedirler. Fakat yüksek maliyeti ve zayıf dispersiyonu, CNT'i birçok uygulama için daha az cazip hale getirmiştir. Son yıllarda, CNT'nin polimer nanokompozitlerde

bir dolgu maddesi olarak rolü, CNT'ye benzer özellikler taşıyan fakat daha yüksek ağırlık oranındaki ve daha ucuz grafen türevleri dikkat çekmektedir (Alam vd., 2019).



3. GRAFEN

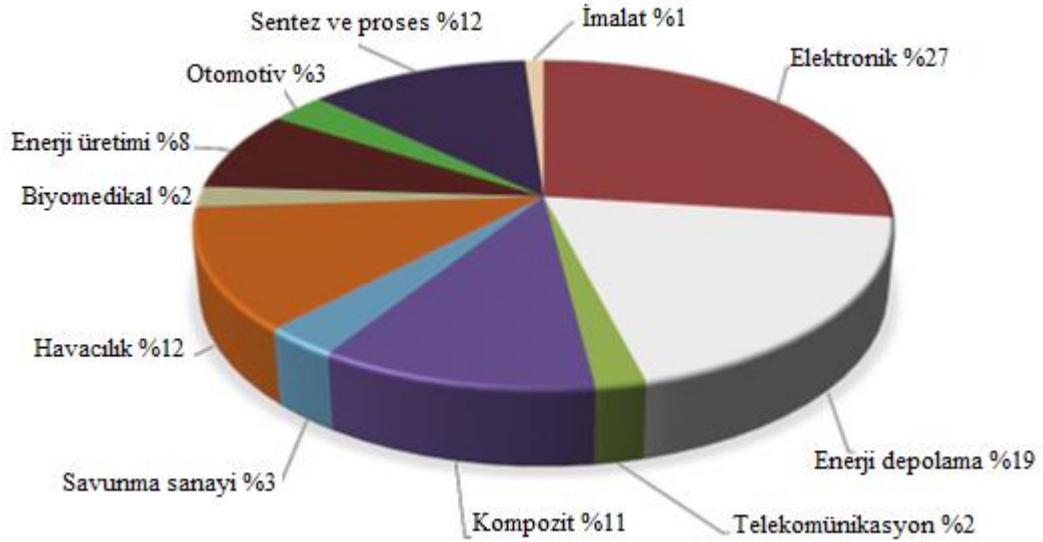
Karbonun bal peteği şeklindeki altıgen örgülü allotropu olan grafen iki boyutlu (2B) düzlemsel yapıların çok ender örneklerinden birisidir. Grafen düzenli kristalik yapıya sahip olup, konjuge bir sistem içermektedir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi 0.142 nm uzunluğunda karbon-karbon sigma (σ) bağı ile birbirine bağlanmış tek atom kalınlığında bir tabakadır (Dasari vd., 2017; Lee vd., 2019). Grafen, fulleren (0B), karbon nanotüp (CNT-1B) ve grafit (3B) gibi diğer karbon allotroplarının temel yapı taşıdır.



Şekil 3.1. Grafenin yapısı (Lee vd., 2019).

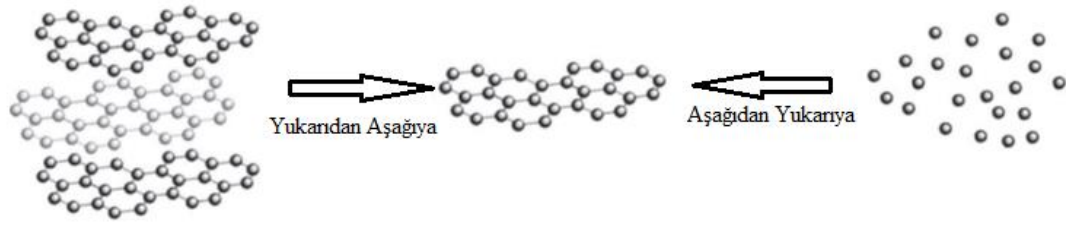
Güçlü karbon bağları ve tek atom kalınlığında oluşu onu bilinen en dayanıklı ve en sağlam malzemelerden biri olma özelliğini kazandırmıştır. Yüzey alanı $2630 \text{ m}^2/\text{g}$, elastisite modülü 1 TPa, optik geçirgenliği $\% \sim 97.7$, taşıyıcı mobilitesi $250.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, termal iletkenliği 5000 W/mK gibi yüksek özellikli değerlere sahiptir. Elmaştan sert ancak esnek ve hafif bir yapıya sahip olduğundan $\% 20$ oranında esneyebilir, belirli oranda bükülebilir özellik de taşımaktadır. Bu sıralanan üstün özellikleri sensörler, yakıt ve güneş pilleri, yeniden yazılabilir bellek malzemeleri, süperkapasitörler, nanomalzemeler, bataryalar, transistörler, hidrojen depolama potansiyel uygulamaları, fotokataliz destekleyicileri gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de grafen bazlı malzemelerin endüstriyel uygulamaları gösterilmiştir (Dasari vd., 2017). Grafen, kompozit ve nanokompozitlerin mukavemetini ve mekanik özelliklerini geliştirmek için de sıklıkla kullanılmaktadır ve ek olarak, grafen, diğer karbon yapılarla kıyasla gelişmiş biyoyumumluluk göstermektedir. Bu yüzden hastalıkların tanı ve teşhisinde, kanser tedavisinde, biyo-görüntüleme uygulamalarında ve ilaç-gen taşınımı gibi potansiyel uygulamalara sahiptir. Grafenin toksisitesi katman sayısı, bağlı fonksiyonel gruplar ve

yüzey yükü yoğunluğu gibi taşıdığı fiziksel ve kimyasal özelliklere bağlıdır (Tahriri vd., 2019).



Şekil 3.2. Grafen bazlı malzemelerin endüstriyel uygulamaları (Dasari vd., 2017).

Grafenle ilgili araştırma makalelerinin ve patentlerin sayısı son 5 yılda hızla artmıştır ve gelecek yıllarda bu istatistiklerin artması beklenmektedir. Bu nedenle, gelecekte pazardaki yüksek grafen talebini karşılamak için ticari düzeyde grafen kitlesel üretimi yapılması önem arz etmektedir. Şu anda, grafen sentezi yöntemleri, aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya yöntemleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.3). Aşağıdan yukarıya yaklaşımlar bir substrat üzerinde grafen sentezlemek için karbon kaynaklı gaz kullanılarak grafen sentezini içermektedir. Bu yaklaşıma epitaksiyel büyüme ve kimyasal buhar biriktirme örnek olarak verilebilir. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, grafit tabakalarının parçalanmasının ardından tek grafen tabakaları üretmek için tabakaların birbirinden ayrılmasını içerir. Tabakaların zarar görmeden ve tekrar topaklanmasına fırsat vermeden bu işlemlerin gerçekleştirilmesi bu yöntemin zorlukları arasındadır. Bu yöntemin bazı örnekleri arasında mekanik eksfoliasyon, GO'nun oksidasyon – redüksiyonu ve sıvı faz eksfoliasyon bulunmaktadır (Lee vd., 2019).



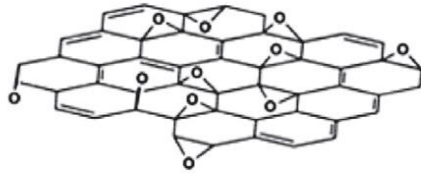
Şekil 3.3. Grafen üretim metodları (Lee vd., 2019).

Grafenin, GO ve RGO isimli iki ana türevi vardır. GO oksidasyon reaksiyonu ile, RGO ise indirgenme reaksiyonu ile elde edilmektedir. Grafitten (GF) oksidasyon reaksiyonu ile GO ve sentezlenen GO'dan indirgenme reaksiyonu ile RGO sentezlenmektedir. GO; hidroksil, karboksil, karbonil ve epoksi gibi GO'nun farklı moleküllere bağlanmasına yardımcı olacak çeşitli fonksiyonel gruplara sahiptir (Tahriri vd., 2019).

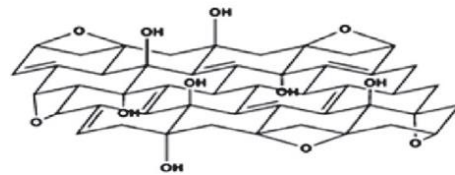
GO'nun hidrofilik doğası sulu çözelti ortamında onun kolaylıkla dağılmasına yardımcı olmaktadır (Dasari vd., 2017). Bu gruplar sayesinde çok çeşitli biyo-uygulamalar için polimerler kolaylıkla grafen ile etkileşim sağlayabilmektedirler. Bu nedenle, GO, biyo uygulamalarda daha iyi mekanik ve biyoaktivitesinden dolayı da gelişmiş bir alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır (Tahriri vd., 2019). GO'nun stokiyometrik olmayan yapısı ve bileşiminin üretim aşamasına büyük ölçüde bağlı olmasından dolayı GO sentezlemek için farklı yöntemler bulunmaktadır. GO sentezi için Brodie, Staudenmaier, Hofmann ve Hummers'ın da dahil olduğu dört farklı sentez türü vardır (Prabhakar ve Arun, 2020). Bu yöntemlerin ortak noktası GF'nin oksidasyonu ve sonrasında GO'nun tabakalara ayrılmasıdır. Tüm yöntemlerde 100°C'nin altındaki sentez sıcaklıklarında reaksiyonların gerçekleşmesi düşük üretim maliyetini korumak için arzu edilmektedir. Bununla birlikte, azot dioksit (NO_2) ve diazot tetroksit (N_2O_4) gibi toksik gazlar da bu yöntemlerle üretilmektedir. Bu nedenle, proses güvenliği ve çevresel maliyetlerin her sentez için göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Günümüzde Hummers yöntemi, nispeten hızlı ve güvenli bir işlem olduğu için GO'nun sentezi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, diğer üç yöntemde de kullanılan potasyum perklorat (KClO_4) ve nitrik asit (HNO_3) yerine potasyum permanganat (KMnO_4) ve sodyum nitrat (NaNO_3) kullanımıyla klor dioksit (ClO_2) ve asidik dumanlar gibi patlayıcı gazlar ortaya çıkmamaktadır. Zamanla Hummers yöntemi üzerine yapılan modifikasyonlar sonucu GO üretimine daha yeşil bir yaklaşım getirilmiştir. Modifiye Hummers yöntemi GO'nun sentezlenmesi için NaNO_3

kullanımını ortadan kaldırarak üretim maliyetini ve çevre koruma maliyetini düşürmüştür. GF'nin oksidasyonu, oksijen içeren fonksiyonel grupların tabakaları arasına girmesi nedeniyle GF tabakaları arasındaki mesafeyi 0.335'ten 0.625 nm'ye veya daha fazla arttırmaktadır. Böylece, tabakalar arasındaki van der Waals kuvvetleri karbon tabakaların yer değiştirmesi sırasında zayıflamakta ve daha sonra uygun çözücüler içinde sonikasyonla eksfoliye olarak, iyi dağılmış tek, iki veya az katmanlı GO'lar üretilebilmektedir. GO oksijen içeren fonksiyonel gruplara sahip olmasından varlığından dolayı oldukça hidrofiliktir, dolayısıyla su, etilen glikol, N-metil-2-pirolidon (NMP) ve tetrahidrofuran (THF) gibi farklı çözücülerde dağılabilirler. GO'nun önerilen çeşitli moleküler yapıları Şekil 3.4 a-f'de gösterildiği gibi Hofmann, Ruess, Scholz-Boehm, Nakajima-Matsuo, Lerf-Klinowski ve Szabo modelleridir. İçlerinden Lerf-Klinowski' nin önerdiği moleküler yapı, katı hal nükleer manyetik rezonans (NMR) ve XRD ile yapılan kapsamlı analizler sonucunda en çok kabul gören yapı olmuştur (Lee vd., 2019).

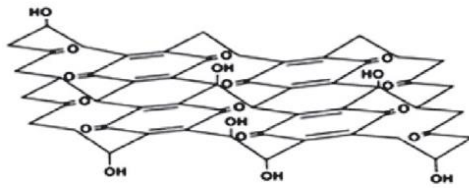
a) Hofmann



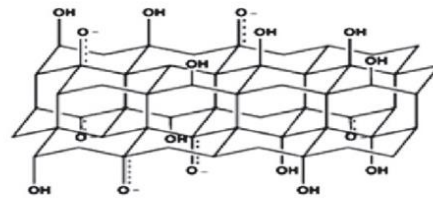
(b) Ruess



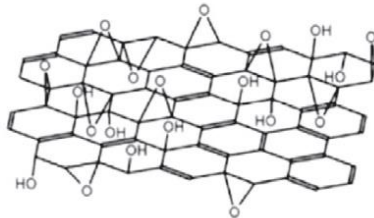
c) Scholz-Boehm



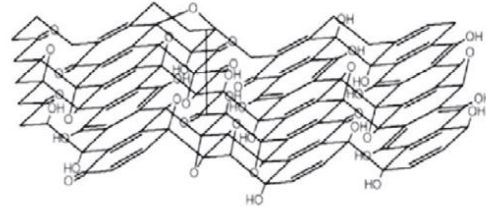
(d) Nakajima-Matsuo



e) Lerf-Klinowski



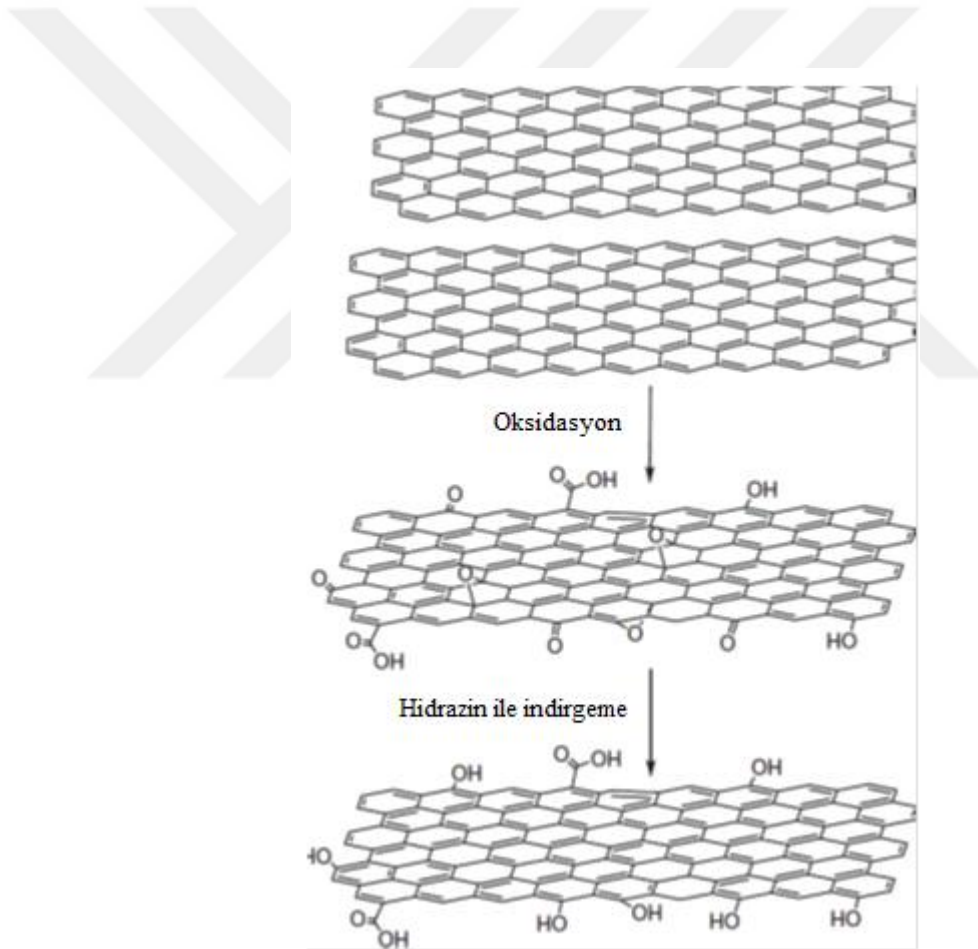
(f) Szabo



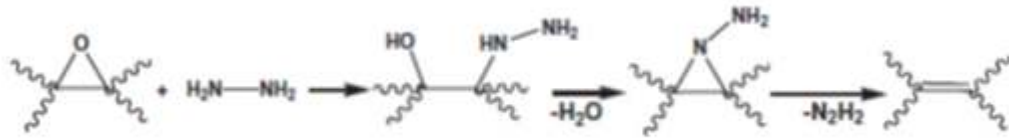
Şekil 3.4. GO için tahmini moleküler yapılar (Lee vd., 2019).

Oksidasyon işleminden dolayı, safsızlıkların, yapısal düzensizliklerin, kırışıklık, çatlak, parçalanma ve diğer yapısal hataların varlığı mümkün olmaktadır ve bunlar

GO'nun elektronik, optik, adsorpsiyon gibi birçok özelliklerini etkileyebilmektedir. Ayrıca GO bozulmuş bir sp^2 bağına sahiptir ve bal peteği şeklindeki kafesini eski haline getirmek için, genellikle indirgeme yöntemleri kullanılmaktadır. Kimyasal, termal ve elektrokimyasal işlemler GO'nun indirgenmesi için kullanılan ana yöntemlerdir. Oksijen içeren fonksiyonel grupların çoğu yani GO'da bulunan karbonil, hidroksil, epoksi ve karboksilik gibi gruplar indirgenme sırasında elimine edilmektedir. Aşağıda Şekil 3.5'de GO ve RGO'nun kimyasal yapıları ve Şekil 3.6'da epoksi grubunun hidrazin ile indirgenme reaksiyon mekanizması verilmiştir. Bazı ortamda SN_2 indirgenme reaksiyonu iki adımda gerçekleşmektedir. İlk adımda bir nükleofilik yerdeğiştirme reaksiyonu, ikinci adımda ise termal eliminasyon reaksiyonu ile indirgenme tamamlanmaktadır.



Şekil 3.5. Oksidasyon ve indirgeme reaksiyonları sonucu sentezlenen GO ve RGO'nun kimyasal yapıları (Singh vd., 2011).



Şekil 3.6. Hidrazin ile epoksi grubunun indirgenme reaksiyon mekanizması (Singh vd., 2011).

Bununla birlikte, katkısız grafen üretmek için GO'nun tamamen indirgenmesi hala mümkün değildir. Elde edilen RGO belirli derecelerde kusur ve boyut farklılıkları içermesine rağmen katkısız grafen ile benzerlik göstermektedir. RGO'nun kalitesi, indirgeyici maddenin çeşidi ve indirgeme süresi, sıcaklık, basınç ve voltaj gibi reaksiyon koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Ayrıca, C/O oranı, GO'nun indirgemesinde indirgeyici maddenin uygunluğunun bir göstergesidir. Yüksek bir C/O oranı daha yüksek RGO kalitesiyle sonuçlanan yüksek bir oksijen giderme derecesine işaret etmektedir. İndirgeme yöntemlerinden biri olan termal indirgeme, yüksek işletme maliyetine neden olan yüksek sıcaklık ve iyi bilinen bir sera gazı olan CO₂ salınımına sebep olduğu için tercih edilmemektedir. Onun yerine daha çok kullanılan hidrotermal indirgeme ise GO'nun düşük sıcaklıklarda RGO'ya dönüşümü daha düşük enerji gerektirdiği için tercih edilmektedir. GO'nun elektrokimyasal indirgenmesi ise, hızlı redüksiyon, maliyet etkinliği, çevre dostu ve kolay olması nedeniyle dikkat çekmiştir. Ayrıca literatürde bildirilen diğer GO indirgeme prosesleri arasında mikrodalga, fototermal, fotokatalitik, sono-kimyasal, lazer ve plazma iyileştirme de bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler içerisinde en çok kullanılan ve üzerinde çalışma yapılan yöntem kimyasal indirgemedir. GO'nun kimyasal indirgenmesinde yaygın olarak kullanılan hidrazin nispeten pahalı, toksik ve özellikle polimerlerin π - π sistemlerine oldukça zarar veren güçlü bir indirgeyicidir (Lee vd., 2019; Liu vd., 2013). Bu yüzden büyük ölçekli uygulamalar için uygun değildir. Hidrazin hidratın yanında dimetil hidrazin, hidrokinon ve sodyum bor hidrür gibi yine oldukça toksik kimyasallar da aynı amaçla kullanılmaktadır. Özellikle indirgeme işlemi için kullanılan bu kimyasalların son ürün üzerinde eser miktarda kalması bile, biyolojik kullanımlarını büyük riske atmaktadır. Bu nedenle, indirgeme işlemi için kullanılan toksik hidrazin yerine yeşil yaklaşımlar başlatılmıştır. Borohidritler, alüminyum hidrit, kükürt, azot ve oksijen bazlı reaktifler, metal asitler, metal alkaliler, amino asitler, bitki atıkları, mikroorganizmalar, proteinler ve hormonlar gibi çok çeşitli indirgeme elemanları kullanılmıştır (Chua ve Pumera,

2014). Kimyasal indirgeme, çinko/hidroklorik asit (33.5), benzil alkol (30), tiyonil klorür (8.48), kafeik asit (7.15), sodyum borohidrid (6.9), maya (5.9) kullanarak yüksek C/O oranına sahip RGO'lar üretilmiştir (Lee vd., 2019). Son yıllarda, aromatik olmayan amino asitler (Tran vd., 2014), doğal ürünlerin yaprak özleri (Thakur ve Karak, 2012), etilen glikol (Liu vd., 2013), sodyum karbonat (Jin vd., 2013), askorbik asit (C vitamini) (Fernandez-Merino vd., 2010) şeker (Kamisan vd., 2015), yeşil çay (Wang vd., 2011) v.b. gibi toksik olmayan veya doğal ürünler GO'nun indirgenmesi için çevre dostu yaklaşımlar sunmaktadır (Guo vd., 2012). Ancak güvenlik endişeleri, ek kimyasal maliyetler, çevre kirliliği ve uzun sentez süreleri büyük ölçekli üretimde dikkate alınmalıdır (Lee vd., 2019). Örneğin Fernandez-Merino vd., (2010) farklı indirgeyici maddelerin indirgeme etkilerini karşılaştırmak için (sodyum bor hidrür, pirogallol, hidrazin ve C vitamini) bazik ortamda RGO sentezi gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak sodyum bor hidrür ve pirogallol hidrazine göre daha az aktivite gösterirken, C vitamini hidrazin ile benzer etkinlik göstermiş olup, ayrıca C vitamini ile sentezlenmiş RGO kararlı süspansiyonları, sadece suda değil, N, N-dimetil formamid (DMF) veya N-metil-2-pirolidon (NMP) gibi genel organik çözücülerde de hazırlanabileceği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, hidrazin yerine, RGO için, benzer etkinliğe sahip zararsız ve güvenli bir indirgeyici madde ile indirgenmesi yolunu açmış ve böylece büyük ölçekli uygulamalar için grafen bazlı malzemelerin kullanımını kolaylaştırmak amacıyla önerilmiştir.

Herhangi bir malzemenin biyomedikal uygulamalarda kullanılabilirliği için ilk temel adım malzemenin biyouyumluluğunu araştırmaktır. Canlı dokularda ters bir etki yaratma olasılığını ortadan kaldırmak için malzemenin biyouyumluluğu mükemmel olmalıdır (Tahriri vd., 2019). GO ve RGO, memeli hücrelerine karşı sitotoksitelerinden dolayı yeni bir antibakteriyel malzeme olarak kabul edilmektedirler ve biyomedikal uygulamalar için kullanılmaya başlanmıştır (Sandhya vd., 2018; Maddinedi vd., 2018) GO ve RGO'nun antibakteriyel aktivitesi birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Hu vd., 2010; Liu vd., 2011). Örneğin, Hu vd., (2010) GO ve RGO'nun antibakteriyel aktivitesini inceledikleri çalışmalarında bu tür grafen bazlı nanomalzemelerin, minimum sitotoksite gösterirken, E. coli bakterilerinin büyümesini etkili bir şekilde önleyebildiklerini rapor etmişlerdir (Hu vd., 2010). Ayrıca, Liu vd.,'nin (2011) dört tip grafen bazlı malzemenin (GF, grafit oksit, GO ve RGO) antibakteriyel aktivitesini araştırdıkları araştırmalarında GO ve RGO'nun en yüksek antibakteriyel aktiviteyi gösterdiğini ve fonksiyonel grupların yoğunluğu, büyüklük ve iletkenlik gibi grafen bazlı malzemelerin fizikokimyasal özelliklerinin, sağlık ve çevresel risklerini

azaltmak veya uygulama potansiyellerini artırmak için tam olarak uyarlanabileceğini önermişlerdir (Liu vd., 2011).

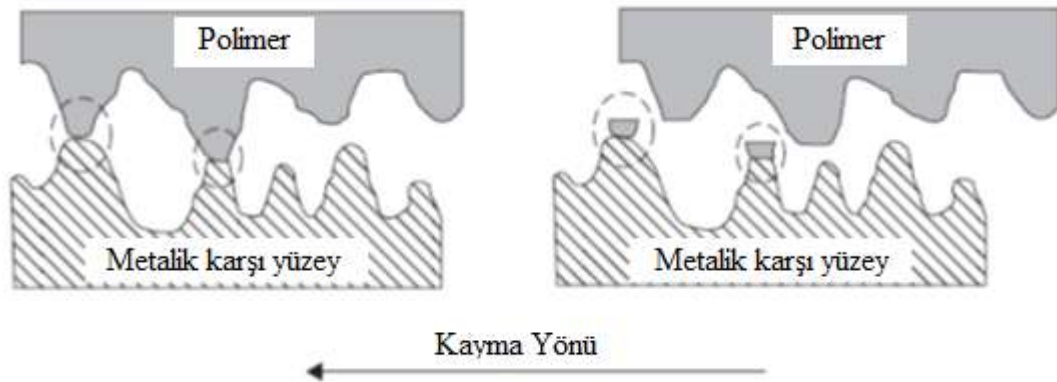
Bahsedilen yapısal, mekanik ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı GO ve RGO'nun son yıllarda dolgu maddesi olarak kullanıldığı polimer matrisli kompozit üretimi artmıştır. Grafitin mekanik eksfoliasyonu büyük ölçekli üretimler için uygun değildir, GF'nin GO'ya oksidasyonu ve kimyasal, elektrokimyasal veya termal olarak grafene indirgenmesi ile büyük bir miktarda RGO elde etmek için kolay bir yol olarak kabul görmüştür. GO ve RGO'nun toplu miktarda üretimi, karbonun bu düz yapısını polimer kompozitlerde keşfetme fırsatı vermiştir (Singh vd., 2011). Yüksek en boy oranı ve büyük yüzey alanından dolayı 2 boyutlu grafen ilave edilen kompozitler, CNT'ler, karbon elyafları ve kevlar gibi diğer dolgu malzemelerinden daha iyi elektriksel, termal ve mekanik özellikler sergilemektedir. Ayrıca grafen takviyesi, elektronik, havacılık, otomotiv ve yeşil enerji alanlarında ve uygulamalarda olağanüstü özellikler sunabileceği düşünülmektedir. Polimer matriske RGO ve GO'nun takviyesi ile, elektrik iletkenliğinin artırılması, mukavemet ve elastik modülde artış, yüksek termal iletkenlik ve kararlılık ve gaz moleküllerinin geçirgenliğinin azalmasında heyecan verici sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu sonuçların tümü elektronik endüstrisinde, otomobil, havacılık uygulamalarında yüksek mukavemetli bir o kadar da hafif yapısal polimer kompozitler geliştirmek için yeni bir yol açmıştır. Ayrıca grafen bazlı polimer kompozitlerin N_2 , O_2 , nem ve CO_2 gibi gaz moleküllerinin geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle gıda, ilaç, elektronik ve içecek ambalajlarında da uygulama bulabilmektedirler. Ancak düşük maliyetli, yüksek kaliteli grafenin seri üretiminde ve polimer matrisindeki kontrol dispersiyonunda zorluklar nedeniyle grafen bazlı polimer kompozitlerini ticarileştirmek için zamana ihtiyaç duyulmaktadır (Singh vd., 2011).

4. TRİBOLOJİ

Triboloji; yağlama, sürtünme ve aşınma olaylarını ve mekanizmalarını inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır ve yunanca “tribos” sürtünme veya kayma anlamına gelmektedir (Yüksel, 2014). Triboloji bilimi, içten yanmalı motorlar, yataklar ve dişlilerde görülen verimsiz sürtünme ve aşınma örneklerinin için en aza indirebileceğimizi, yâda fren, debriyaj, somon, vida gibi verimli sürtünme örneklerini nasıl arttırılabileceğimizi araştırarak günlük yaşantımızda ve endüstride daha fazla verim ve performans alabilmemize yardımcı olmaktadır (Olçay, 2014). Sürtünme, birbirlerine göre relatif çalışan maddelerin birbirlerine uyguladıkları direnç ve kinetik enerjilerinin sürekli olarak düşüşünü ifade etmektedir (Yüksel, 2014). Aşınma ise sürtünme sonucu meydana gelen yüzey ve yüzey altı hasarların oluşması sonucu madde kaybı olarak tanımlanmaktadır (Tekin, 2015).

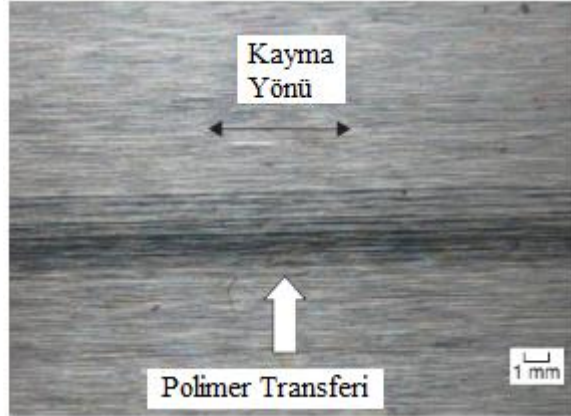
Polimerlerin hafif ve korozyona karşı dirençli olmaları kompozit dünyasında onları önemli bir basamakta tutmaktadır. İleri teknolojik ürünlerin spesifik mukavemet özelliklerinin önemli oluşu, günümüzde tribolojik uygulamalarda aşınma dirençleri, düşük sürtünme özellikleri, elastisite ve darbeli yüklemeye uygunlukları gibi özelliklerinden dolayı polimerlerin aşınma dirençlerinin arttırılması hem teknolojik hem de bilimsel açıdan oldukça önemlidir (Bakar Atıcı, 2018). Aşınma türlerinin gösterimi her kaynakta farklı olmasına rağmen, en çok kabul gören sınıflandırma adhezif, abrazif, yorulma ve korozif aşınmadır.

Adhezif aşınmada; bir metal yüzeyinin bir polimer yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında polimer yüzeyi ile karşı yüzey arasında yüksek lokal basınç oluşur. Bu durum, adhezif bir bölge oluşumuna yol açan plastik deformasyona neden olmaktadır. Daha fazla hareket, sürekli olarak bu bölgelerin oluşumuna ve kopmasına neden olmaktadır (Şekil 4.1) (Abdelbary, 2015).



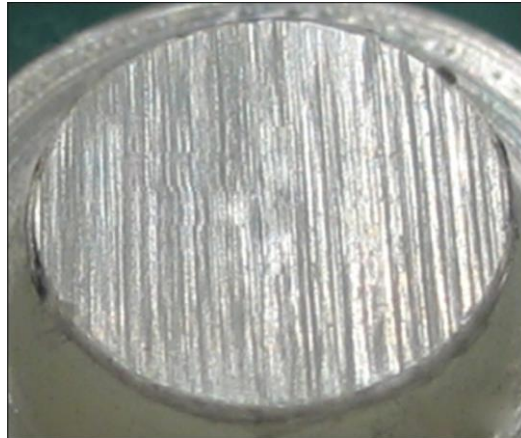
Şekil 4.1. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi (Abdelbary, 2015).

Yumuşak polimerin ince bir filmi sert karşı malzeme yüzeyine aktarılmaktadır. Transfer filmi oluştuğça, karşı tarafın yüzey topografyası değişmekte ve dengeye ulaşmaktadır, yani transfer filminin oluşma ve ayrılma hızı birbirine eşit olmaktadır (Şekil 4.2) (Abdelbary, 2015).



Şekil 4.2. Metal karşı malzemeye transfer olan Poliamid (Abdelbary, 2015).

Abrazif aşınma, pulluklama, mikroyorulma, takozlama, mikro çatlak ve kesme mekanizmaları ile polimerin yüzeyini daha sert olan karşı malzemenin çizerek parça koparmasına denir. Aşağıda Şekil 4.3’de poliamid 66 örneğinin çelik karşı malzeme ile kuru ortamda aşınan yüzey görüntüsü verilmiştir (Abdelbary, 2015).



Şekil 4.3. Poliamid 66 yüzeyinin abrazif aşınma izleri (Abdelbary, 2015).

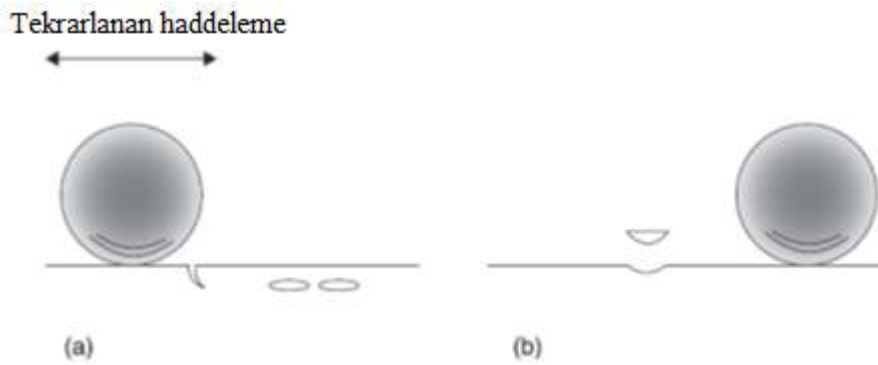
Abrazif aşınma temas türüne göre iki ve üç gövdeli aşınma olarak kategorize edilmektedir. Bu aşınma türleri aşınma ürünlerinin (debris) veya iki yüzey arasına herhangi bir şekilde dahil olmuş olan partiküllerin ikinci ve üçüncü bir aşındırıcı gibi davranıp aşınma hızını arttırmaları olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.4’de polimer

yüzeyine iyice nüfuz etmiş olan abrazif partiküllerin ikinci bir aşındırıcı gibi davranıp Poliamid 66' nın yüzeyini aşınmaya uğrattığı görülmektedir (Abdelbary, 2015).



Şekil 4.4. Poliamid 66 yüzeyine gömülü abrazif partiküller (Abdelbary, 2015).

Yorulma aşınması polimerin kayma hareketi sırasında, iki yüzey arasında tekrarlı yükler neticesinde yüzey ve yüzey altı çatlakların oluşması ile meydana gelir. Genellikle polimerlerde meydana gelen yorulma aşınma türlerinden biri de delaminasyon aşınmasıdır. Bu aşınmada sırasında, yüzeyden plaka şeklinde oluşan kopmaların sebebi yükün artması ile oluşan çatlağın yayılması ve diğer çatlaklarla birleşmesidir (Tekin, 2015).



Şekil 4.5. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi (Abdelbary, 2015).

Yorulma aşınmasının mekanizması;

- yüzeyin plastik deformasyonu,
- plastik deformasyon nedeniyle yüzey altında çatlaklarının başlaması,
- kayma yönüne paralel çatlak ilerlemesi ve

- çatlak kritik bir seviyeye ulaştığında uzun, ince plakaların kopmasını içermektedir.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi mikroskopik olarak, gevşemiş aşınma tabakaları şekil olarak ince ve uzun aynı zamanda adhezif aşınmadan dolayı da üzerleri yivli, çizgili parçalar şeklinde görünmektedir (Abdelbary, 2015).



Şekil 4.6 Delaminasyon aşınma tabakaları (50X) (Abdelbary, 2015).

Korozyon aşınması, kimyasal bir ortamda polimerlerin kayması sırasında hem korozyon hem de aşınma mekanizmaları söz konusu olduğunda meydana gelmektedir. Bu özel durumda, tek başına maruz kalınan aşınma türüne ek ilave etkilerin varlığı çok daha büyük toplam aşınmış hacme yol açmaktadır. Genellikle, bu aşınma türü iki aşamada gerçekleşir. İlk olarak, kimyasal ortamın etkisi nedeniyle polimer yüzeylerinde korozyon meydana gelir. Daha sonra, kayma işlemi aşınmış yüzey katmanını uzaklaştırır. Yeni yüzey yine aşındırıcı ortama maruz kalır ve aşınma hızı, kayma hareketi ile hızlandırılır (Abdelbary, 2015).

Kalça ve diz protezlerinde vazgeçilmez olan UHMWPE esaslı kompozitler eklem yerlerindeki sıvı ortamlarda destek, hareket ve yatak görevini yapmaktadırlar. UHMWPE’nin düşük yüzey sertliği ve zayıf aşınma direnci nedeniyle mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Gama ışınlama, peroksit veya ısı muamelesi yöntemleri ile elde edilmiş çapraz bağlı UHMWPE, çapraz bağlı olmayan UHMWPE’ye göre aşınma direncinin büyük ölçüde arttığı tespit edilmiştir (Kurtz vd., 1999). Buna rağmen bazı çalışmalarda çapraz bağlı UHMWPE’

nin süneklik ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir (Lewis, 2001; Khonakdar vd., 2003). UHMWPE'nin aşınma ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise; kuartz (Xie vd., 2003), kaolin (Gong vd., 2004), zirkonyum partikülleri (Plumlee ve Schwartz, 2009) ve karbon nanotüp (Ruan vd., 2006; Xue vd., 2006) gibi dolgu elemanlarının kullanılmasıdır. Ancak yüksek miktarlarda inorganik partiküllerin ilavesi, karbon nanotüplerin yüksek maliyeti ve kompozitlerin tatmin edici olmayan performansları, bu yöntemle elde edilen kompozitlerin kullanımını oldukça sınırlamaktadır. Grafen türevleri içerisinde dolgu maddesi olarak çeşitli polimerlerle en çok kullanılan GO olmuştur. Aşağıda bu çalışmada kullanılan UHMWPE'nin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için çeşitli grafen türevleri ile yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Tai vd.'nin (2012) çalışmasına göre, GF tozundan Hummers metodu ile üretilen GO tozu farklı ağırlıkça (% 0.1, 0.3, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0 ağırlık%) oranlarında UHMWPE matrisine katılarak GO/UHMWPE kompozitleri sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. GO/UHMWPE ve katkısız UHMWPE örneklerinin mekanik ve tribolojik özellikleri mikrosertlik testi ve yüksek hızlı ileri-geri aşınma test cihazı ile araştırılmıştır. Kompozitlerin aşınma yüzeyleri SEM cihazı ile incelenerek, tribolojik davranışları analiz edilmiştir. Aşınma testleri oda sıcaklığında 5 N yük altında ve ortalama kayma hızı yaklaşık 9 cm/s' de gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak zirkonyum dioksit topları (ZrO_2 , Moh's sertliği: 7.0, Yüzey pürüzlülük: $R_a = 0.03 \mu m$) kullanılmıştır. Katkısız UHMWPE ile karşılaştırıldığında GO içeriği arttıkça kompozitlerin sertliklerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum SEM analiz sonuçlarından görülen GO'nun matriste homojen dağılımı neticesinde batıcı uca karşılık kompozit örneklerinin gösterdiği direncin artmasına atfedilmiştir. Katkısız UHMWPE'nin sürtünme katsayısı 0.095 olarak bulunmuştur. GO eklenmesi ile sürtünme katsayısı değerleri az miktarda artmıştır. %3.0 GO içeriğinde aşınma hızı %40 azalmıştır. Genel olarak GO ilavesi aşınma hızını azaltmıştır. Özellikle %0.7 oranından sonra bir miktar artması matris içinde GO'nun topaklanmasına atfedilmiştir. Katkısız UHMWPE'nin ve kompozitlerin aşınma testinden sonra yüzey görüntüleri SEM ile incelenmiş, aşınma özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir. Katkısız UHMWPE'nin yüzey görüntüsünde yorulma aşınmasının izlerini gösteren çatlaklar ve derin oyuklar görülmüştür. GO ilavesi ile yüzeydeki gerilimin dolgu maddesi tarafından aktarılması ile sürtünme hasarının azaldığı anlaşılmıştır. GO içeriği %3.0 olduğu GO/UHMWPE kompozitin yüzeyi diğer örneklerden daha düzgün hale geldiği ve yüzey kusurlarının görünmediği,

sadece düzgün ve çok sık aşınma izleri olduğu görülmüştür. Ayrıca katkısız UHMWPE örneğinde aşınma sırasında büyük parçaların koptuğu, GO içeriği arttıkça kopan parçaların boyutlarının küçüldüğü gösterilmiştir. Bu durum GO'nun polimer matrikste başarılı şekilde dağılımı ve GO'ya yük aktarımını kolaylaştıran, polimer ve GO arasındaki etkileşim için geniş bir yüzey alanı sağlaması ile GO'nun kompozitin aşınma özelliklerini iyileştirdiği anlaşılmıştır. ZrO_2 toplarının aşınma sonrası optik mikroskop yüzey görüntülerinden GO içeriği %1.0'dan sonra topun yüzeyinde bulunan çizgilerin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Bu durum %1.0 GO içeriğinden sonra daha fazla GO içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin topun sertlik değerini aştığı şeklinde yorumlanmıştır.

Pang vd.'nin (2018) çalışmasında, UHMWPE/GO nanokompozitleri GO tozunun farklı ağırlık % (0.1, 0.5 ve 1.0) oranlarında sıvı-faz dispersiyonu ardından sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Farklı yağlama koşullarında (kuru, saf su ve deniz suyu) kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. GO'nun UHMWPE matrisine ilavesinden sonra, kompozitlerin sürtünme katsayısının az miktarda arttığı ve ağırlık %1.0 GO oranında ise azaldığı görülmüştür. UHMWPE/GO kompozitleri sulu ortam (saf su ve deniz suyu) koşullarında kuru ortam koşullarına göre daha düşük sürtünme katsayıları sergilemişlerdir. Buna ek olarak, deniz suyu ortamında kompozitlerinin sürtünme katsayılarının saf su ortamından daha düşük olduğu da belirlenmiştir. Sonuç olarak deniz suyu ortamının saf su ortamına göre daha iyi yağlama performansı sergilediği anlaşılmıştır. GO eklenmesi, UHMWPE'nin aşınma oranlarının tüm ortamlarda GO oranı arttıkça azaldığını göstermiştir. Polimerde gözlemlenen aşınma performansındaki artış, GO'nun iyi yük taşımasını kolaylaştıran mükemmel mekanik özellikleri ve yüksek yüzey alanına atfedilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın diğer önemli sonuçları GO ilavesinin UHMWPE'nin kristallikliğini ve sertliğini arttırmasıdır. Kristallik derecesinin ve sertliğin artışı kompozitlerin aşınma direncine olumlu etki yaptığını ortaya çıkarmıştır. Yine aynı şekilden kuru koşullar altındaki kompozitlerin aşınma oranlarının, saf su ve deniz suyu koşulları altında olduğundan daha yüksek olduğu görülmüştür. Katkısız UHMWPE için, saf su ve deniz suyu ortamındaki aşınma oranları temelde aynı bulunmuştur. Ancak GO, UHMWPE matrisine ilave edildiği zaman, deniz suyu koşullarındaki kompozitlerin aşınma hızının saf su koşulları altında olduğundan daha düşük olduğu belirlenmiştir. GO'nun artan içeriği ile, deniz suyu ortamında UHMWPE/GO kompozitlerinin aşınma direnci, saf su ortamından daha iyi sonuç vermiştir. Ağırlıkça %1.0 oranında GO içerikli UHMWPE/GO kompoziti, deniz

suyunun iyi yağlama etkisi ve GO'nun etkili takviye özelliğinden dolayı deniz suyu ortamında en düşük aşınma hızını sergilemiştir. Kuru ortamda aşınma katkısız UHMWPE yüzeyinden büyük malzeme parçaları soyulmuş, bu da ciddi derecede adhezif aşınma ve önemli ölçüde yorulma aşınmasına atfedilmiştir. GO'nun UHMWPE matrisine ilavesi UHMWPE/GO kompozitlerin aşınmış yüzeyindeki ciddi adhezif aşınma ve yorulma aşınmasını önemli ölçüde azalttığı, nispeten pürüzsüz bir yüzey görüntüsünden anlaşılmıştır. Bu durum GO'nun mükemmel mekanik özellikleri, tek tabakalı yapısı, GO ve UHMWPE matrisi arasındaki etkileşim alanının nispeten büyüklüğü ve GO'nun bir bağlayıcı görevi görmesi ile açıklanmıştır. Saf su ortamında ise aşınma mekanizmasının değiştiği adhezif aşınmanın gerçekleştiği katkısız UHMWPE'nin yüzey görüntüsündeki derin ve geniş izlerden anlaşılmıştır. GO'nun UHMWPE matrisine ilavesi ile UHMWPE/GO kompozitlerinin aşınma yüzeyindeki izlerin genişliği ve derinliğinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bu durum, kuru aşınma sırasında ortaya çıkan büyük sürtünme ısısını engelleyen sıvı ortamın soğutma etkisine atfedilmiştir. Sürtünme ısısı, polimer kompozitlerin kayma yüzeyini yumuşatacağından ve şiddetli abrazyon aşınmaya ve belirgin yorulma aşınmasına neden olacağından, kuru aşınma ortamı sıvı aşınma ortamına göre daha yüksek aşınma oranlarıyla sonuçlanmaktadır. Saf su yağlama ortamına benzer şekilde, deniz suyu şartlarında katkısız UHMWPE'nin aşınma davranışı abrazyon aşınma olarak kendini göstermiştir çünkü deniz suyunun korozyon etkisi hem abrazyon hem de ciddi derecede yorulma aşınmasını tetiklemiştir. UHMWPE'nin deniz suyu altındaki yıpranmış yüzeyi saf su durumundan daha hasarlı görünmektedir. Bunun nedeni, deniz suyunun karşı malzeme olarak kullanılan GCr15 çeliğinin sürtünme yüzeyini aşındırması ve yüzeyin pürüzlülüğünü arttırması ile açıklanmıştır. GO, UHMWPE matrisine ilave edildiğinde ise, UHMWPE/GO kompozitlerinin aşınma yüzeyi daha az sayıda yükselteli görüntü göstermiş ve daha pürüzsüz hale gelmiştir. Sonuç olarak GO ilavesinin deniz suyu yağlama ortamında UHMWPE'nin aşınma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtilmiştir. Dahası saf su yağlama koşuluna kıyasla, deniz suyu koşullarındaki kompozitlerin mükemmel sürtünme ve aşınma özellikleri, deniz suyunun yağlama etkisine atfedilmiştir. Bu çalışmada ayrıca yapılan temas açısı ölçümleri sonucunda deniz suyu altındaki kompozitlerin temas açısı, saf sudan daha küçük bulunmuştur, bu da deniz suyu altındaki kompozitlerin ıslanabilirliğinin saf sudan daha iyi olduğunu göstermiştir. Kompozit yüzeylerin ıslatılabilirliği, daha kalın sıvı film ile sonuçlanıp, daha iyi bir yağlama etkisine yol açmaktadır. Saf su bileşiminden farklı olarak, deniz

suyu büyük miktarda tuz ve iki değerlikli metal tuzu içermektedir. Deniz suyuyla yağlama koşulunda, Ca^{2+} ve Mg^{2+} , CaCO_3 ve Mg(OH)_2 formunda çelik yüzey üzerinde biriken bulamaç benzeri çökeltme tabakası sürtünme yüzeyleri arasında yağlama ve bariyer olarak rol oynamıştır. Ayrıca GO'nun ilavesi, UHMWPE'nin yüzey sertliği ve darbe dayanımı gibi yüzey mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Bu da UHMWPE'nin aşınma ve deniz suyu şartlarında korozyif GCr15 çelik yüzeyinin neden olduğu aşınmaya karşı direncini arttırmıştır. Bu nedenle, UHMWPE/GO kompozitleri deniz suyu yağlama koşulu altında optimal sürtünme katsayısı ve aşınma hızı sergilemiştir.

Chen vd.'nin (2012) GO/UHMWPE kompozitler, sıvı faz dispersiyon ve ardından sıcak presleme ile hazırlanmıştır. Kompozitlerin mikro yapı, mekanik ve sitotoksikite özellikleri incelenmiştir. GO tabakalarının UHMWPE matrisi içinde iyice dağıldığı SEM kesit görüntülerinde gösterilmiştir. %1.0'a varan GO eklenmesi ile katkısız UHMWPE'nin sertliği kademeli olarak artmış, aynı zamanda akma mukavemeti de gelişmiştir. Sitotoksikite testleri sonucu kullanılan MC3T3-E1 hücreleri kompozitlerin yüzeylerine iyi bağlanmış ve büyümüş ve GO'nun eklenmesi hücrelerin morfolojisi ve canlılığını etkilememiştir. GO/UHMWPE kompozitlerin, gelişmiş mekanik özellikleri ve iyi biyouyumluluğunun başarılı bir şekilde birleştirilebildiği ıspatlanarak, üretilen bu kompozitlerin insan vücudundaki yapay eklemler için potansiyel bir aday olabileceği belirtilmiştir.

Chih vd.'nin (2017) UHMWPE/ nanotabakalı grafen (GNP) nanokompozitleri ile ilgili GNP tozunun farklı ağırlık % (0.1, 0.25 ve 0.5) oranlarında sıvı-faz dispersiyonu (sonikasyon) ardından sıcak presleme yöntemi ile üretilen nanokompozitlerin sürtünme ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada; katkısız UHMWPE'nin dinamik sürtünme katsayısının 0.15 olduğu gözlenmiştir. Sürtünme katsayısı GNP'nin eklenmesiyle 0.24'e kadar artmıştır. Bu, UHMWPE zincirlerinin, birbirleri üzerinde kaymalarını önleyen GNP'ler tarafından bağlanmasına atfedilmiştir. Genel olarak nanokompozitlerin aşınma hızı, katkısız UHMWPE ile karşılaştırıldığında daha düşük bulunmuştur. Aşınma hızındaki azalma, GNP'lerin eklenmesi sonucunda artan mekanik mukavemet ve termal iletkenliğe bağlanmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada, UHMWPE içerisinde GNP'lerin homojen dağılımına atfedilen nanokompozitlerin sertliğinde bir artış belirlenmiştir. GNP'nin geniş yüzey alanı, aynı zamanda, polimer ile GNP arasındaki etkileşimi de arttırmıştır, bu da matristen dolguya verimli bir yük aktarımı ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, maksimum aşınma direncine neden olan optimum miktarda GNP'nin ağırlık olarak % 0.25 olduğu gözlenmiştir. GNP konsantrasyonunun

daha da artması, aşınma direncini azaltmıştır. Bu durum, matris içindeki GNP'lerin ağırlıkça % 0.5 oranında iken aglomerasyonuna bağlanmıştır. 8 MPa yük altında yapılan aşınma test sonuçlarından en iyi aşınma direncine sahip olan GNP içeriği 0.25 olan kompozit seçilerek yükün etkisini değerlendirmek için 12, 16 ve 20 MPa'lık temas basınçları kullanılarak yeni testler yapılmıştır. Temas basıncındaki artışla ortalama sürtünme katsayısı hafifçe azalmıştır. Bu durum daha düşük sürtünme ile sonuçlanan yüzey kayma kuvvetindeki azalmaya neden olan artan yükün bir sonucu olarak yüzey yumuşamasına atfedilmiştir. Aynı zamanda, temas basıncı arttıkça karşı malzemedeki transfer filminin azaldığı belirlenmiştir. Daha az sürtünme katsayısı daha az transfer filmi anlamına gelmektedir. Bir başka değişle enerji kaybı en aza indirileceği için nanokompozitlere yüksek yük uygulamalarında avantaj sağlamıştır. Temas basıncındaki artış, aşınma hızında da doğrusal bir artışa neden olmuştur. Temas basıncı ne kadar yüksek olursa, karşı malzeme yüzey pürüzlükleri de o kadar fazladır ve numune yüzeyine, temas döngüsü başına daha derin bir aşınmaya neden olmuştur. Bu yük artışı ile aşınma hızındaki artışı açıklamaktadır. Ek olarak, daha yüksek yük, plastik deformasyonu arttırıp, dolayısıyla daha fazla malzeme eksilmesine sebep olmuştur. Sürtünme yönünü gösteren paralel çizgiler, tüm örneklerde baskın aşınma mekanizmasının plastik deformasyonla beliren abrazif aşınma olduğunu göstermiştir. Üç farklı kayma hızında nanokompozitin aşınma hızı, doğrusal kayma hızındaki artışla artmıştır. Hız arttıkça, temas sıcaklığı artmış ve yüzeydeki polimer nanokompozit daha da yumuşamıştır, bu da mekanik mukavemette bir azalmaya yol açmış ve daha fazla malzeme kaybıyla sonuçlanmıştır. Üç farklı kayma hızında test edilen örneklerin aşınma izi yüzey morfolojisinin birbirinden oldukça farklı olduğu görünmüştür. 0.1 m/s'de aşınma izi yüzeyinin pürüzsüz olduğu belirlenmiştir. Aşınma derinliğinden ve aşınma izi morfolojisinden görülebileceği gibi aşınma hızı fazla olmadığından, 0.5m/s'ye kadar hız etkisi az olarak kabul edilmiştir. 0.75 m/s'lik bir kayma hızında, aşınma hızı artmıştır. Kayma hızı, 0.1 ila 0.5 m/s arasında değiştiğinde, aşınma hızı, % 547'lik bir artışa göre %757 artmıştır. Bu, aşınma mekanizmasındaki önemli değişikliklerin bir göstergesidir ve numunenin 0.75 m/s'lik bir hıza dayanamamasından kaynaklanmaktadır. Bu, yüksek hızda aşırı temas sıcaklığının bir sonucudur. Ayrıca, polimerler zayıf termal iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle, biriken ısı, yumuşamaya neden olur ve malzemedeki kayma aşınmasına neden olur. Ayrıca, aşınma izi yüzeyi, numunenin dayanıksız olduğunu teyit eden şekilde çok pürüzlü olarak ortaya çıkmıştır. Her kayma

hızında testten sonra karşı malzeme yüzeyinin optik mikroskop görüntüleri az miktarda transfer filmi oluştuğunu göstermiştir.

Bhattacharyya vd.'nin (2014) çalışmasında; RGO ve UHMWPE nanokompozit filmleri iki yöntem kullanılarak üretilmiştir. İlk yöntemde, GO organik çözücüler içinde dağıtılıp ve polimere eklenmeden önce grafene fenilhidrazin ile indirgenmiştir. Diğer yöntemde ise indirgeme dolgunun polimere eklenmesinden sonra, *in situ* yöntemi ile yapılmıştır. Raman spektroskopisi çalışması, ikinci yöntemin grafenin daha iyi bir şekilde dağılmasını sağladığını ancak seçilen alan elektron difraksiyonu (SAED) patterninden, geniş açılı XRD ve DSC analizlerinden daha fazla amorf içeriğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. İlk indirgeme yöntemiyle üretilen nanokompozit filmin, *in situ* yöntemine kıyasla daha yüksek kristalliliğe (neredeyse saf film ile aynı) sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemle üretilen nanokompozit filmlerin çekme modülü 864 MPa'dan 1236 MPa'ya çekme mukavemeti ise 12.6 MPa'dan 22.2 MPa'ya artmıştır. Sürünme gerilmesinin ise 72 saat boyunca maksimum yükün %40'ı uygulandığında %50'den %9'a düşürüldüğü belirlenmiştir. Bu bulgular grafenin gerilme ve sürünme direnci özelliklerini geliştirmek için UHMWPE'ye ilave edilerek kullanılabileceğini göstermiştir.

Golchin vd.'nin (2016) yaptığı çalışmada ise UHMWPE'nin çok duvarlı karbon nanotüp (MWNT) ve GO dolguları kullanılarak üretilen kompozitin sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde γ -ışını ve hidrotermal yaşlanmanın etkisi incelenmiştir. Polimerik malzemelerin yaşlanması veya γ -ışınlanması ile sürtünme katsayısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Herhangi bir işlem görmemiş ve işlem görmüş katkısız UHMWPE kompozitlere kıyasla daha yüksek ortalama sürtünme katsayısı sergiledikleri gözlenmiştir. Bu durum GO ve MWNT'lerin sürtünme azaltıcı etkisine atfedilmiştir. Katkısız polimerin aşınma hızının özellikle yaşlandırma yapılmış polimerde oldukça azaldığı görülmüştür. Ancak bu durum kompozitler için geçerli olmamıştır çünkü ısı ve nem tesiri ile dolgu/matris ara-yüzeyinin bozulması daha kolay olmuştur. Ancak polimerlerin γ ışınlanması, aşınma direncini geliştirmemiştir. Bununla birlikte, işlem görmemiş GO ve MWNT ile dolgulu UHMWPE kompozitler, katkısız UHMWPE'ye kıyasla sürekli olarak daha düşük bir ortalama aşınma hızı sergilemişlerdir. Polimer matrisine GO veya MWNT'nin ilave edilmesiyle polimerlerin aşınma direncinde iyileşme olmuştur. Daha düşük bir sürtünme katsayısının daha düşük bir aşınma hızına eşlik ettiği durumlarda, polimerik malzemelerin sürtünmesi ve aşınması arasındaki doğrusal bir korelasyon gözlemlenmiştir. Malzeme çiftlerinin topografik özelliklerinin,

yağlayıcı koşullarda eşleşme yüzeylerinin yağlama rejimini belirlemede önemli bir rol oynadığı, bu bağlamda, metalik karşı yüzeyin polimerler ile bir tribolojik temasta aşınması ve parlatılması, hidrodinamik yağlamanın sürtünme ve aşınmada eşzamanlı bir azalmaya yol açan temas yüzeylerinin ayrılması ile sonuçlanmıştır. Polimerik malzemeler genellikle metalik muadillerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir sertlik sergilerler ve böylece, yağlanmış bir tribolojik temasta metalik karşı yüzeylerin topografyasını sadece az miktarda etkileyebilirler. Bununla birlikte, polimer matrisindeki dolgu maddelerinin eklenmesiyle, dolgu maddeleri aşınma işlemi sırasında yavaş yavaş ortaya çıkar ve morfolojisine ve mekanik özelliklerine bağlı olarak metalik muadillerinin aşınmasına yol açabilmektedirler. GO ve MWNT'lerin mekanik özellikleri göz önüne alındığında, bu parçacıkların polimer matrisine dahil edilmesi potansiyel olarak karşı yüzeylerin topografyasının bir tribolojik temasta modifiye edilmesine yol açabilmektedir. Metalik karşı yüzeylerin topografik ölçümleri, bu nedenle, metalik karşı yüzeylerin pürüzlülüğündeki bir değişimin, polimerik malzemelerin sürtünme ve aşınmasında gözlenen azalma için baskın mekanizma olup olmadığını araştırmak üzere, testlerden önce ve sonra yapılan aşınma boyunca gerçekleştirilmiştir. MWNT ve GO sert dolgu maddeleri olarak kabul edilebilmesine rağmen, birçok çalışma bu dolgu maddelerinin tribolojik bir temasta sınırlayıcı etkisini göstermiştir. Aşınma işlemi sırasında, açıkta kalan veya hatta ayrılmış olan nano dolgu maddeleri, temas yüzeylerin arasında doğrudan teması önleyerek, temas eden yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltarak katı bir yağlayıcı olarak hareket edebilmektedirler. Ayrıca, CNT ve GO'nun yağlayıcı katkı maddeleri olarak benzer yağlayıcı etkileri de daha önce bildirilmiştir. Polimer yüzeylerine çarpan aşınma ürünleri polimer zincirleri üzerinde hareket eden kayma gerilmelerinde bir azalmaya neden olduğundan sürtünme kuvveti azalmaktadır. Bu, çekme kuvvetinde bir azalmaya yol açar ve bu nedenle tribo-çiftlerin sürtünme ve aşınmasında bir azalma gözlenmiştir.

Yukarıda literatür özeti verilen çalışmalarda da görüldüğü gibi, UHMWPE ile C vitamini ile sentezlenmiş RGOC kullanılarak bu çalışmada üretilmiş kompozit hakkında yapılan literatür taraması sonrasında herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yalnızca C vitamini ile indirgenen RGO'nun yapısal ve elektrik özellikleri incelenmiş, sonuç olarak indirgenmenin başarılı şekilde gerçekleştiği ve C vitamininin yalnızca C, H ve O' den oluşmuş olmasının en avantajlı yönünün ortama yabancı bir atom ilave edilmemesi olduğu rapor edilmiştir (Fernandez-Merino vd., 2010). Bu çalışmada polimer matriks olarak seçilen UHMWPE ve C vitamini ile indirgenen GO'nun dolgu elemanı olarak

kullanılmasıyla kompozitler üretilmiş ve bu kompozitlerin mikroyapısal ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu alanda yapılan önceki çalışmalar göstermektedir ki, UHMWPE kompozit üretmedeki zorluklar, düşük mekanik ve tribolojik özellikler gibi olumsuzluklar aşılammıştır. Bu yüzden;

- ✓ hummers metoduyla GF'den GO sentezlenmesi,
- ✓ sentezlenen GO'nun toksik ve zararlı etkilere sahip hidrazin hidrat yerine doğal bir antioksidan olan C vitaminiyle indirgenmesi,
- ✓ kompozitlerin sıvı faz dispersiyon yöntemiyle ucuz ve kolay bir şekilde üretilmesi ve
- ✓ kompozitlerin tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi bu tezin amaçlarını oluşturmaktadır.



5.MATERYAL VE METOT

5.1. Kullanılan Malzemeler

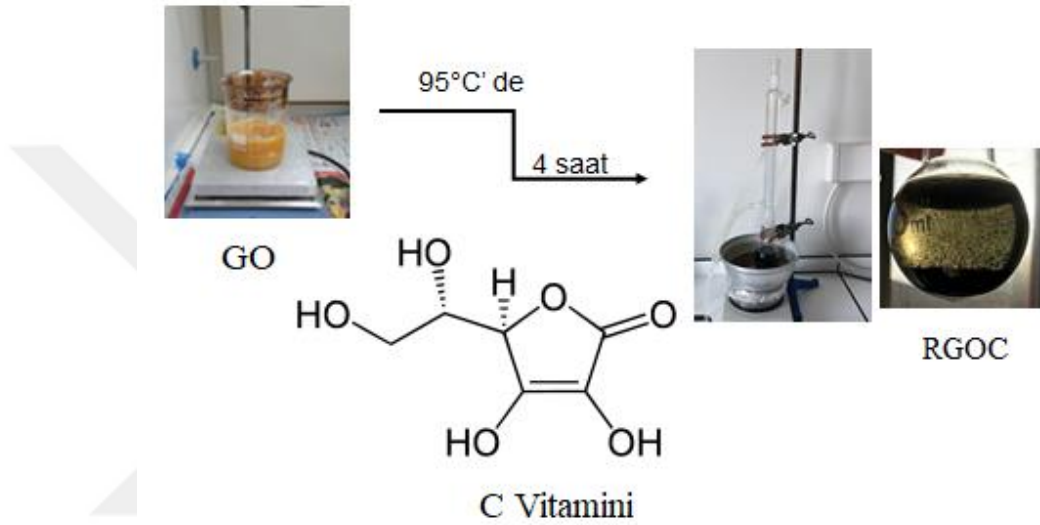
Bu çalışma kompozit üretimi için kullanılan polimer matriks UHMWPE'den oluşmuştur. UHMWPE (429015-250G), ortalama moleküler ağırlığı $3-6 \times 10^6$ g/mol, yoğunluğu 0.94 g/ml olup Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Dolgu maddesi olarak kullanılan RGOC'nin sentezi için ilk aşamada GF tozundan modifiye Hummers metoduyla GO sentezlenmiştir. GO sentezi için kullanılan kimyasallar, GF (45 μ m), sülfirik asit (H_2SO_4 -%98), potasyum permanganat ($KMnO_4$), %30'luk hidrojen peroksit (H_2O_2), hidroklorik asit (HCl) Merck firmasından temin edilmiş olup tümü analitik saflıktadır. RGOC sentezi için kullanılan C vitamininin (L(+)-Ascorbic acid, ACS) moleküler ağırlığı 176.13 g/mol olup Acros Organics firmasından temin edilmiştir. İndirgenme reaksiyonunda ortamın pH ayarı için Merck firmasından satın alınan amonyak çözeltisi (NH_3 -%28-30) kullanılmıştır. Kompozit tozu üretimi için kullanılan etanol (C_2H_5OH) Merck firmasından satın alınarak kullanılmıştır. Aşınma testi için bu çalışmada kullanılan farklı yağlayıcı sıvı ortamlarından Serum fizyolojik çözeltisi (%0.9 İzotonik) Biofleks firmasından ve Hank'ın dengeli tuz çözeltisi (H8264-1L) ise Sigma-Aldrich firmasından temin edilerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bu sıvı yağlayıcılar vücut sıvısını simule eden ortamlar olarak kabul edilmektedir.

5.2. Grafitten Modifiye Hummers Metodu ile GO Sentezi

1 g GF 69 mL sülfirik asit (H_2SO_4) ile 30 dakika buz banyosunda karıştırıldıktan sonra 8 g potasyum permanganat ($KMnO_4$) yavaşça ilave edilmiştir. Karışım buz banyosunda ve ultrasonik banyoda sırayla 15'er dk. karıştırılmıştır. Daha sonra buz banyosu uzaklaştırılarak, 35°C'de yağ banyosunda başlangıçtaki siyah rengi kahverengi oluncaya kadar yaklaşık 12 saat karıştırılmaya devam edilmiştir. Karışımın rengini değişime uğratmadan yavaşça saf su ilave edilip ve 2 saat şiddetli karıştırılmıştır. 2 saat sonunda reaksiyona 12 ml %30'luk hidrojen peroksit (H_2O_2) eklendiğinde karışım GO'nun başarılı bir şekilde sentezlendiğini kanıtlayan altın sarısı renge dönüşmüştür. Karışım süzölmüş ve metal iyonlarının uzaklaştırılması için %3'lük hidroklorik asit (HCl) ve saf su ile birkaç kez yıkanmıştır (Hummers ve Offeman, 1958; Mindivan ve Göktaş, 2018). Elde edilen GO örnekleri 65°C'de etüvde 12 saat kurutulmuştur. GO'nun başarılı bir şekilde sentezlendiği XRD analizi kanıtlanmıştır (Şekil 6.2).

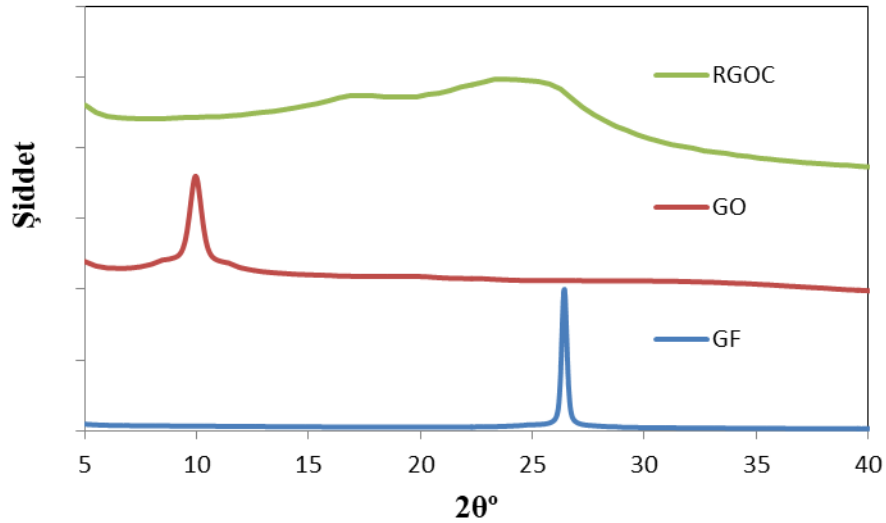
5.3. Sentezlenen GO'dan RGOC Sentezi

İndirgenme işlemi için Hummers metodu ile sentezlenen 0.5 g GO örnekleri 100 ml saf suda ultrasonik banyoda 30 dk. bekletilmiştir. Elde edilen süspansiyonun pH' sı amonyak ile 10.00'a ayarlandıktan sonra 0.5 gr. C vitamini eklenerek 15 dk. ultrasonik banyoda bekletildikten sonra 95°C'de geri soğutucu altında 16 saat karıştırılmıştır. Karışım süzülüp, elde edilen siyah renkli toz, saf su ile birkaç kez yıkanmıştır. Aşağıda Şekil 5.1'de RGOC sentezi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. RGOC sentezi.

Aşağıda Şekil 6.2'de GF, GO ve RGOC'nin XRD difraktogramı verilmiştir. GF'nin XRD difraktogramında $2\theta=26.4^\circ$ 'de görülen keskin pik GF'nin kristal yapısını temsil eden karakteristik pik olarak bilinmektedir (Liu vd., 2013). GF'nin oksidasyonu ile elde edilen GO ise Şekil 6.2'de görüldüğü gibi 9.9° 'de kuvvetli bir difraksiyon piki vermiştir. Yine aynı analiz sonuçlarından GF'nin tabakalar arası mesafesi 0.33 nm iken GO'nun tabakalar arası mesafesi 0.82 nm'ye yükselmiştir. Oksidasyon reaksiyonundan sonra pikin sola kayması ve tabakalar arası mesafenin artması oksijen içeren fonksiyonel grupların başarılı bir şekilde bağlandığını göstermektedir (Deshmukh ve Joshi, 2014). RGO'nun XRD difraktogramında ise GO'yu tanımlayan difraksiyon piki tamamen ortadan kaybolmuştur. Bu durum açıkça indirgeme reaksiyonlarının başarı ile gerçekleştiğini göstermektedir (Hu vd., 2014).



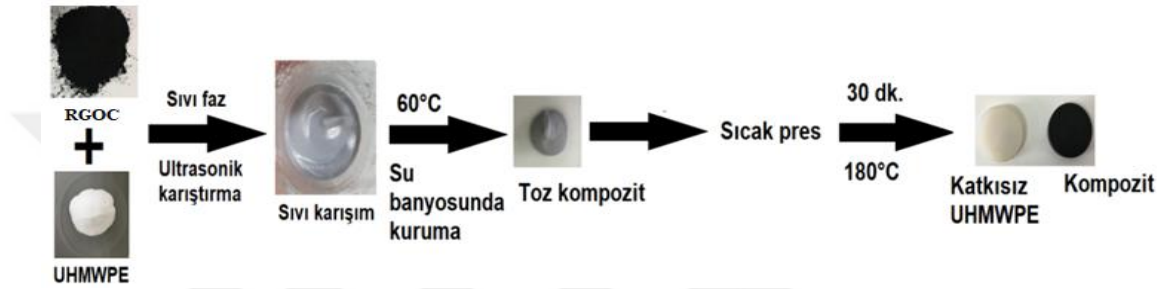
Şekil 5.2. GF, GO ve RGOC örneklerine ait XRD difraktogramı.

5.4. UHMWPE/RGOC Kompozit Üretimi

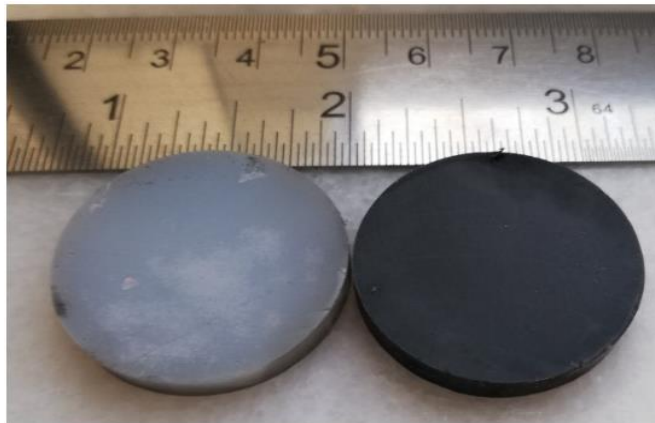
UHMWPE/RGOC kompozitleri önce koloidal karıştırma ardından sıcak presleme ile hazırlanmıştır. Dolgu maddesi olarak kullanılan RGOC'nin UHMWPE matrisine farklı ağırlık yüzdesinde (0.1, 0.3, 1.0 ve 2.0) ilave edilerek aşağıda Çizelge 5.1'de üretilen kompozitlerin kodları ve ilave edilen RGOC'nin farklı ağırlık yüzdesi verilmiştir. C vitamini ile indirgenerek hazırlanan RGOC 30 dk. etil alkol içerisinde ultrasonik banyoda grafen tabakalarının birbirinden ayrılması için bekletilmiştir. UHMWPE tozu da ayrı bir beherde yine etil alkol içerisinde 30 dk. manyetik karıştırıcıda bekletilmiştir. Her iki süspansiyon (UHMWPE ve RGOC) aynı beher içerisinde karıştırılarak 1 saat ultrasonik banyoda bekletildikten sonra etil alkolün tamamen uzaklaştırılması için 60-70°C'de bir yağ banyosunda tutulmuştur. Üretilen kompozit tozları bir etüvde 60°C'de kurutulmuştur. Katkısız polimer ve kompozit tozları 180°C'de 10 MPa basınç altında 30 dk. preslenmiştir. Aşağıda Şekil 5.3'de kompozitlerin üretim aşamaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Kompozitlerin ağırlıkça RGOC yüzdeleri ve kodları.

Örnekler	Ağ. % RGOC içeriği
UHMWPE	-----
UHMWPE/RGOC-0.1	0.1
UHMWPE/RGOC-0.3	0.3
UHMWPE/RGOC-1	1.0
UHMWPE/RGOC-2	2.0

**Şekil 5.3.** UHMWPE/RGOC kompozitlerinin üretim aşamaları.

Katkısız polimer ve kompozitler karakterizasyon öncesinde 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük zımpara kağıdı ile zımparalanıp, ardından alümina solüsyonu ile parlatılmıştır. Yüzeyi parlatılan örnekler saf su ve alkol ile yıkanıp kurutulmuştur. Bu şekilde hazırlanan örneklerin görüntüsü aşağıda Şekil 5.4'de verilmiştir.

**Şekil 5.4.** Karakterizasyon için hazırlanan örneklerin görüntüsü.

5.5. Karakterizasyon

5.5.1. X-ışını difraktometre (XRD)

Katkısız UHMWPE matriksinin kristalografik yapısını ve aynı matrikse RGOC ilave edildikten sonra kristallik derecesinde meydana gelen değişimleri incelemek için XRD analizi yapılmıştır. GF, GO, RGOC ve UHMWPE/RGOC kompozitlerin XRD difraktogramları Cu K α (λ :1,5404) radyasyon kaynaklı PAN analytical, Empyrean marka cihaz kullanılarak alınmıştır. Difraktogramlar $2\theta^\circ=5-35^\circ$ tarama aralığında ve $2^\circ/\text{dk.}$ 'lık tarama hızında elde edilmiştir.

5.5.2. Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi (FTIR)

Polimer/grafen kompozitlerin karakterizasyonunda grafen ve polimer titreşim piklerinin değerleri ve kaymaları dikkate alınarak grafen tabakaları ve polimer zincirleri arasındaki etkileşimler hakkında yorumlar yapılabilmektedir (Mindivan, 2013). Katkısız UHMWPE ve UHMWPE/RGOC kompozitlerin FTIR spektrumları $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında katı madde ataçmanına yerleştirilerek Pelkin-Elmer Spectrum-One cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

5.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

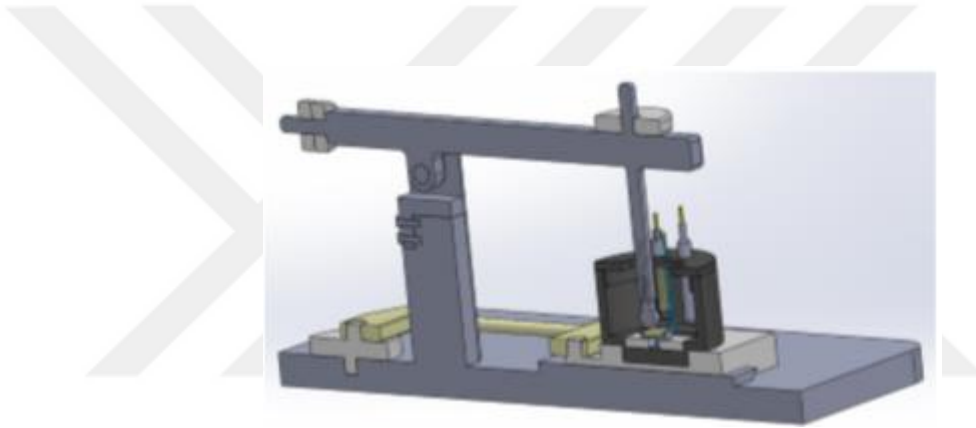
SEM, örnek yüzeyinin yüksek enerjili elektron ışınlarıyla taranarak görüntülenmesi prensibine dayanmaktadır. Aynı cihaza bir X-ışını spektrometresi ekleyerek bir noktanın veya bir alanın elementel analizinin yapılmasını sağlayan sisteme EDS (Enerji Dağılım Spektrometre) denir. Aşınma öncesi ve sonrası katkısız UHMWPE ve UHMWPE/RGOC kompozitlerin yüzey morfolojileri SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir. Örnekler numune tutucuya uygun boyutlara getirilip, altın/paladyum karışımı ile kaplandıktan sonra Supra 40VP, Zeiss cihazı ile incelenmiştir. Ayrıca dolgunun matrikste dağılımının homojen olup olmadığını kontrol etmek için EDS analizi yapılmıştır.

5.5.4. Mikrosertlik testi

Mikrosertlik deneyleri, polimer matrikse ilave edilen grafen miktarının kompozitlerin sertlik değerlerine etkisini belirlemek için Shimadzu marka ölçüm cihazı kullanılarak 0.025 kg yük altında yapılmıştır. Her numune üzerinden on ölçüm alınmış ve aritmetik ortalamaları numunenin mikrosertlik değeri olarak ifade edilmiş ve standart sapmalar hesaplanmıştır.

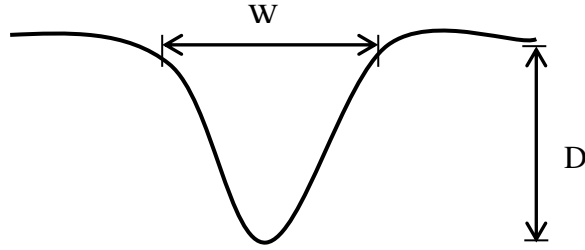
5.5.5. Aşınma testi

Aşınma deneyleri, Şekil 5.5’de görülen ileri geri hareketli aşınma cihazında kuru, saf su, serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvısı ortamlarında gerçekleştirilmiştir. İleri geri hareketli aşınma deneylerinde, aşındırıcı bir bilya, düz bir yüzey üzerinde (numune), yatay ekseninde ve belirli bir genlikte sağa ve sola periyodik olarak hareket etmektedir. Deneylerde karşı malzeme olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmıştır. Deneyler, 12 mm genlik (aşınma izinin uzunluğu), 0.017 m/s kayma hızında, 500 g yük altında ve toplam kayma mesafesi 50 m olacak şekilde yapılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında ortamın bağıl nemi $\%30\pm5$ ve ortam sıcaklığı $27^{\circ}C\pm2$ aralığında kontrol edilmiş, ayrıca deneyler sırasında sürtünme kuvveti kaydedilerek, kararlı hal sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 5.5. Aşınma test cihazı (Mindivan, 2016).

Numunelerin aşınma direncini belirlemek amacıyla, deney sırasında yüzeyde oluşan aşınma izinin (Şekil 5.6) derinliği ve genişliği profilometre (SJ400) yardımı ile ölçülerek, aşağıda eşitlik 5.1’de verilen denklem kullanılarak aşınma hızı hesaplanmıştır.



Şekil 5.6. Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.

$$A = \frac{\pi.W.D.\zeta}{4.S.F} \quad (5.1)$$

A: Aşınma hızı, mm³/Nm

W: Aşınma izinin genişliği, mm

D: Aşınma izinin derinliği, mm

Ç: Aşınma izinin uzunluğu, mm

S: Toplam kayma mesafesi, m

F: Deney yükü, N olarak tanımlanmıştır.

5.5.6. Optik mikroskop

Aşınma deneyi sonrası karşı malzeme yüzeyinin incelenmesi için Nikon marka optik mikroskop kullanılmıştır.

5.5.7. UV-Vis spektrofotometresi (UV)

Aşınma deneyi sonrası serum fizyolojik çözeltisi ve Hank çözeltilerine geçen aşınma ürünlerinin miktarı, ultraviyole ve görünür bölgede meydana gelen absorpsiyon piklerinin dalga boyları kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada T80 - PG Instruments UV-Vis Spektrofotometresi ile 1 cm uzunluğunda kuvars küvetler kullanılarak serum fizyolojik ve Hank çözeltileri içerisindeki aşınma ürünlerinin miktarını belirlemek için analiz edilmiştir.

6.BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. XRD Analiz Sonuçları

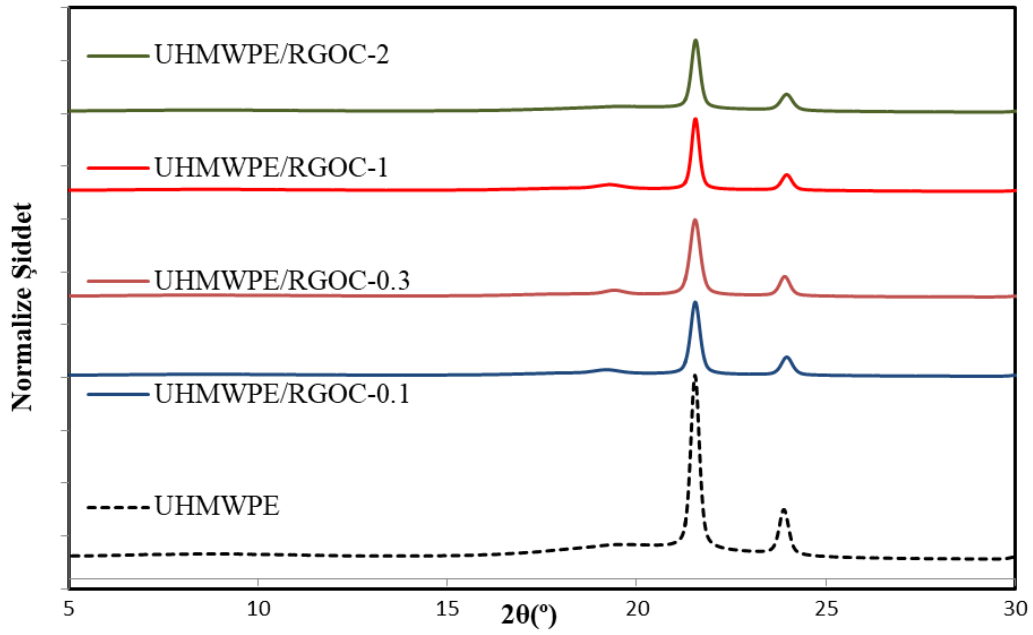
UHMWPE'nin RGOC ilavesi ile kristallik derecesindeki değişimler ve kristalografik yapısını belirlemek için XRD analizi yapılmıştır. Katkısız UHMWPE ve RGOC dolgulu UHMWPE kompozitlerin XRD analiz sonuçlarından elde edilen $2\theta^\circ$, tabakalar arası mesafe (A°), kristal boyut (A°), mikro gerilme (%) değerleri Çizelge 6.1'de, XRD difraktogramı Şekil 6.1'de verilmiştir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi UHMWPE'nin orthorombik yapısını yansıtan $2\theta^\circ=21.5$ derecede (110) ve $2\theta^\circ=23.8$ derecede (200) düzlemlerine ait pikler katkısız polimer için belirlenmiştir (Mohammed vd., 2017). RGOC içeren kompozit örnekleri de aynı derece ve düzlemlere ait iki pik sergilemiş ve RGOC'nin yapısını yansıtan herhangi bir pike rastlanılmamıştır (Çizelge 6.1). Ancak tüm kompozitlerin her iki düzleme ((110) ve (200)) denk gelen pik şiddetlerinde ciddi bir azalma görülmüştür. Ahmad vd.'nin (2012) UHMWPE/yüksek yoğunluklu polietilen karışımına takviye elemanı olarak polietilen glikol ve hidroksi apatiti ilave ettikleri çalışmalarında, üretilen kompozitlerin katkısız UHMWPE'nin XRD difraktogramı ile karşılaştırdıklarında bu çalışma ile benzer şekilde pik şiddetlerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Bu sonucu matriksin kristal yapısının modifiye olması ile açıklamışlardır. Bahrami vd.'nin (2015) yaptıkları UHMWPE/GO nanokompozitin termomekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında da bu çalışmaya benzer şekilde kompozitlerin kristal pikleri dışında başka bir pikin difraktogramda görülmemesini GO'nun matriksde homojen şekilde dağılmasına, tabakaların tamamen eksfoliye olmasına atfetmişlerdir. Yine benzer şekilde Pang vd.'nin (2015) yaptıkları GO dolgulu UHMWPE kompozitin aşınma özelliklerini inceledikleri çalışmalarında difraktogramda GO'ya ait bir pikin olmamasını GO'nun yapıda tamamen dağılmasına ve grafene ait düzenli bir yapının ortadan kalkmış olduğunu rapor etmişlerdir. Sonuç olarak RGOC ilavesinin polimerin kristal yapısını değiştirdiği ve difraktogramda ilave bir pikin gözlenmemiş olması da dolgunun matriksde homojen dağıldığını göstermektedir.

Çizelge 6.1'de gösterildiği gibi kompozit örnekleri UHMWPE ile karşılaştırıldığında tüm kompozitlerin $2\theta^\circ$ ve tabakalar arası mesafe değerleri birbiriyle aynı sonuçları vermiştir. Ancak (110) düzlemine ait kristal boyut değeri ağırlıkça %0.1 ve %0.3 RGOC ilavesinde azalırken, %1.0 RGOC ilavesiyle %12 artmıştır. %2.0 RGOC ilavesinde ise katkısız polimerin kristal boyut değerine ulaşmıştır.

(200) düzlemine ait kristal boyut değeri tüm kompozitlerde katkısız polimere göre azalmıştır. Polimerlerin kristalizasyon prosesleri üzerine matrikse ilave edilen dolgu partiküllerinin boyutu, yüzey alanı, polimer ve dolgu arasındaki etkileşim derecesi ve katkısız polimer matriksin kristallik derecesi gibi faktörler etki etmektedir. Bu faktörlere bağlı olarak dolgu partikülleri polimer zincirini bağlayarak kristalliğin azalmasına veya çekirdekleşme merkezleri gibi davranarak kristalliği artırabileceği rapor edilmiştir (Uflyanda vd., 2019). Bu durumda düşük RGOC ilavesi muhtemelen polimer zincirlerini bağlayarak kristalliğin azalmasına sebep olurken, %1.0 RGOC ilavesi çekirdekleşme etkisi yaparak (110) düzleminde kristal boyutun artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. %2.0 RGOC ilavesinde ise katkısız polimer ile aynı kristal boyutun ortaya çıkmış olması %1.0 RGOC ilavesi yapının kristalliğini artıran maksimum ilave miktarı olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. (200) düzleminde tüm kompozitlerin kristalliği azaltıcı yönde etki etmesi, RGOC'nin tüm ilave edilen ağırlıkça % değerlerinin polimer matrikste çekirdekleşme merkezi gibi davranmadığı ve muhtemelen polimer zincirlerini bağladığı düşünülmektedir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi (110) düzlemine ait mikro gerilme değerleri %0.1 ve %0.3 RGOC ilavesinde artarken, %1.0 ve %2.0 RGOC ilavesinde katkısız polimerle aynı kalmıştır. (200) düzleminde ise tüm kompozitlerde mikro gerilme değerleri katkısız polimere göre artış göstermiştir. (110) düzleminde düşük RGOC ilavesi, kristalizasyon prosesi sırasında zincir bağlanmasına sebep olmasından dolayı mikro gerilmeyi artırmıştır. %1.0 RGOC ilavesinde ise kristalliğin artması, zincir doğrusallığını bozmayıp daha kolay istiflenmeyi sağladığından katkısız polimerle karşılaştırıldığında mikro gerilme değerlerinde ciddi bir değişim gözlenmemiştir. (200) düzlemi için ise tüm kompozitlerin kristal boyutu azaltması mikro gerilme değerlerinde artışa sebep olmuştur.

Çizelge 6.1. UHMWPE ve kompozitlerin XRD analiz sonuçları.

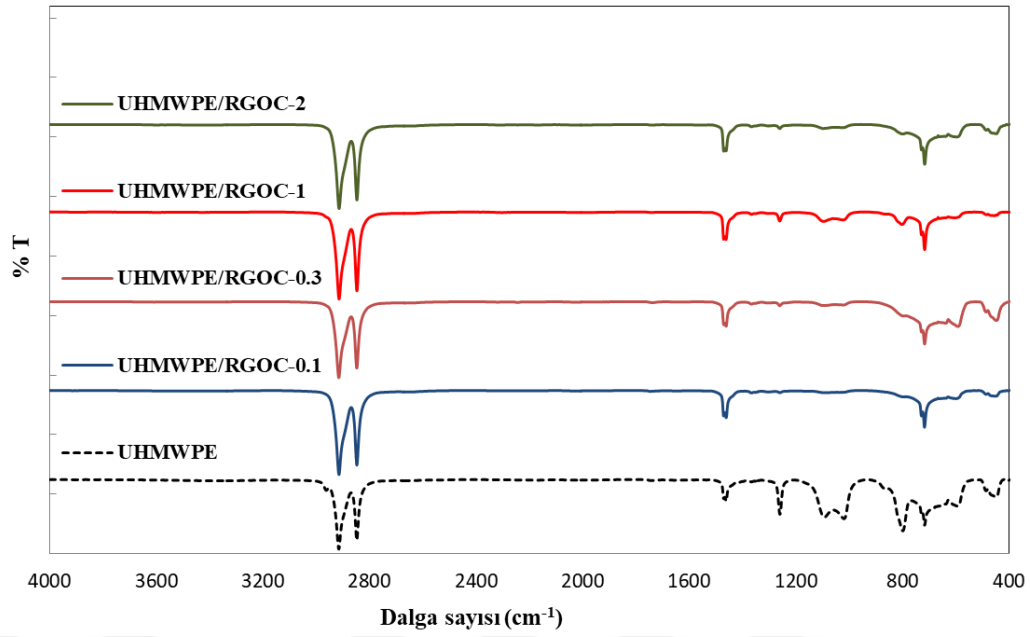
	$2\theta(^{\circ})$	Tabakalar arası mesafe ($\text{\AA}^{\circ}$)	Kristal boyut ($\text{\AA}^{\circ}$)	Mikro gerilme (%)
UHMWPE	21.525	4.128	368.124	0.561
	23.870	3.727	334.017	0.558
UHMWPE/ RGOC-0.1	21.531	4.127	332.715	0.620
	23.946	3.216	280.492	0.662
UHMWPE/ RGOC-0.3	21.527	4.127	303.651	0.679
	23.892	3.724	304.862	0.610
UHMWPE/ RGOC-1	21.535	4.126	412.317	0.500
	23.945	3.716	304.891	0.610
UHMWPE/ RGOC-2	21.54	4.125	368.134	0.560
	23.941	3.717	259.764	0.715



Şekil 6.1. UHMWPE ve kompozitlerin XRD difraktogramı.

6.2. FTIR analiz sonuçları

Katkısız UHMWPE ve UHMWPE/RGOC kompozit örneklerinin FTIR spektrumu Şekil 6.2’de ve aynı örneklerin FTIR spektrumundan elde edilmiş belli fonksiyonel gruplara ait dalga sayısı değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Katkısız UHMWPE’ nin FTIR spektrumunda $2915.92\text{--}2848.69\text{ cm}^{-1}$ dalga sayısında gözlenen iki keskin pik CH gerilim titreşimine aittir. 1463.04 cm^{-1} ve 1261.25 cm^{-1} dalga sayılarında görülen pikler ise CH_2 eğilme ve bükülme titreşimlerine atfedilmektedir (Lusitâneo Pier Macuvele vd., 2019; Meng vd., 2018; Aliyu vd., 2018). 718.47 cm^{-1} dalga sayısında görülen CH_2 sallanma titreşim piki UHMWPE’nin uzun moleküler zinciri ve yüksek derecede polimerizasyonundan kaynaklanmaktadır (Pang vd., 2015). Ağırlıkça % 0.1, % 1.0 ve % 2.0 RGOC ilavesi ile üretilen kompozitlerde $2962.84\text{--}2848.69\text{ cm}^{-1}$, 1463.04 cm^{-1} ve 718.47 cm^{-1} dalga sayılarına ait fonksiyonel gruplara denk gelen piklerin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum yapıya farklı miktarlarda RGOC ilavesinin UHMWPE’nin moleküler yapısı ile dolgu arasındaki etkileşime atfedilmiştir (Wu vd., 2018). Şekil 6.2’de görüldüğü gibi ağırlıkça %0.3 RGOC ilavesi ile elde edilen kompozitin tüm titreşim pikleri hem katkısız polimer hem de diğer kompozitlerle karşılaştırıldığında şiddetlerinin azaldığı görülmüştür. Titreşim piklerinin şiddetindeki azalma mevcut yapıdaki bağların bozulup yeni bağların oluşmasına ve matriks-dolgu arasındaki etkileşimlere bağlı olarak polimer zincirlerinin hareketliliğini etkilemesine atfedilmektedir (Kandhol vd., 2019). Sonuç olarak bu kompozitin yapısında görülen değişimin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerindeki etkileyeceği düşünülmektedir. Katkısız polimerde 1261.25 cm^{-1} dalga sayısında CH_2 bükülme titreşimine ait pikin Şekil 6.9’da görüldüğü gibi ağırlıkça %0.1 RGOC içeriğinde pik tamamen kaybolması, %0.3, %1.0 ve %2.0 RGOC ilavesinde ise pik şiddetlerinin ciddi şekilde azalması RGOC’nin CH_2 grubunun bükülme titreşimini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır. Bu sonuç XRD analiz sonuçlarından da rapor edildiği gibi üretilen kompozitlerde dolgu-matriks etkileşiminin sağlandığı bir kez daha FTIR analiz sonuçlarıyla desteklenmiştir (Çolak vd., 2019).



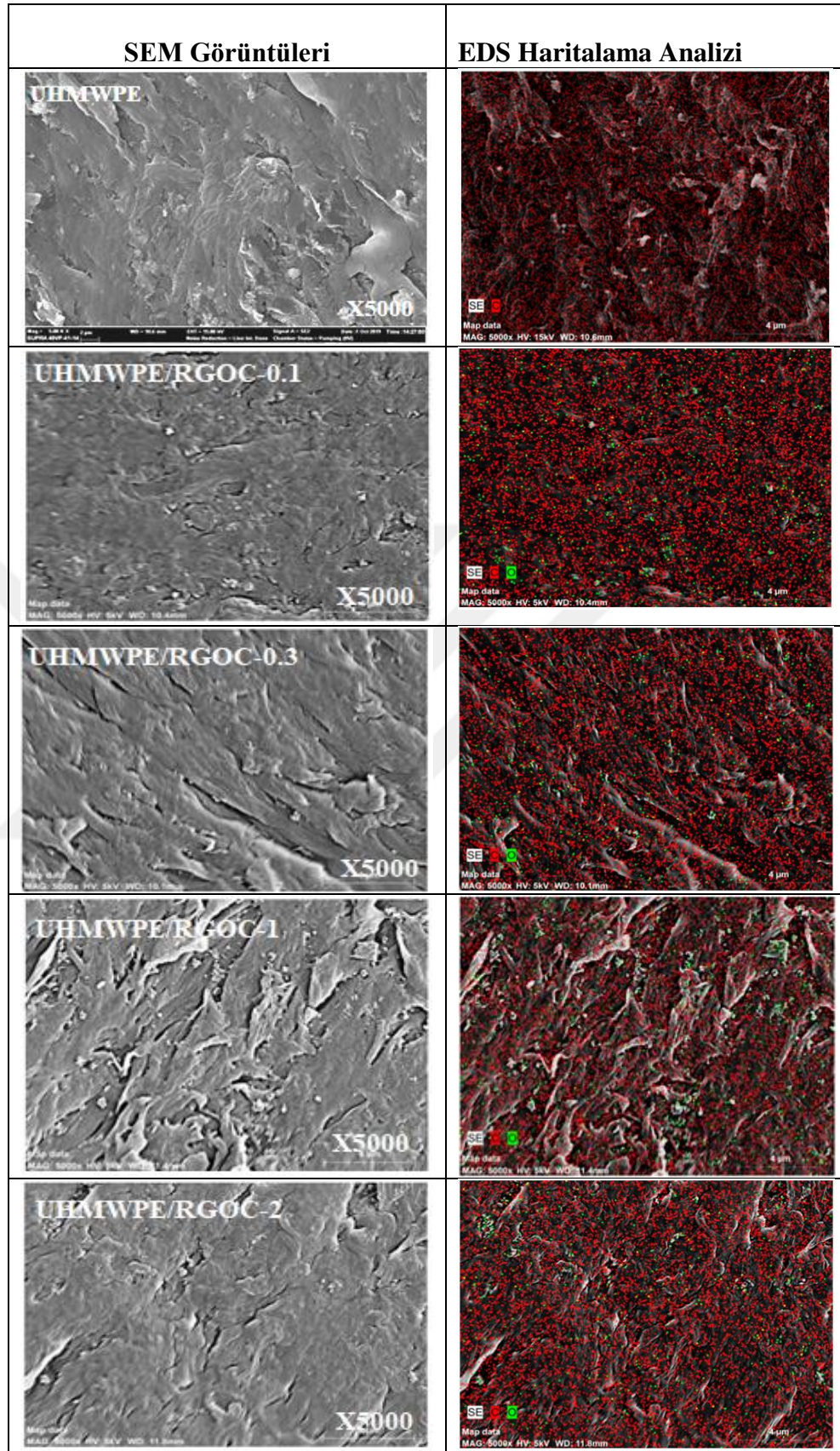
Şekil 6.2. UHMWPE ve kompozitlerin FTIR spektrumu.

Çizelge 6.2. UHMWPE ve kompozitlerin FTIR spektrumundan elde edilen fonksiyonel gruplar ve dalga sayıları.

Örnek	UHMWPE	UHMWPE/ RGOC-0.1	UHMWPE/ RGOC-0.3	UHMWPE/ RGOC-1	UHMWPE/ RGOC-2
Fonksiyonel grup	Dalga Sayısı (cm ⁻¹)				
-CH ₂ asimetrik gerilme titreşimi	2915.92	2915.37	2915.94	2914.97	2914.94
-CH ₂ simetrik gerilme titreşimi	2848.69	2848.17	2848.55	2848.05	2848.08
-CH ₂ eğilme titreşimi	1463.04	1462.79	1463,03	1463.19	1463.16
-CH ₂ bükülme titreşimi	1261.25	-	1261.68	1261.99	1261.87
-CH ₂ sallanma titreşimi	718.47	718.86	718.49	718.34	718.16

6.3. SEM analiz sonuçları

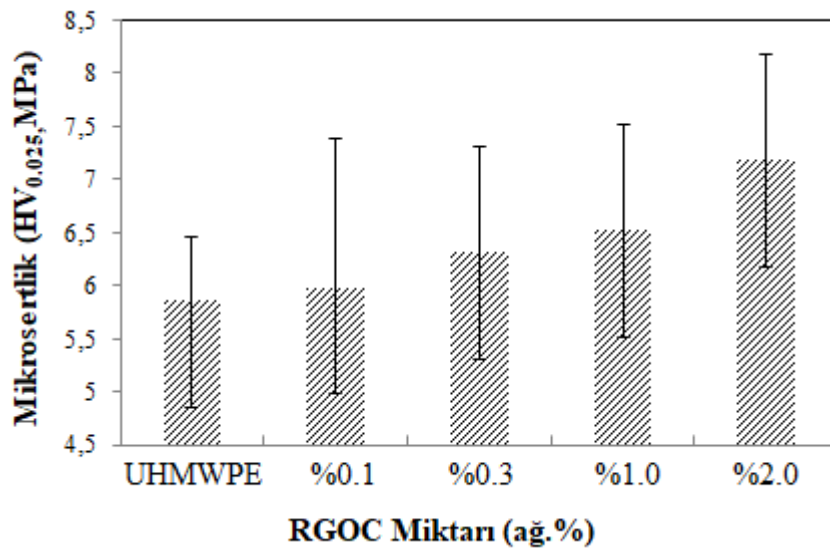
Şekil 6.3’de katkısız UHMWPE ve UHMWPE/RGOC kompozitlerin aynı büyütmede SEM görüntüleri ve EDS haritalama analizleri gösterilmiştir. Katkısız UHMWPE’nin yüzey görüntüsü RGOC içeren tüm kompozitlerle karşılaştırıldığında yüzeyde nispeten düz ancak kırışık görünümlü bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir. Literatürde katkısız UHMWPE’nin SEM analizinde bu çalışma ile benzer şekilde gözlenen görüntü, UHMWPE’nin kristalliğinin düşük ve kristal yapı düzenlenmesinin gevşek olmasına atfedilmiştir (Pang vd. 2018). Ağırlıkça % 1.0 RGOC içeren kompozitin yüzey morfolojisi heterojen şekilde çekirdekleşme bölgelerini açıkça gösteren düzensiz bir yapı sergilemektedir. Grafenin geniş yüzey alanından dolayı kompozitin kristalliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Ağırlıkça %0.1 ve 0.3 RGOC içeriğine sahip olan kompozitlerin yüzey görüntüleri, ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin yüzey görüntüsüne göre ara ara düzensiz bölgeler içermektedir, ancak genellikle daha düz bir morfolojiye sahip oldukları Şekil 6.3’de görülmektedir. Ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitin yüzey görüntüsü ise ağırlıkça % 0.1 ve 0.3 RGOC içeriğine sahip olan kompozitlerin yüzey görüntülerine göre düzensiz, ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin yüzey görüntüsüne göre ise daha düzenli bir morfoloji sergilemiştir. Tüm bu görüntüler düşük RGOC ilavesinin (ağırlıkça %0.1 ve 0.3) polimer zincirlerini sararak kristalliği azalttığı, ağırlıkça %1.0 RGOC ilavesinin çekirdekleşme etkisi yaparak kristalliği artırdığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Ağırlıkça %2.0 RGOC ilavesinde ise yine grafenin polimer zincirlerini bağlayarak kristalliğin azalmasına sebep olan morfolojiyi sunmuş olması ağırlıkça %1.0 RGOC ilavesinin yapının kristalliğini artıran maksimum ilave miktarı olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Düşük RGOC içeriğinde yapının kristalliğinin azaldığı, ağırlıkça %1.0 RGOC içeriğinde ciddi oranda arttığı ve ağırlıkça %2.0 RGOC içeriğinde ise katkısız UHMWPE ile aynı kristallik değerine sahip olduğu Çizelge 6.1’de XRD analiz sonuçlarında verilmiştir. Sonuç olarak her iki analiz sonuçlarının birbirini desteklediği anlaşılmaktadır. Kompozitlerin EDS analizine bakıldığında ise yeşil renkle temsil edilen oksijenli fonksiyonel gruplar içeren RGOC’nin tüm kompozitlerde polimer matrikste homojen dağıldıkları açıkça görülmektedir. Bu sonuç ile XRD analiz sonuçları bir kez daha doğrulanmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.3. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS haritalama analizleri.

6.4. Mikrosertlik analiz sonucu

Katkısız UHMWPE ve UHMWPE/RGOC kompozitlerin mikrosertlik testi sonucu RGOC miktarına karşı elde edilen mikrosertlik değerlerinin grafiği Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Şekil 6.4’de görüldüğü gibi RGOC ilavesi arttıkça kompozitlerin sertlik değerleri de artmıştır. Ağ.%2.0 RGOC ilavesinde katkısız polimere göre sertlik değerinde %22.5 artış sağlanmıştır. SEM analizi bölümünde de tartışıldığı gibi RGOC’nin polimer matrikste homojen dağılımı sayesinde batıcı uca karşı kompozitin gösterdiği direnç bir başka deyişle sertlik artmıştır (Tai vd., 2012). RGOC’nin iki boyutlu yapısı UHMWPE’nin yük taşıma ve transfer etme kapasitesini artırmıştır. RGOC’nin matrikse ilavesi yapının kristalliliğini de değiştirmiştir. UHMWPE’de rijitlik ve sertlik kristalliliğe bağlıdır. Sertlik gibi mekanik özelliklerde ki artış kristalliliğin artışıyla orantılı olduğu literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir (Pang vd., 2018).



Şekil 6.4. Katkısız polimer ve farklı miktarlarda RGOC içeren kompozitlerin mikrosertlik değerleri.

6.5. Aşınma Testi Analiz Sonuçları

6.5.1. Kuru aşınma test sonuçları

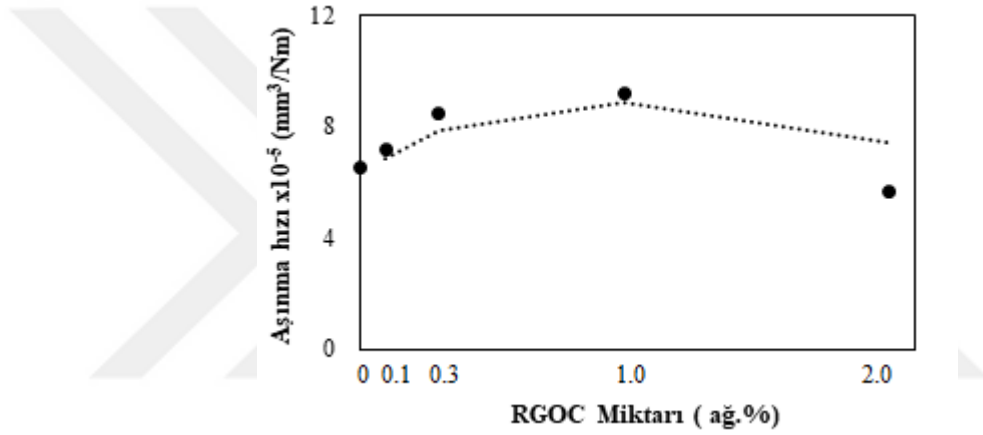
Kuru aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla Şekil 6.5 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir. Şekil 6.5’de görüldüğü gibi aşınma hızı ağ.%1.0 RGOC ilavesinden sonra azalmıştır. Ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozit en düşük aşınma hızı değeri sergilemiştir. Bu durum en yüksek RGOC içeriğinin polimer matriksin aşınma direncini geliştirdiğini göstermiştir. Tai vd.’nin

(2012) nano tabakalı GO ile takviyelendirilmiş UHMWPE kompozitlerin tribolojik davranışlarını inceledikleri çalışmalarında da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Bu sonuçlara göre grafenin yüksek yüzey alanı ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı yük transferini sağlaması ile aşınma hızının azaldığı ifade edilmiştir.

Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi katkısız polimerin sürtünme katsayısı 0.098 bulunmuştur. Bu değer literatürle uyumludur (Baene vd. 2015) ve kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine bakıldığında ağ.%1.0 RGOC içeren kompozit dışında RGOC miktarı arttıkça azalan bir eğilim görülmektedir. RGOC’nin polimer matrikse ilave edilmesiyle sürtünme katsayısının azalması grafenin yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozit katkısız polimere göre düşük sürtünme katsayısı sergilemesine rağmen, ağ.%0.3 ve ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine göre artış gözlemlenmiştir. Bu artışın %1.0 RGOC içeren kompozitin yüksek büyütme aşınmış yüzey görüntüsünde (Şekil 6.12) büyük çatlaklar içeren bölgelerde aşınma ürünlerinin ikinci bir aşındırıcı gibi davranmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Huang vd.,’nin (2016) GO, UHMWPE ile ürettikleri nanokompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında GO’nun yağlayıcı özellik göstermemesi ve sürtünme katsayısındaki artışın karşı malzemenin aşınma prosesi sırasında GO-GO tabakalar arası van der Waals, GO-UHMWPE bağı veya GO düzlemindeki C-C bağlarının oluşturduğu ek yanal kuvvetlere denk gelmesinden kaynaklı olabileceğini rapor etmişlerdir. Ancak bu yorum GO’ nun polimer matrikste iyi dağılmamasının bir sonucu olduğunu düşündürmektedir. Bu çalışmada XRD analiz sonuçlarından (Şekil 6.1) ve EDS elementel haritalama analizinden RGOC’nin polimer matrikste homojen dağıldığı belirlenmiştir. Bu yüzden ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin sürtünme katsayısındaki artışın artan yanal kuvvetten ziyade SEM görüntüsünde görülen aşınma parçalarını ikinci bir aşındırıcı gibi davranmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 6.3. UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma ortamında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

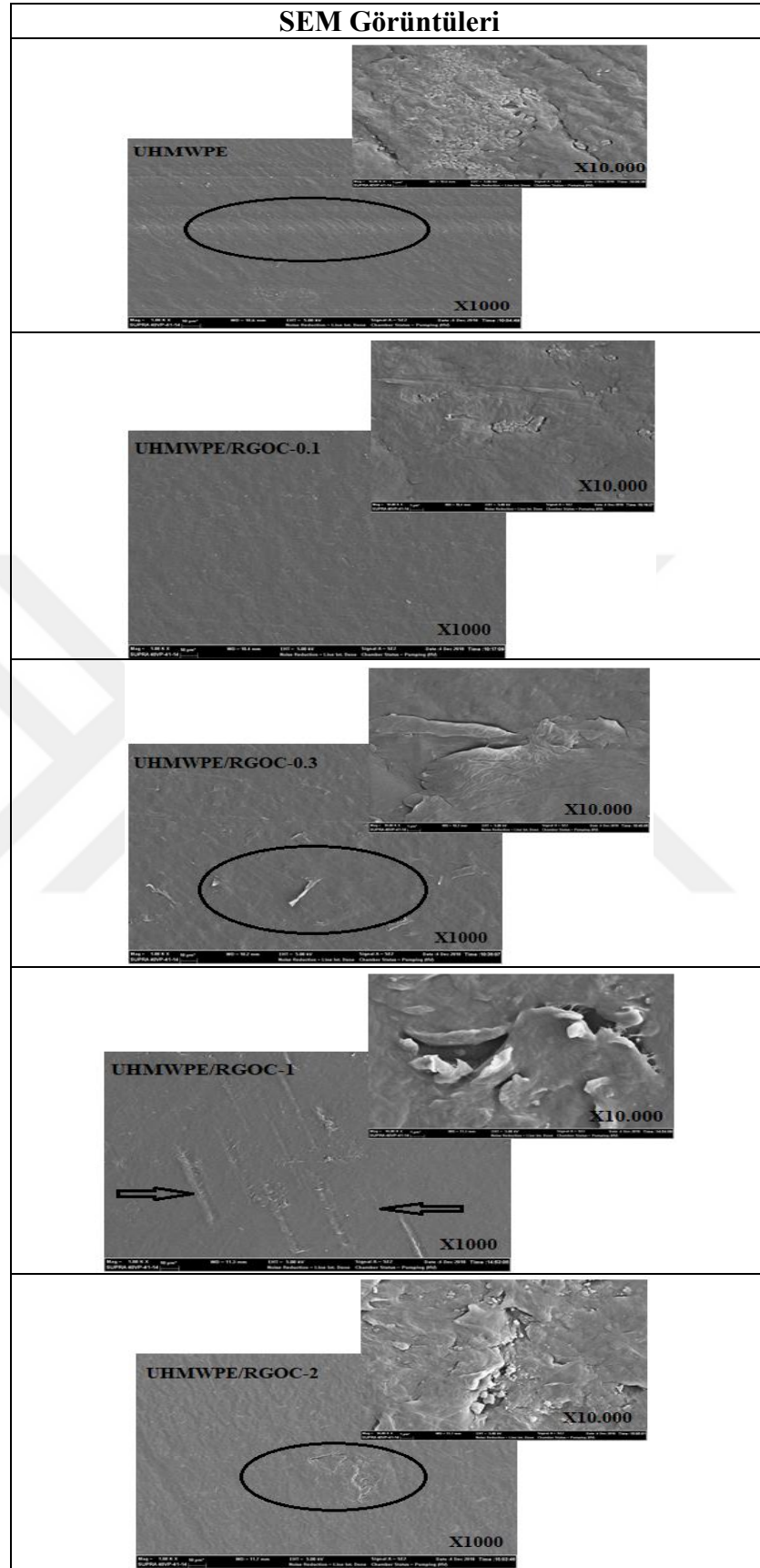
Örnekler	Sürtünme katsayısı
UHMWPE	0.098
UHMWPE/RGOC-0.1	0.068
UHMWPE/RGOC-0.3	0.056
UHMWPE/RGOC-1	0.062
UHMWPE/RGOC-2	0.046



Şekil 6.5. UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma sonucu elde edilen aşınma hızı değerleri.

RGOC ilavesinin kuru ortam aşınma mekanizması üzerindeki etkisini anlamak için üretilen örneklerin aşınma testi sonrası SEM yüzey görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Katkısız polimerin düşük büyütmeli yüzey görüntüsünde yorulma aşınma izleri görülmektedir (Wang vd., 2016). Yüksek büyütmeli SEM görüntüsünde ise oluşan çatlaklarla ortaya çıkan büyük malzeme parçaları, yorulma aşınmasının katkısız polimerde baskın aşınma mekanizması olduğunu göstermektedir (Pang vd., 2018). Ağırlıkça %0.1 RGOC içeren kompozitin yüksek büyütmeli aşınmış yüzey görüntüsü katkısız polimerin yüzey görüntüsüyle karşılaştırıldığında derin çatlakların görülmediği, daha küçük malzeme parçalarının ortaya çıktığı, düşük büyütmeli yüzey görüntüsünde ise yorulma aşınma izlerinin büyük oranda azaldığı Şekil 6.6'da görülmektedir. Bu durum en düşük miktarda RGOC ilavesinde bile yorulma aşınması izlerinin ciddi oranda azaldığını kanıtlamaktadır. Ağırlıkça %0.3 RGOC içeren kompozitin düşük ve

yüksek büyütme yüzey görüntüsünde yorulma aşınmasının mevcut olduğunu göstermektedir (Shahemi vd., 2018). Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin düşük büyütme SEM görüntüsünde kayma yönüne dik mikro delaminasyon izleri yine yorulma aşınmasının mevcut olduğunu göstermiştir. Flannery vd., (2008) diz implantlarında kullanılan UHMWPE'nin aşınma ve sürtünme özelliklerini analiz ettikleri çalışmalarında, polimerin aşınma sonrası yüzey görüntülerinde görünen yorulma aşınması izleri bu çalışmada ağ.%0.3 ve %1.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınmış yüzey görüntüleri ile benzerlik göstermektedir. Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin yüksek büyütme yüzey görüntüsünde ise büyük çatlaklar içeren bölgeler görülmektedir. Bu durum aşınma ürünlerinin ikinci bir aşındırıcı gibi davrandığını düşündürmektedir. Bu sonuç aynı kompozitin sürtünme katsayısındaki artışın da sebebi olabilir (Çizelge 6.3). Ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitin düşük büyütme yüzey görüntüsü katkısız polimer ve diğer kompozitlerin yüzey görüntüsüyle karşılaştırıldığında daha düz bir aşınma yüzeyi sergilemiştir. Yüksek büyütme SEM görüntüsünde ise daha az miktarda aşınma parçaları görülmektedir. Sonuç olarak grafenin geniş yüzey alanına sahip olması RGOC-UHMWPE arasındaki etkileşim alanının genişlettiğinden, RGOC matriks de bağlayıcı bir görev üstlenerek kompozit yüzeylerinin deformasyona uğramasını engellemiştir (Pang vd., 2018). Bu yüzden katkısız polimerin aşınmış yüzeyine göre kompozitlerin aşınmış yüzeyleri daha düz bir görünüm sergilemiştir.



Şekil 6.6. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM yüzey görüntüleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin aşınma testi sonunda karşı malzemenin optik mikroskop ile analiz edilen yüzey görüntüleri Şekil 6.7’de verilmiştir. Katkısız UHMWPE’nin ve ağ.%0.1 ve ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitlerin karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ancak ağ.%0.3 ve ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma parçalarının büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olduğu Şekil 6.7’de açıkça görülmektedir. Özellikle ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin karşı malzeme yüzeyinin birçok bölgesinde aşınma ürünleri yayılmıştır. Bu görüntü kompozitin sürtünme katsayısında ve aşınma hızındaki artışlarla tutarlıdır (Çizelge 6.3 ve Şekil 6.5).



Örnekler	OM Görüntüleri
UHMWPE	 X60
UHMWPE/RGOC-0.1	 X60
UHMWPE/RGOC-0.3	 X60
UHMWPE/RGOC-1	 X60
UHMWPE/RGOC-2	 X60

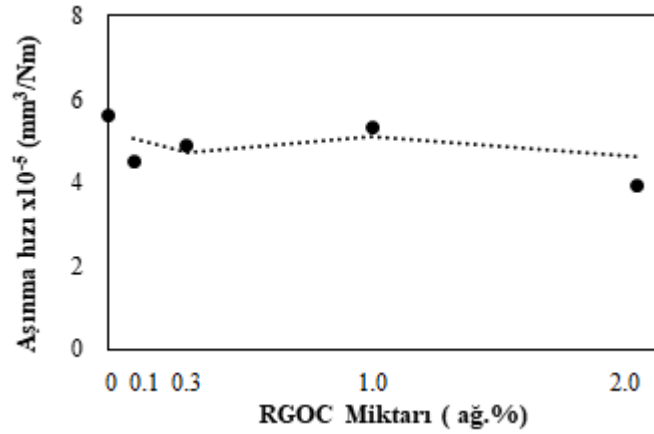
Şekil 6.7. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin kuru aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri.

6.5.2. Saf su ortamında aşınma test sonuçları

UHMWPE ve kompozitlerin saf su aşınma ortamında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 6.4'te, aşınma hızı değerleri de Şekil 6.8'de verilmiştir. Katkısız polimere RGOC ilavesi arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %2.0 RGOC ilave edilen kompozit en düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olmuştur. Sürtünme katsayısındaki ciddi azalma hem saf suyun hem de RGOC'nin yağlayıcı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Grafenin polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir katkı yağlayıcı olduğu kabul edilmektedir (Çolak vd., 2019). Şekil 6.8'de katkısız polimerin ve kompozitlerin aşınma hızı grafiğine bakıldığında katkısız polimere göre en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızına sahip olan ağ.%2.0 RGOC ilave edilerek üretilen kompozitin aşınma hızı %44 azalmıştır. Ciddi oranda gözlenen bu azalma, grafenin polimer matrikste homojen dağılmasıyla elde edilen yük transferindeki iyileşmeye atfedilmektedir (Pang vd., 2018).

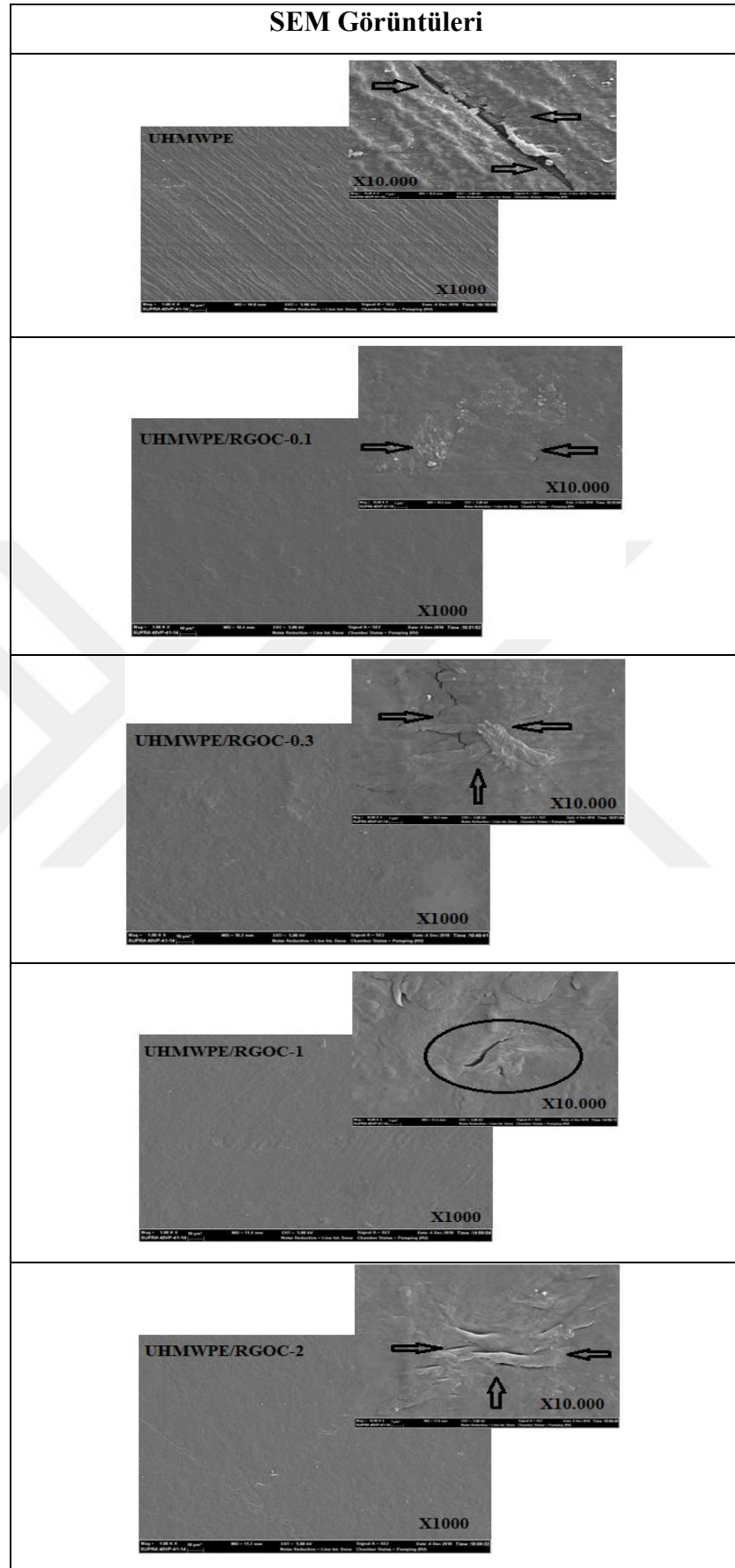
Çizelge 6.4. UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Örnekler	Sürtünme katsayısı
UHMWPE	0.089
UHMWPE/RGOC-0.1	0.074
UHMWPE/RGOC-0.3	0.068
UHMWPE/RGOC-1	0.054
UHMWPE/RGOC-2	0.034



Şekil 6.8. UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri Şekil 6.9’da verilmiştir. Katkısız UHMWPE’nin saf su ortamında yapılan aşınma testi sonucunda ortaya çıkan geniş ve derin oluklu yüzey görüntüsü yorulma aşınmasının baskın olduğunu göstermektedir. Ağırlıkça %0.1 RGOC içeren kompozitin düşük büyütme SEM görüntüsünde oldukça düz, yüksek büyütme yüzey görüntüsünde ise yorulma aşınmasını gösteren az miktarda aşınma ürünleri mevcuttur. Ağırlıkça %0.3, ağ.%1.0 ve ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitlerin düşük büyütme yüzey görüntüleri genel olarak düz ancak hafif dalgalı görüntüler vermiştir. Yüksek büyütme yüzey görüntülerinde ise yorulma aşınmasını gösteren çatlaklar ile adhezif aşınmayı gösteren izler mevcuttur. Sonuç olarak polimer matris RGOC ilave edildikçe, kompozitlerin aşınmış yüzeyleri düzleşmiş, katkısız polimerin yüzeyinde görülen oluklar gözlenmemiştir. Bu durum RGOC ilavesinin yapıda dolgu ile matris arasındaki bağlanmanın oldukça güçlü olduğunu, grafenin aşınma direncini ciddi anlamda artırdığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 6.9. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütmeli SEM yüzey görüntüleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonunda karşı malzemenin optik mikroskop ile analiz edilen yüzey görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozit dışında, katkısız UHMWPE ve diğer kompozitlerin karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ancak ağ .%1.0 RGOC içeren kompozitin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma parçalarının büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olduğu Şekil 6.10'da açıkça görülmektedir. Bu durum Şekil 6.8'de görüldüğü gibi tüm kompozitler içinde en yüksek aşınma hızına sahip olan ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin karşı malzemede en yoğun transfer tabakası gözlenmesi beklenen bir sonuç olmuştur.



Örnekler	OM Görüntüleri
UHMWPE	 X60
UHMWPE/RGOC-0.1	 X60
UHMWPE/RGOC-0.3	 X60
UHMWPE/RGOC-1	 X60
UHMWPE/RGOC-2	 X60

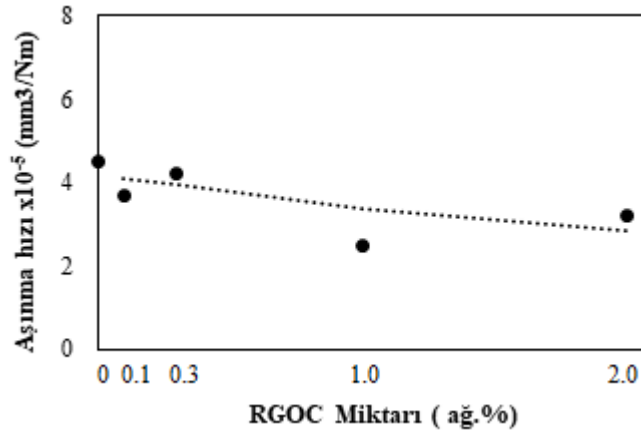
Şekil 6.10. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin saf su ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri.

6.5.3. Serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma test sonuçları

UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 6.5’de aşınma hızı değerleri de Şekil 6.11’de verilmiştir. Çizelge 6.5’de görüldüğü gibi ağ.%1.0 RGOC ilave edilen kompozit en düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olmuştur. Sürtünme katsayısındaki ciddi azalma hem serum fizyolojik çözeltisi ortamının hem de RGOC’nin matrikste homojen dağılımından dolayı yağlayıcı özellik göstermelerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 6.11’de katkısız polimerin ve kompozitlerin aşınma hızı grafiğine bakıldığında katkısız polimere göre en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızına sahip olan ağ.%1.0 RGOC ilave edilerek üretilen kompozitin aşınma hızı %80 azalmıştır. Ciddi oranda gözlenen bu azalmanın kompozitteki yüksek RGOC içeriği nedeniyle yüzeyi tamamen kaplayan karbonca zengin bir tribofilm oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Gutierrez-Mora vd. (2017) nin alümina bazlı grafen ve karbon nanofiber kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını inceledikleri çalışmalarında da elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 6.11’de görüldüğü gibi ağ.%1.0 RGOC ilave edilerek üretilen kompozit dışında diğer kompozitlerin aşınma hızları birbirine yakın görünmektedir. Çizelge 6.5’de verilen ağ.%0.3 RGOC ve ağ.%2.0 RGOC sürtünme katsayısındaki artış ile aşınma hızlarındaki artış birbirini destekleyen sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

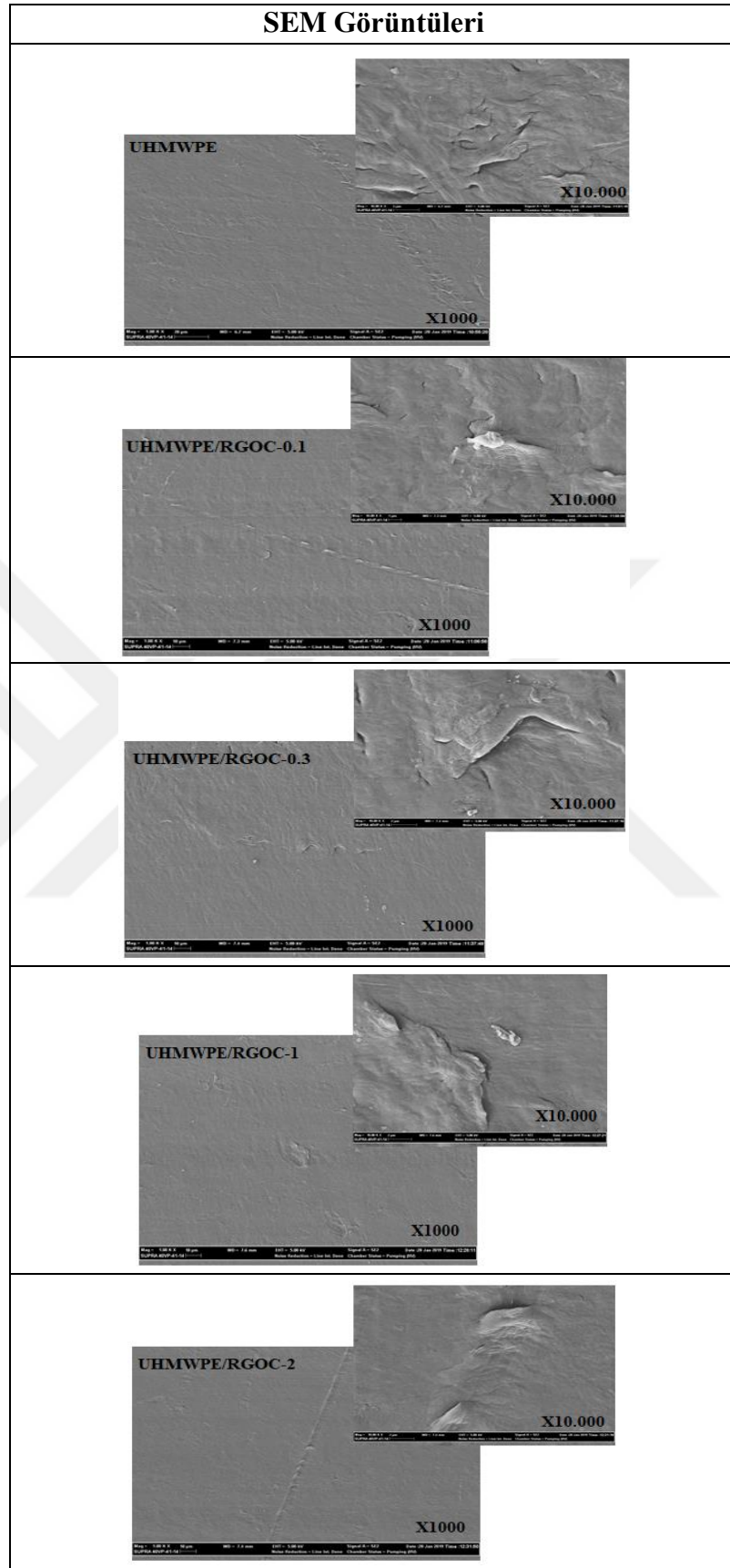
Çizelge 6.5. UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Örnekler	Sürtünme katsayısı
UHMWPE	0.085
UHMWPE/RGOC-0.1	0.072
UHMWPE/RGOC-0.3	0.120
UHMWPE/RGOC-1	0.036
UHMWPE/RGOC-2	0.166



Şekil 6.11. UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Katkısız UHMWPE’nin serum fizyolojik çözeltisi ortamında yapılan aşınma testi sonucunda düşük büyütme yüzey görüntüsü düz iken, yüksek büyütme yüzey görüntüsü büyük miktarda adhezif ve bazı bölgelerde görülen çatlaklar yorulma aşınmasının baskın mekanizmalar olduğunu göstermektedir. Ağırlıkça %0.1 ve ağ.%0.3 RGOC içeren kompozitlerin düşük büyütme SEM görüntülerinde adhezif aşınma izleri belirgin, yüksek büyütme yüzey görüntülerinde ise yorulma aşınmasını gösteren izler her iki kompozit örneğinin yüzeyinde görünmesine rağmen ağ.%0.3 RGOC içeren kompozitte daha şiddetli olduğu açıktır. Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin düşük büyütme yüzey görüntüsü genel olarak düzdür ancak adhezif aşınma izleri mevcuttur. Yüksek büyütme yüzey görüntülerinde ise yine yorulma aşınması izlerine rastlanmaktadır. Ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri adhezif aşınmanın baskın olduğu göstermektedir. Sonuç olarak polimer matrikse RGOC ilave edildikçe, özellikle ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitte yorulma aşınmasının önlendiği yalnızca adhezif aşınmanın görüldüğü belirlenmiştir. Sonuç olarak, grafinin kompozitlerin tribolojik performanslarında pozitif bir rol oynadığı anlaşılmıştır.



Şekil 6.12. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütmeli SEM görüntüleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonunda karşı malzemenin optik mikroskop ile analiz edilen yüzey görüntüleri Şekil 6.13’de verilmiştir. Ağ.%0.1 ve ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitler ve katkısız UHMWPE karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturmuştur. Ancak ağ.%0.3 ve ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma parçalarının büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olduğu Şekil 6.13’de açıkça görülmektedir. Bu durum Çizelge 6.5 ve Şekil 6.11’de görüldüğü gibi bu kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerlerindeki artış ile uyumluluk göstermektedir. Gisper vd.’nin (2006) farklı yağlayıcı ortamlarda UHMWPE’nin sürtünme ve aşınma mekanizmalarını inceledikleri çalışmalarında düşük viskoziteli protein içermeyen yağlayıcı ortamda karşı malzeme yüzeyine daha fazla polimerik filmin aktarılmasından dolayı sürtünme katsayısının arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada da benzer sonuç elde edilmiştir. Çünkü serum fizyolojik çözeltisi protein içermeyen düşük viskoziteye sahip özellikte olduğu bilinmektedir.

Örnekler	OM Görüntüleri
UHMWPE	 X60
UHMWPE/RGOC-0.1	 X60
UHMWPE/RGOC-0.3	 X60
UHMWPE/RGOC-1	 X60
UHMWPE/RGOC-2	 X60

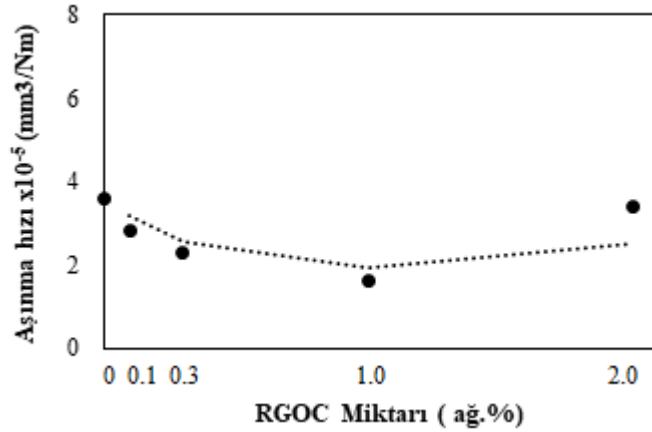
Şekil 6.13. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri.

6.5.4. Hank sıvısı ortamında aşınma test sonuçları

UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 6.6’da, aşınma hızı değerleri de Şekil 6.14’de verilmiştir. Çizelge 6.6’da görüldüğü gibi ağ.%1.0 RGOC ilave edilen kompozit, en düşük sürtünme katsayısı değerine sahip olmuştur. Sürtünme katsayısındaki ciddi azalma RGOC’nin matrikste homojen dağılımından dolayı yağlayıcı özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır (Zai vd., 2019). Şekil 6.14’den aşınma hızı değerlerine bakıldığında ağ.%1.0 RGOC ilave edilen kompozite kadar aşınma hızı değerlerinin azaldığı, ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitin aşınma hızında bir artış gözlenmiştir. Ancak tüm kompozitlerin aşınma hızı değerleri katkısız polimere göre düşük olduğu belirlenmiştir. Grafenin iki boyutlu yapısı ve polimer matrikste iyi dağılımı sayesinde dolgu ve polimer matriks arasındaki gerilimi transfer edebilme kabiliyeti sayesinde aşınma hızı azalmıştır (Vadivel vd., 2018).

Çizelge 6.6. UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Örnekler	Sürtünme katsayısı
UHMWPE	0.098
UHMWPE/RGOC-0.1	0.106
UHMWPE/RGOC-0.3	0.136
UHMWPE/RGOC-1	0.070
UHMWPE/RGOC-2	0.134

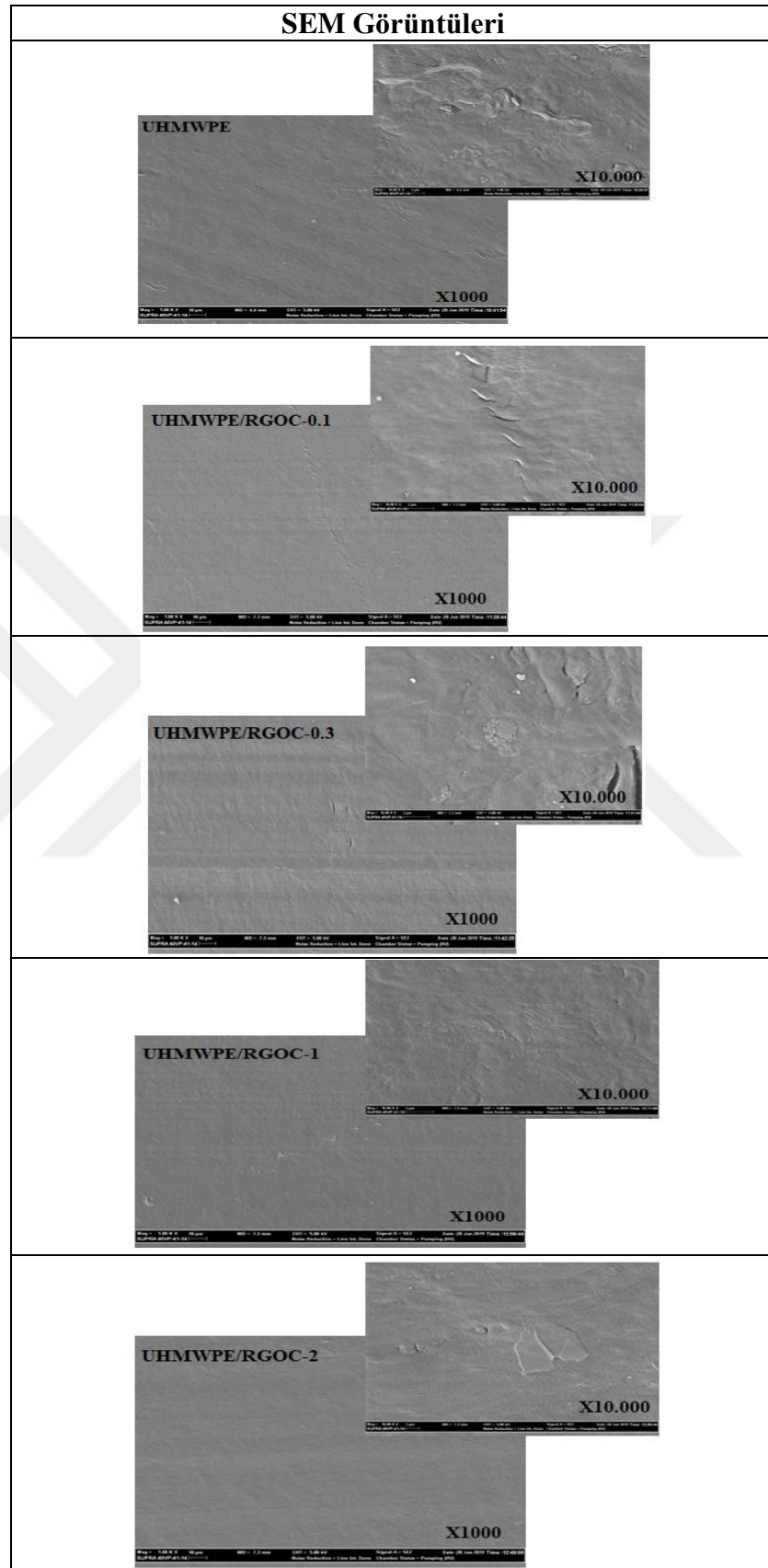


Şekil 6.14. UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası elde edilen aşınma hızı değerleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri Şekil 6.15’de verilmiştir. Katkısız UHMWPE’ nin Hank sıvısı ortamında yapılan aşınma testi sonucunda düşük büyütme yüzey görüntüsü düz iken, yüksek büyütme yüzey görüntüsü büyük miktarda yorulma aşınması izlerini göstermektedir. Ağırlıkça %0.1 RGOC içeren kompozitin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntülerinde yorulma aşınmasını gösteren çatlaklar mevcuttur. Ağırlıkça %0.3 RGOC içeren kompozitin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüsünde ise kayma yönüne dik ağ.%0.1 RGOC içeren kompozitin görüntülerine göre daha büyük çatlaklar açıkça görülmektedir. Bu görüntü ağ.%0.3 RGOC içeren kompozitin sürtünme katsayısındaki artışla uyumlu sonuç vermektedir. Ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitin düşük ve yüksek büyütme yüzey görüntülerinde yorulma aşınmasının ciddi oranda azaldığını gösteren çok küçük izler mevcutken, çatlaklara rastlanılmamıştır. Bu görüntüler aynı kompozitin diğer kompozitlere nazaran en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri ile tutarlı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntülerinde aynı kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerlerindeki artışla (Çizelge 6.6 ve Şekil 6.14) paralel olarak büyük bir parçanın yüzeyden koparak uzaklaştığını gösteren görüntü mikro delaminasyon ile yorulma aşınmasının baskın olduğu göstermektedir (Şekil 6.15). Kapps vd. (2019) UHMWPE’ nin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada, yorulma aşınması mekanizmasından kaynaklanan delaminasyon aşınması izinin kayma yönüne dik yönelmesi, yarı kristal yapıya sahip olan polietilenin polimer zincirleri arasındaki zayıflamış bölgede oluşan yüzey çatlaklarının yayılmasına atfedilmiştir. Sonuç olarak ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin

aşınmış yüzey görüntüsünde ciddi oranda yorulma aşınmasının azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar aynı kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi sıvısı ortamındaki aşınma sonucundan elde edilen yüzey görüntüleriyle karşılaştırıldığında aşınma yüzeylerindeki büyük adhezif aşınma izlerinin gözlemlenmediği, yorulma aşınmasının baskın olduğu belirlenmiştir.





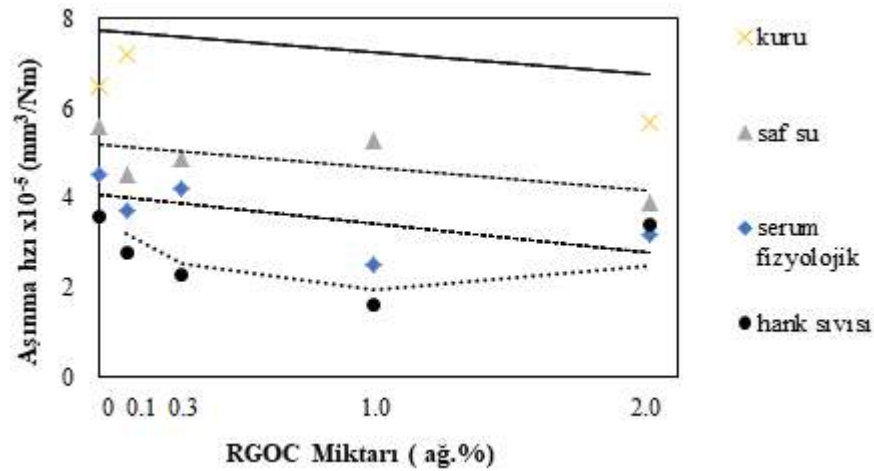
Şekil 6.15. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri.

Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonunda karşı malzemenin optik mikroskop ile analiz edilen yüzey görüntüleri Şekil 6.16'da verilmiştir. Ağırlıkça %0.1 ve ağırlıkça %1.0 RGOC içeren kompozitler ve katkısız UHMWPE' nin karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturmuştur. Ancak ağırlıkça %0.3 ve ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma parçalarının büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olduğu Şekil 6.16'da açıkça görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %2.0 RGOC içeren kompozitin alümina bilye yüzeyinde ciddi miktarda görülen birikmiş malzeme, aynı kompozitin aşınmış yüzey görüntüsünde (Şekil 6.15) kopan parçalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü hidrofobik yüzeye sahip olan kompozitten ziyade karşı malzeme olarak kullanılan ve hidrofilik özellikli alümina etrafında daha fazla sıvı toplandığı için kopan aşınma ürünleriyle birlikte görüntü vermesi beklenen bir sonuçtur (Şekil 6.16) (Pawlak vd., 2011).

Örnekler	OM Görüntüleri
UHMWPE	 X60
UHMWPE/RGOC-0.1	 X60
UHMWPE/RGOC-0.3	 X60
UHMWPE/RGOC-1	 X60
UHMWPE/RGOC-2	 X60

Şekil 6.16. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin Hank sıvısı ortamında aşınma testi sonrası karşı malzeme yüzeyinin OM görüntüleri.

UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testleri sonrası elde edilen aşınma hız değerleri Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil 6.17’de görüldüğü gibi en yüksek aşınma hızı değerleri kuru ortamında yapılan aşınma testi sonucunda elde edilmiştir. Kuru aşınma sonucunda elde edilen yüzey görüntüleri diğer ortamlarda yapılan aşınma testi sonrası yüzey görüntüleri ile karşılaştırıldığında aşınma yüzeylerinde ciddi oranda görülen deformasyon aşınma hızının neden en yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Çünkü sulu ortamının soğutma etkisi ile sürtünme ısısı azalır, kuru ortamda oluşan yüksek sürtünme ısısı kompozitlerin kayma yüzeyini yumuşatır, şiddetli adhezif aşınma ve belirgin yorulma çatlaklarına yol açtığından kuru ortamda daha yüksek deformasyon oranı ile karşılaşmıştır (Pang vd., 2015). Sıvı ortamlarında görülen aşınma hızı sonuçları karşılaştırıldığında ise sırasıyla en yüksek aşınma hızı saf su, serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları ortamlarında gözlenmiştir. Tüm sıvı ortamlarında aşınmış yüzey görüntüleri karşılaştırıldığında yorulma aşınmasını gösteren çatlakların aynı sırada azalması aşınma hızında ki azalma ile tutarlı sonuçlar vermiştir.



Şekil 6.17. UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testleri sonrası elde edilen aşınma hız değerleri.

UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir. Çizelge 6.7’de görüldüğü gibi en düşük sürtünme katsayısı değerleri saf su ortamında görülmüştür. Saf su ortamında yapılan aşınma testi sonuçları ile karşılaştırıldığında, Hank sıvısı ve serum fizyolojik çözeltisi ortamlarında aşınma hızının düşük sürtünme katsayısının fazla olmasının sebebi Hank ve serum fizyolojik çözeltilerinin yüzey ıslatma kabiyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Pang vd. (2018) UHMWPE’ye GO ilave ederek ürettikleri kompozitlerin aşınma davranışlarını kuru, saf su ve deniz suyu ortamlarında inceledikleri çalışmada deniz suyunun saf suya göre daha iyi yağlayıcılık özelliği gösterdiğini rapor etmişlerdir. Deniz suyunun düşük temas açısının kompozit yüzeyinin ıslatılabilirliğini saf suya göre artırdığı için karşı malzeme (paslanmaz çelik) ile kompozit yüzeyi arasında bir sıvı film tabakası oluştuğunu ve bu tabakanın yağlayıcılık etkisini artırdığı ifade edilmiştir. Ancak bu çalışmada karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 ’ün hidrofilik yapısı nedeniyle üzerinde biriken aşınma ürünlerinin Hank ve serum fizyolojik çözeltisi ortamlarında sürtünme katsayısını artırdığı düşünülmektedir.

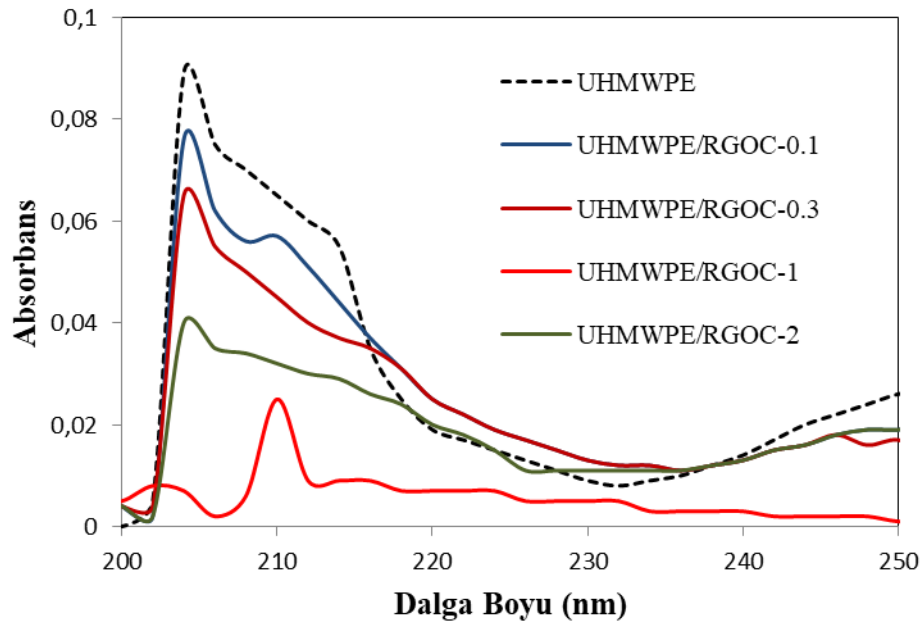
Ayrıca ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin sürtünme katsayısı değerleri hariç serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvısı ortamlarına göre kuru ortamda sürtünme katsayısı değerleri daha düşük değerler sergilemiştir. Bu durum grafenin yüksek termal iletkenliğine atfedilebilir. Çünkü yüksek termal iletkenliğe sahip olan grafen sürtünme sırasında oluşan ısıyı bulunduğu bölgeden kolaylıkla transfer edebileceğinden aşınmaya karşı direncin artabileceği sonucunu ortaya koymaktadır. Tüm ortamlarda aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerlerine bakıldığında ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin en düşük değerleri verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin XRD ve mikrosertlik analiz sonuçlarından da en yüksek kristallığe ve yüksek sertliğe sahip olması aşınma özelliklerine büyük ölçüde etki etmiştir. Çünkü Baena vd. (2015) ve Karuppiyah vd. (2008) yaptıkları çalışmalarda kristallik derecesinin artmasıyla aşınma direncinin arttığını rapor etmişlerdir. Pang vd. (2018) yaptıkları çalışmada ise artan kristallığın ve sertliğin malzemenin aşınma davranışları üzerinde olumlu etki yarattığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.7. UHMWPE ve kompozitlerin farklı ortamlarda aşınma testi sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Yağlayıcı Ortamlar	Sürtünme katsayısı				
	UHMWPE	UHMWPE/ RGOC-0.1	UHMWPE/ RGOC-0.3	UHMWPE/ RGOC-1.0	UHMWPE/ RGOC-2.0
Kuru	0.098	0.068	0.056	0.062	0.046
Saf su	0.089	0.074	0.068	0.054	0.034
Serum fizyolojik	0.085	0.072	0.120	0.036	0.166
Hank sıvısı	0.098	0.106	0.136	0.070	0.134

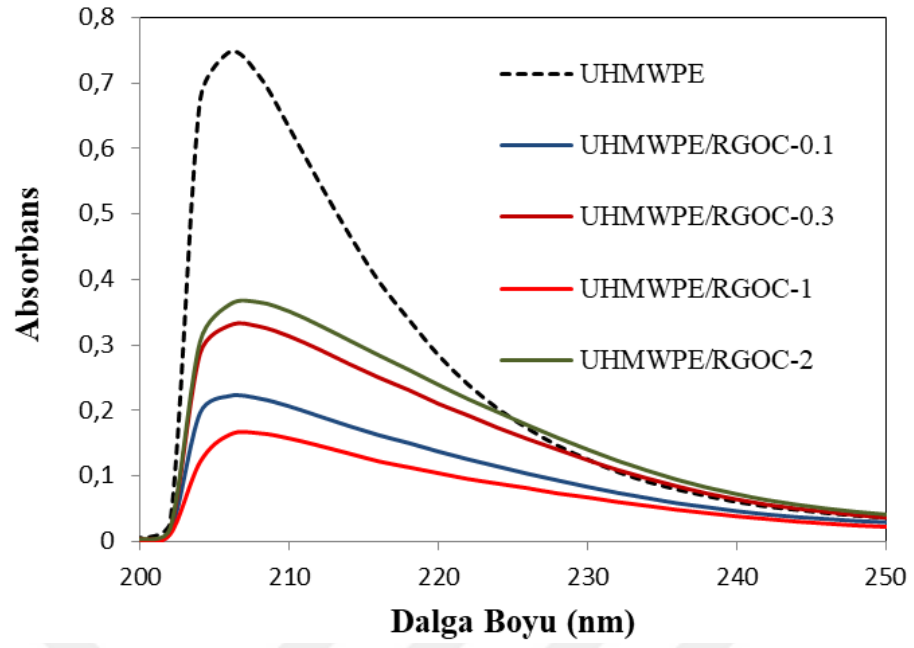
6.6. UV-Vis Spektroskopi Analiz Sonuçları

Ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopi bir ışın demetinin bir örnekten geçtikten sonraki azalmasının ölçülmesidir. Işığın şiddetinin azalması çözeltide bulunabilecek asılı taneciklerinin yol açtığı saçılmalar ile absorplamanın arttığını göstermektedir. Bu çalışmada serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları içerisinde yapılan aşınma deneyi sonucunda ortaya çıkan aşınma ürünlerinin miktarını belirlemek için UV-Vis analizi kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 6.18 ve 6.19’da sırasıyla serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları içerisindeki aşınma ürünlerinin UV-Vis spektrumu verilmiştir. Şekil 6.18’de görüldüğü gibi serum fizyolojik çözeltisi ortamında katkısız UHMWPE’nin en yüksek absorbans değerini verdiği, sonra sırasıyla ağ.%0.1, 0.3, 2.0 ve 1.0 RGOC içeren kompozitlerin aynı dalga boyunda gösterdikleri giderek azalan absorbans değerleri görülmektedir. Bu sonuç serum fizyolojik çözeltisi ortamında en az aşınma ürününün %1.0 RGOC içeren kompozite ait olduğunu göstermektedir. Aynı kompozitlerin serum fizyolojik çözeltisi ortamındaki aşınma kaybı değerleri ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Serum fizyolojik çözeltisinde bulunan aşınma ürünlerinin UV-Vis spektrumu.

Şekil 6.19’da Hank sıvısı ortamında yapılan aşınma deneyi sonrasında sıvı içerisindeki aşınma ürünlerinin aynı dalga boyunda verdikleri absorbanslar görülmektedir. En yüksek absorbansa sahip olan katkısız UHMWPE en fazla aşınma ürünü sunmuştur. Kompozitler içerisinde ise en düşük absorbans gösteren ağ.%1.0 RGOC içeren kompozit olurken, en yüksek absorbans gösteren ağ.%2.0 RGOC içeren kompozit olduğu Şekil 6.19’dan görülmektedir. Bu sonuç aynı ortamda kompozitlerin aşınma hızı değerleriyle büyük ölçüde uyumluluk göstermektedir. Aşınma ürünlerinin UV-Vis analizi ile bu çalışmadaki gibi aşınma hızı ile ilişki kurarak desteklendiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Mindivan, 2018).



Şekil 6.19. Hank sıvısında bulunan aşınma ürünlerinin UV-Vis spektrumu.

7.SONUÇLAR

Farklı ağ.% RGOC içeriğinde üretilen UHMWPE kompozitlerin mikroyapısal özellikleri ve kuru, saf su, serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvısı ortamlarında yapılan aşınma testleri sonucunda tribolojik davranışlarının incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- XRD analiz sonucuna göre, RGOC ilavesinin polimerin kristal yapısını değiştirdiği ve difraktogramda grafene ait ilave bir pikin gözlenmemiş olması da dolgunun matriks içerisinde homojen dağıldığını göstermiştir. Düşük RGOC içeriğinde (ağ.%0.1 ve 0.3) yapının kristalliğinin azaldığı, ağ.%1.0 RGOC içeriğinde ciddi oranda arttığı ve ağ.%2.0 RGOC içeriğinde ise katkısız UHMWPE ile aynı kristallik değerine sahip olduğu yine aynı analiz sonucundan belirlenmiştir. Sonuç olarak %1.0 RGOC ilavesi yapının kristalliğini artıran maksimum ilave miktarı olduğu ortaya çıkmıştır.
- FTIR analizi sonuçlarına göre, farklı miktarlarda RGOC ilavesi ile farklı titreşim piklerinin şiddetinde azalma ve artışlar görülmüştür. Bu durum mevcut yapıdaki bağların bozulup yeni bağların oluşmasına ve matriks-dolgu arasındaki etkileşimlere bağlı olarak polimer zincirlerinin hareketliliğine atfedilmiştir.
- Ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin heterojen şekilde kristalleşme bölgelerini içeren düzensiz bir morfolojiye sahip olduğu SEM analizi ile görülmüştür. Kompozitlerin EDS analizine göre oksijenli fonksiyonel gruplar içeren RGOC'nin tüm kompozitlerde polimer matrikste homojen dağıldıkları açıkça görülmüştür.
- RGOC ilavesi arttıkça kompozitlerin mikrosertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Ağ.%2.0 RGOC ilavesinde katkısız polimere göre sertlik değerinde %22.5 artış sağlanmıştır. Bu artış RGOC'nin polimer matrikste homojen dağılımı ve iki boyutlu yapısı sayesinde yük taşıma ve yükü transfer etme kapasitesinin artarak, batıcı uca karşı gösterilen direncin artmasına sebep olduğu belirlenmiştir.
- Kuru aşınma testi sonucunda; ağ.%2.0 RGOC içeren kompozit en düşük aşınma oranı ve aşınma hızı değeri sergilemiştir. RGOC'nin polimer matrikse ilave edilmesiyle sürtünme katsayısının azalması grafenin yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmıştır. Aşınmış yüzey görüntüleri yorulma aşınmasının katkısız polimerde baskın mekanizma olduğunu, RGOC ilavesi ile yorulma aşınma izlerinin büyük oranda azaldığını göstermiştir. Aşınma testi sonucunda karşı malzeme yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri kompozitin sürtünme katsayısında ve aşınma hızındaki değişimle tutarlı sonuçlar göstermiştir.

- Saf su ortamında yapılan aşınma testi sonucu katkısız polimere RGOC ilavesi arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki ciddi azalma hem saf suyun hem de RGOC'nin yağlayıcı özelliklerine atfedilmiştir. Katkısız polimere göre ağ.%2.0 RGOC ilave edilerek üretilen kompozitin aşınma hızı %44 azalmıştır. Ciddi oranda gözlenen bu azalma, grafenin polimer matrikste homojen dağılmasıyla elde edilen yük transferindeki iyileşmeden kaynaklanmıştır. Katkısız UHMWPE'nin ve ağ.%0.1 RGOC içeren kompozitin saf su ortamında yapılan aşınma testi sonucunda elde edilen yüzey görüntülerinde yorulma aşınmasının baskın mekanizma olduğu ve ağ.%0.3, 1.0 ve 2.0 RGOC içeren kompozitlerde ise hem yorulma hem de adhezif aşınmanın gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum RGOC ilavesi ile dolgu-matriks arasındaki bağlanmanın güçlü olduğunu, grafenin aşınma direncini ciddi anlamda artırdığını ortaya çıkarmıştır. Ağ.%1.0 RGOC içeren kompozit haricinde tüm kompozitler karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluştururken, en yüksek aşınma hızına sahip olan ağ.%1.0 RGOC içeren kompozit ise karşı malzemede en yoğun transfer tabakası gözlenmesine sebep olmuştur.
- Serum fizyolojik çözeltisi ortamında yapılan aşınma testi sonucunda, katkısız polimere göre en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olan ağ.%1.0 RGOC ilave edilerek üretilen kompozitin aşınma hızı %80 azalmıştır. Ciddi oranda gözlenen bu azalmanın kompozitteki yüksek RGOC içeriği nedeniyle yüzeyi tamamen kaplayan karbonca zengin bir tribofilm oluşumundan kaynaklanmıştır. Katkısız UHMWPE, ağ.%0.1, 0.3, 1.0 RGOC içeren kompozitlerin serum ortamında yapılan aşınma testi sonucunda büyük miktarda adhezif ve yorulma aşınmasının baskın mekanizmalar olduğu belirlenmiştir. Ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitte ise yorulma aşınmasının önlendiği yalnızca adhezif aşınmanın görüldüğü belirlenmiştir. Ağ.%0.1 ve ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitler ve katkısız UHMWPE'nin karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturduğu, ancak ağ.%0.3 ve 2.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma ürünlerinin büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olması, bu kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerlerindeki artış ile uyumluluk göstermiştir.
- Hank sıvısı ortamında yapılan aşınma testi sonucunda ağ.%1.0 RGOC ilave edilen kompozitin en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Grafenin iki boyutlu yapısı ve polimer matrikste iyi dağılımı ve dolgu-polimer matriks arasındaki gerilimi transfer edebilme kabiliyeti sayesinde aşınma hızı azalmıştır. Katkısız UHMWPE, ağ.%0.1 ve 0.3 RGOC içeren kompozitler yorulma

aşınmasının ve çatlakların mevcut olduğu bir yüzey görüntüsü, ağ.% 1.0 RGOC içeren kompozitin çatlaksız, yorulma aşınması izlerinin büyük oranda azaldığı, ağ.% 2.0 RGOC içeren kompozitin yüzey görüntüsünde ise büyük bir parçanın koptuğu yani mikrodelenimasyona bağlı yorulma aşınmasının mevcut olduğu açıkça görülmüştür. Ağırlıkça %0.1 ve ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitler ve katkısız UHMWPE'nin karşı malzeme yüzeyinde çok ince bir transfer tabakası oluşturduğu, ancak ağ.%0.3 ve ağ.%2.0 RGOC içeren kompozitlerin aşınma testi sırasında ortaya çıkan aşınma ürünleri büyük ölçüde karşı malzeme yüzeyine transfer olmuştur. Hidrofilik özellikli Al_2O_3 'ün etrafında daha fazla sıvı toplandığı için özellikle ağ.%2.0 RGOC içeren kompozit yüzeyinden kopan aşınma ürünleriyle birlikte görüntü vermiştir.

- Kuru, saf su, serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları ortamlarında yapılan aşınma testlerinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri karşılaştırıldığında, en düşük sürtünme katsayısı değerleri saf su ortamında, en düşük aşınma hızı değerleri ise Hank sıvısı ortamında olduğu belirlenmiştir. Serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları ortamlarında yapılan aşınma testleri sonuçları, saf su ortamında yapılan aşınma testi sonuçları ile karşılaştırıldığında, Hank ve serum fizyolojik çözeltisi ortamlarında aşınma hızının düşük, sürtünme katsayısının fazla olmasının sebebi, Hank ve serum fizyolojik çözeltilerinin yüzey ıslatma kabiyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Bunun yanında serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvısı ortamlarına göre, kuru ortamda yüksek aşınma hızı ve düşük sürtünme katsayısı değerleri gözlenmiştir. Bu durum grafenin yüksek termal iletkenliğine atfedilmiştir. Çünkü yüksek termal iletkenliğe sahip olan grafen sürtünme sırasında oluşan ısıyı bulunduğu bölgeden kolaylıkla transfer edebilmektedir.
- Tüm ortamlarda aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerlerine bakıldığında ağ.%1.0 RGOC içeren kompozitin en iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu kompozitin diğer analizlerden elde edilen sonuçlarına göre yüksek kristallığe ve sertliğe sahip olmasının aşınma özellikleri üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu belirlenmiştir.
- Serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvıları içerisinde yapılan aşınma testleri sonucunda ortaya çıkan aşınma ürünlerinin miktarını belirlemek için yapılan UV-Vis analizi ile serum fizyolojik çözeltisi ve Hank sıvısı ortamlarında en az aşınma ürününün ağ.%1.0 RGOC içeren kompozite ait olduğu belirlenmiştir. Bulunan bu sonuçlar aynı ortamlarda kompozitlerin aşınma hızı değerleriyle büyük ölçüde uyumluluk göstermiştir.

8.ÖNERİLER

- Çalışmada üretilen kompozitlerin aşınma testlerinde karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilye yerine paslanmaz çelik veya CoCr bilyeler kullanılarak aşınma davranışları incelenebilir. Karşı malzemenin seramik veya metal olması aşınma mekanizmasını değiştirebilir.
- Üretilen kompozitlerin aşınma testleri bu çalışmada kullanılan yağlayıcı ortamlar dışında farklı türden sıvı ortamlarda gerçekleştirilebilir.
- Aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma ürünlerinin antimikrobiyal ve doku uyum testleri yapılabilir. Böylece ortamda kalan aşınma ürünlerinin biyouyumluluğu test edilebilir.
- Üretilen kompozitler farklı karakterizasyon yöntemleri ile analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelbary, A. (2015). *Wear of Polymers and Composites*. Elsevier Limited, USA, 1-36.
- Ahmad, M., Uzir Wahit, M., Rafiq Abdul Kadir, M., & Zaman Mohd Dahlan, K. (2012). Mechanical, rheological, and bioactivity properties of ultra high-molecular-weight polyethylene bioactive composites containing polyethylene glycol and hydroxyapatite. *The Scientific World Journal*, 1-13.
- Alam F., Choosri, M., Gupta, T. K., Varadarajan, K.M., Choi, D., & Kumar, S. (2019). Electrical, mechanical and thermal properties of graphene nanoplatelets reinforced UHMWPE nanocomposites. *Materials Science & Engineering B*, 241, 82-91.
- Aliyu, I. K., Mohammed, A. S., & Al-Qutub A. (2018). Tribological Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Nanocomposites Reinforced with Graphene Nanoplatelets. *Polymer Composites*,
- Baena, J. C., Wu, J., & Peng, Z. (2015) Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: A Review. *Lubricants*, 3, 413-436.
- Bahrami, H., Ramazani S. A. A., Kheradmand, A., Shafiee, M., & Baniasadi, H. (2015). Investigation of thermomechanical properties of UHMWPE/Graphene oxide nanocomposites prepared by in situ Ziegler–Natta polymerization. *Advances in Polymer Technology*, 0, 1-7.
- Bakar Atıcı, A. (2018). *Kalça eklem protezleri yapımında kullanılacak olan ultra molekül ağırlıklı polietilen (umape) yüzeylere kayganlık kazandırmak için kontrollü olarak poli(akrilik asit) (paa) aşılınması*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara.
- Bhattacharyya, A., Chen, S., & Zhu, M. (2014). Graphene reinforced ultra high molecular weight polyethylene with improved tensile strength and creep resistance properties. *Express Polymer Letters*, 8(2), 74–84.
- Chen, Y., Qi, Y., Tai, Z., Yan, X., Zhu, F., & Xue, Q. (2012). Preparation, mechanical properties and biocompatibility of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene composites. *European Polymer Journal*, 48, 1026–1033.
- Chih, A., Ansón-Casaos A., & Puértolas J.A. (2017). Frictional and mechanical behavior of graphene/UHMWPE composite coatings. *Tribology International*, 116, 295-302.
- Chua, C. K., Pumera, M. (2014). Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. *Chemical Society Reviews* 43, 291-312.
- Coşkun, M. İ. (2016). *Metalik biyomalzemelerin elektro kaplama yöntemi ile hidroksiapatit kaplanması, karakterizasyonu, modelleme ve yapay zeka uygulamaları*. Doktora Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enformatik Anabilim Dalı, Hatay.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Çolak, A., Mindivan, F., Göktaş, M. (2019). A comparative investigation of the wear behavior of reduced graphene oxide filled UHMWPE composite under dry and water environments. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 12-20.
- Dasari, B. L., Nouri, J. M., Brabazon, D., & Naher S. (2017). Graphene and derivatives: Synthesis techniques, properties and their energy applications. *Energy*, 140, 766-778.
- Deshmukh, K., & Joshi, G. M. (2014). Thermo-mechanical properties of poly (vinyl chloride)/ graphene oxide as high performance nanocomposites. *Polymer Testing*, 34, 211-219.
- F. Mindivan., H. Mindivan. (2018). Microstructure and tribocorrosion properties of pulsed plasma nitrided cast coCr alloy for dental implant applications. *Acta Physica Polonica A*, 134, 192-195.
- Fernandez-Merino, M. J., Guardia, L., Paredes, J. I., Villar-Rodil, S., Solis-Fernandez, P., Martinez-Alonso, A., & Tascon, J. M. D. (2010) Vitamin C is an ideal substitute for hydrazine in the reduction of graphene oxide suspensions. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114, 6426–6432.
- Firdous, S., Fuzail, M., Atif, M., & Nawaz, M. (2009). Polarimetric characterization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) for bone substitute biomaterials. *Optik*, 122, 99-104.
- Fung, M., Bowshe, J. G. & Van, Citters D. W. (2018). Variation of mechanical properties and oxidation with radiation dose and source in highly crosslinked remelted UHMWPE. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 82, 112-119.
- Gispert, M. P., Serro A. P., Colaço R., & Saramago, B. (2006). Friction and wear mechanisms in hip prosthesis: Comparison of joint materials behaviour in several lubricants. *Wear*, 260, 149–158.
- Golchin, A., Wikner A., & Emami N. (2016). An investigation into tribological behaviour of multi-walled carbon nanotube/graphene oxide reinforced UHMWPE in water lubricated contacts. *Tribology International*, 95, 156–161.
- Gong, G.F., Yang, H.Y., & Fu, X. (2004). Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding. *Wear*, 256, 88–94.
- Guo, Y., Sun, X., Liu, Y., Wang, W., Qiu, H., & Gao, J. (2012). One pot preparation of reduced graphene oxide (RGO) or Au (Ag) nanoparticle-RGO hybrids using chitosan as a reducing and stabilizing agent and their use in methanol electrooxidation. *Carbon*, 50, 2513–2523.
- Guofang, G., Huayong, Y., & Xin, F. (2004). Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding. *Wear*, 256, 88–94.

- Güven, Ş. Y. (2014). Biyouyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 303-311.
- Güven, Ş. Y. (2010). Ortopedik malzemelerin biyouyumlulukları ve mekanik özelliklerine göre seçimi. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir, 472-484.
- He, C.X., Shi, L.P. (2005). Tribology property of UHMWPE composites filled with carbon black and tiny glass powder. *Material Science Technology* 13, 387–393.
- Hu, J., Jia, X., Li, C., Ma, Z., Zhang, G., Sheng, W., Zhang, X., & Wei, Z. (2014). Effect of interfacial interaction between graphene oxide derivatives and poly(vinyl chloride) upon the mechanical properties of their nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 49, 2943–2951.
- Hu, W., Peng, C., Luo, W., Lv, M., Li, X., Li, D., Huang, Q., & Fan, C. (2010). Graphene-based antibacterial paper. *ACS Nano*, 4, 4317–4323.
- Huang, G., Ni, Z., Chen, G., & Zhao, Y. (2016). The Influence of Irradiation and Accelerated Aging on the Mechanical and Tribological Properties of the Graphene Oxide/Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Nanocomposites. *International Journal of Polymer Science*, 1-9.
- Hummers, W. S. & Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of American Chemical Society*, 80, 1339.
- Jin, Y., Huang, S., Zhang, M., Jia, M., & Hu, D. (2013) A green and efficient method to produce graphene for electrochemical capacitors from graphene oxide using sodium carbonate as a reducing agent. *Applied Surface Science*, 268, 541– 546.
- Kamisan, A. I., Kamisan, A. S., Ali, R. M., Tunku Kudin, T. I., Hassan, O. H., Halim, N. A., & Yahya, M. Z. A. (2015) Synthesis of graphene via green reduction of graphene oxide with simple sugars. *Advanced Materials Research*, 1107, 542-546.
- Kandhol, G., Wadhwa, H., Chand, S., Mahendia, S., & Kumar, S. (2019). Study of dielectric relaxation behavior of composites of Poly (vinyl alcohol) (PVA) and Reduced graphene oxide (RGO). *Vacuum*, 160, 384-393.
- Kapps, V., Almeida, C. M., Trommer, R. M., Senna, C. A., & Maru, M. M. (2019). Scatter in delamination wear tests of tribopair materials used in articulated implants. *Tribology International*, 133, 172-181.
- Karuppiyah, K. S. K., Bruck, A. L., Sundararajan, S., Wang, J., Lin, Z., Xu, Z. H., & Li, X. (2008). Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene as a function of polymer crystallinity. *Acta Biomaterialia*, 4, 1401–1410.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Khonakdar, H.A., Morshedian, J., Wagenknecht, U., & Jafari, S.H. (2003). An investigation of chemical crosslinking effect on properties of high density polyethylene. *Polymer*, 44, 4301–4309.
- Kurtz, S. M. (2004). *The UHMWPE Handbook*. Elsevier Academic Press, USA, 379.
- Kurtz, S. M., Muratoglu, O. K., Evans, M., & Edidin, A. A. (1999). Advances in the processing, sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty. *Biomaterials*, 20, 1659-1688.
- Lee, X. J., Hiew, B. Y. Z., Lai, K. C., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., & Rigby, S. (2019). Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 163–180.
- Lewis, G. (2001). Properties of crosslinked ultra high molecular weight polyethylene. *Biomaterials*, 22, 371–401.
- Liu, S., Zeng, T. H., Hofmann, M., Burcombe, E., Wei, J., Jiang, R., Kong, J. C., & Chen, Y. (2011). Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: membrane and oxidative stress. *ACS Nano*, 5, 6971–6980.
- Liu, Y., Zhang, Y., Ma, G., Wang, Z., Liu, K., & Liu, H. (2013). Ethylene glycol reduced graphene oxide/polypyrrole composite for supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 88, 519-525.
- Liu, Y., Zhang, Y., Maa, G., Wang, Z., Liu, K., & Liu, H. (2013). Ethylene glycol reduced graphene oxide/polypyrrole composite for supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 88, 519-525.
- Lusitâneo Pier Macuvelo, D., Colla, G., Cesca, K., Ribeiro, L.F.B., Costad, C.E., Nones, J., Breitenbach, E.R., Portoa, L.M., Soares, C., Antônio Fioric, M., & Gracher Riella, H. (2019). UHMWPE/HA biocomposite compatibilized by organophilic montmorillonite: An evaluation of the mechanical-tribological properties and its hemocompatibility and performance in simulated blood fluid. *Materials Science & Engineering C*, 100, 411–423.
- Maddinedi, S. B., Sonamuthu, J., Suzuk Yıldız, S., Han, G., Cai, Y., Gao, J., Ni, Q., & Yao, J. (2018) Silk sericin induced fabrication of reduced graphene oxide and its in-vitro cytotoxicity, photothermal evaluation. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, 186, 189–196.
- Melk, L., & Emami, N. (2018). Mechanical and thermal performances of UHMWPE blended vitamin E reinforced carbon nanoparticle composites. *Composites Part B*, 146, 20-27.
- Meng, L., Li, W., Ma, R., Huang, M., Wang, J., Luo, Y., Wang, J., & Xia, K. (2018). Long UHMWPE fibers reinforced rigid polyurethane composites: An investigation in mechanical properties. *European Polymer Journal*, 105, 55–60.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Mindivan, F. & Göktaş, M. (2018). Green synthesis of reduced graphene oxide (RGNO)/polyvinylchloride (PVC) composites and their structural characterization. *Materials Research Forum LLC*, 8, 143-151.
- Mindivan, F. (2013). *Fenolik reçine ve modifiye edilmiş kil/reçine kompozitlerinin hazırlanması ve yapısal, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Erzurum.
- Mindivan, H. (2016). Comparative study of tribocorrosion properties of some biobased materials in simulated artificial saliva. *Machines, Technologies, Materials*, 12, 58-60.
- Mohammed, A.S., Ali, A., & Nesar, M. (2017). Evaluation of tribological properties of organoclay reinforced UHMWPE nanocomposites. *Journal of Tribology*, 139, 1-6.
- Olçay, P. Ö. (2014). *Triboloji ve yağ biliminin günlük hayatımızdaki yeri ve önemi*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Pang, W., & Ni, Z., & Chen, G., & Huang, G., & Huang, H., & Zhao, Y. (2015). Mechanical and thermal properties of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites. *RSC Advances*, 5, 77, (63063-63072).
- Pang, W., Ni, Z., Wu, J., & Zhao, Y. (2018). Investigation of tribological properties of graphene oxide reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene under artificial seawater lubricating condition. *Applied Surface Science*, 434, 273–282.
- Pawlak Z., Urbaniak, W., & Oloyede, A. (2011). The relationship between friction and wettability in aqueous environment. *Wear*, 271, 1745–1749.
- Peng Chang, B., Akil, H. Md., Nasir, R. Bt., & Khan, A. (2015). Optimization on wear performance of UHMWPE composites using response surface methodology. *Tribology International*, 88, 252–262.
- Plumlee, K., & Schwartz, C. J. (2009). Improved wear resistance of orthopaedic UHMWPE by reinforcement with zirconium particles. *Wear*, 267, 710-717.
- Prabhakar, O., Arun K. (2020). Recent progresses and challenges in graphene based nano materials for advanced therapeutical applications: a comprehensive review. *Materials Today Communications* 22 (100823), 1-9.
- Prasad, A.J.K., Yeshvantha, H.S., Chandrakant, A. T., Jagannadh, G., & Basavaraj. (2018). Studies on the Wear Characteristics of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Polymer Nanocomposites containing Nano Zinc Oxide. *Materials Today: Proceedings*, 5, 2619–2626.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Reinitz, S. D., Currier, B. H., Levine, R. A., & Van Citters, D. W. (2014). Crosslink density, oxidation and chain scission in retrieved, highly cross-linked UHMWPE tibial bearings. *Biomaterials*, 35, 4436-4440.
- Ruan, S., Gao, P., & Yu, T.X. (2006). Ultra-strong gel-spun UHMWPE fibers reinforced using multiwalled carbon nanotubes. *Polymer*, 47, 1604–1611.
- Sandhya, P. K., Jose, J., Sreekala, M. S., Padmanabhan, M., & Kalarikkal, N. (2018). Reduced graphene oxide and ZnO decorated graphene for biomedical applications. *Ceramics International*, 44, 15092–15098.
- Schwartz, C. J., Bahadur, S., & Mallapragada, S. K. (2007). Effect of crosslinking and Pt–Zr quasicrystal fillers on the mechanical properties and wear resistance of UHMWPE for use in artificial joints. *Wear*, 263, 1072-1080.
- Shahemi, N., Liza, S., Abbas, A.A., & Merican, AM. (2018). Long-term wear failure analysis of uhmwpe acetabular cup in total hip replacement. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 87, 1–9.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., & Seal S. (2011). Graphene based materials: Past, present and future. *Progress in Materials Science*, 56, 1178–1271.
- Tahriri, M., Del Monico, M., Moghanian, A., Yarakı, M. T., Torres, R., Yadegari, A. & Tayebi, L. (2019). Graphene and its derivatives: Opportunities and challenges in dentistry. *Materials Science & Engineering C*, 102, 171–185.
- Tai, Z., Chen, Y., An, Y., Yan, X., & Xue, Q. (2012). Tribological Behavior of UHMWPE Reinforced with Graphene Oxide Nanosheets. *Tribology Letter*, 46, 55-63.
- Tekin H. (2015). *Co₃O₄ katkili zirkonya (8YSZ) seramiklerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa.
- Thakur, S., & Karak, N. (2012) Green reduction of graphene oxide by aqueous phytoextracts. *Carbon*, 50, 5331-5339.
- Tran, D. N. H., Kabiri, S., & Losic, D. (2014). A green approach for the reduction of graphene oxide nanosheets using non-aromatic amino acids. *Carbon*, 76, 193-202.
- Uflyanda, I.E., Droган, E.G., Burlakova, V.E., Kydralieva, K.A., Shershneva, I.N., & Dzhardimalieva, G.I. (2019). Testing the mechanical and tribological properties of new metal-polymer nanocomposite materials based on linear low-density polyethylene and Al₆₅Cu₂₂Fe₁₃ quasicrystals. *Polymer Testing*, 74, 178-186.
- Vadivel, H.S., Golchin, A., & Emami, N. (2018). Tribological behaviour of carbon filled hybrid UHMWPE composites in water. *Tribology International*, 124, 169-177.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Wang, Q., Wang, H., Wang, Y., & Yan, F. (2016). The influences of several carbon additions on the fretting wear behaviors of UHMWPE composites. *Tribology International*, 93, 390–398.
- Wang, Y., Shi, Z., & Yin, J. (2011). Facile Synthesis of soluble graphene via a green reduction of graphene oxide in tea solution and its biocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces* 3, 1127–1133.
- Wong, J. Y., & Bronzino, J. D. (2007). *Biomaterials*. CRC Press, Taylor&Francis Group, LLC, New York, 278.
- Wu, H., Tong, Li, Liu, B., Chen, C., Wang, S., & Crittenden, J. C. (2018). Blended PVC/PVC-g-PEGMA ultrafiltration membranes with enhanced performance and antifouling properties. *Applied Surface Science*, 455, 987-996.
- Xie, X.L., Tang, C.Y., Chan, K.Y.Y., Wu, X.C., Tsui, C.P., & Cheung, C.Y. (2003). Wear performance of ultrahigh molecular weight polyethylene/quartz composites. *Biomaterials*, 24, 1889–1896.
- Xue, Y., Wu, W., Jacobs, O., & Schadel, B. (2006). Tribological behaviour of UHMWPE/HDPE blends reinforced with multi-wall carbon nanotubes. *Polymer Testing*, 25, 221–229.
- Yüksel, F. (2014). *Alüminyum matrisli b4c partikül takviyeli aşınma direnci yüksek kompozit malzemelerin aşınma özelliklerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zai, W., Wonga, M. H., & Mana, H. C. (2019). Improving the wear and corrosion resistance of CoCrMo-UHMWPE articulating surfaces in the presence of an electrolyte. *Applied Surface Science*, 464, 404-411.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Alime ÇOLAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir/09.06.1988



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (2016)
Önlisans Öğrenimi : Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya M.Y.O.
Seramik Bölümü (2008)

İş Deneyimi

- Arslan Alüminyum A.Ş. (Proses Mühendisi-2018)
- Billas Lastik ve Kauçuk San.Tic.A.Ş. (Üretim Planlama Mühendisi-2017)
- Park Cam San.Tic.A.Ş. (2016-Staj)
- Billas Lastik ve Kauçuk San.Tic.A.Ş. (2015-Staj)
- Eczacıbaşı Artema (2014-Staj)
- Bien Seramik (2012-Proses Kontrol Laboratuvar Teknikeri)

İletişim

Adres : Osmangazi Mah. Merkez Sok. D4 Blok, Daire:8 BİLECİK
E-Posta Adresi : alime_colak@hotmail.com

Akademik Çalışmaları

- “5th International Conference on Engineering Sciences” in Ankara/Turkey (ICES September 2019)-(Effect of Reduced Graphene Oxide Amount on the Tribological Properties of UHMWPE Biocomposites Under Water-Lubricated Conditions-Sunum).
- “The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology” in Cappadocia / Turkey (IMSMATEC 21-23 June 2019)-(İndirgenmiş Grafen Oksit Katkılı UHMWPE Kompozitin Kuru ve Sulu Ortamlarda Aşınma Davranışlarının Karşılaştırılması-Sunum).
- “16th International Conference on Tribology” (SERBIATRIB '19) Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2019 (Dry Wear Studies On Reduced Graphene Oxide Filled Uhmwpe Composites-Tam Metin Bildiri- Sunum).
- ESOGÜ Teknoloji Transfer Ofisi (ETTOM) tarafından düzenlenen “Sağlık ve Biyomedikal Proje Pazarı”-2018, (Kalça ve Diz Protezlerinde Kullanılan UHMWPE’e Alternatif UHMWPE/Yeşil Grafen Kompozitlerin Üretimi-Poster Sunum).
- “Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Eğitim Sempozyumu”(Anadolu Üniversitesi-Kasım 2013).

Tarih: 27 / 12 / 2019