



**3 BOYUTLU YAZICIDA ÜRETİLEN POLİMER
MALZEMELERİN KURU KAYMA ALTINDAKİ
TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Hakan TÜRKMEN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3 BOYUTLU YAZICIDA ÜRETİLEN POLİMER MALZEMELERİN KURU
KAYMA ALTINDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Hakan TÜRKMEN

ORCID No: 0000-0003-1224-8858

Prof. Dr. Fatih KARPAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA– 2020

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3 BOYUTLU YAZICIDA ÜRETİLEN POLİMER MALZEMELERİN KURU KAYMA ALTINDAKİ TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Hakan TÜRKMEN

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih KARPAT

Bu çalışma 3 boyutlu yazıcıda termoplastik Nylon White ,ONYX, ONYX FR malzemeleri üretilerek bu malzemelerin aşınma davranışları deneysel olarak araştırılmıştır.

3D printerda üretilen termoplastik numunelerin aşınma testleri çeşitli aşınma konfigürasyonu ve parametrelerine sahip TE53 aşınma deney cihazıyla yapılmıştır. Deney esnasında kullanılan konfigürasyon block on roller yöntemidir. Test parametreleri seçiminde ise ASTM 137-97 (2009) standardından faydalanılmıştır. Numuneleri aşındırmak için 65 HRC sertliğinde AISI 52100 rulman çeliği kullanılmıştır. Deney başladığında belli bir süre sonra diskler ısındığı için deney sonuçlarını etkilememesi adına disk soğuyana kadar diğer teste başlanmamıştır. Böylelikle her deney başında sıcaklıkları aynı olan disklerle yeni deneye başlanarak ısının aşınmaya olan etkisi azaltılmıştır. Numuneler üzerinde belirlenen yük, kayma hızı ve kayma mesafesi altındaki aşınma davranışları görsel analizleri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli üretim, tribology, kuru kayma altında ki aşınma davranışları, sürtünme, disk üzerinde blok

ABSTRACT

MScThesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIORS OF POLYMER MATERIALS IN UNDER DRY SLIDING WHICH IS PRODUCED IN 3D PRINTER

Hakan TÜRKMEN

Bursa Uludağ University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing and Construction

Supervisor: Doç. Dr. Fatih KARPAT

In this study, thermoplastic Nylon White, ONYX, ONYX FR materials were produced in 3D printer and wear behaviors of these materials were investigated experimentally.

Abrasion tests of the thermoplastic specimens produced in 3D printer were performed with TE53 abrasion test device with various wear configuration and parameters. The configuration used during the experiment is the block on roller method. In the selection of test parameters, ATM 137-97 (2009) standard was used. AISI 52100 bearing steel was used with 65 HRC hardness to abrade the samples. After certain period of time, disc is heated up. Experiment is not started after the disc cooling to prevent effect of heat in the experiment on wear. The wear behavior under load, sliding speed and sliding distance determined on the samples were evaluated together with their visual analysis.

Keywords: Additive manufacturing, Tribology, 3D printer, wear under dry sliding condition, friction, block-on-roller.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve olgunlaşma sürecinde isteklerimi göz önünde bulunduran, engin bilgi, birikim ve tecrübesiyle bana yol gösteren, takıldığım noktalarda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışmanım ve hocam **Prof. Dr. Fatih KARPAT'a** ve tüm diğer hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenim sürecimde yapmış olduğum çalışmalar esnasında manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen başta babam **Mehmet TÜRKMEN** olmak üzere, annem **Esma TÜRKMEN** ve kardeşim **Serkan TÜRKMEN'e** çok teşekkür ederim.

Numune parçalarının üretimi konusunda destek olan **PROMAKİM A.Ş.**'ye ayrıca teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
3. SÜRTÜNME VE ÇEŞİTLERİ	4
3.1 Sürtünme	4
3.2 Sürtünme Çeşitleri.....	4
3.2.1 Kuru Sürtünme	5
3.2.2 Sınır Sürtünmesi.....	7
3.2.3 Sıvı Sürtünmesi	9
3.2.4 Yuvarlanma Sürtünmesi	10
4. AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ.....	12
4.1 Aşınma.....	12
4.2 Aşınma ve Çeşitleri	13
4.2.1 Adhezif Aşınma	13
4.2.2 Abrasif Aşınma.....	14
4.2.3 Yorulma Aşınması (Pitting)	15
4.2.4 Kavitasyon Aşınması.....	16
4.2.5 Korozyon Aşınma	16
4.2.6 Erozyon Aşınması	17
4.2.7 Tabaka ve Yenme Aşınması	17
5. KATMANLI ÜRETİM VE ÇEŞİTLERİ.....	18
5.1 Katmanlı Üretim.....	18
5.2 Katmanlı Üretim Çeşitleri	23
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26

6.1 Deneysel Çalışmanın Amacı	26
6.2 Numune Üretim Metodunun Belirlenmesi ve Üretimi.....	26
6.3 Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	31
6.4 Deneyin Yapılışı.....	36
6.5 Deney Sonuçları ve Değerlendirme	41
6.6 Aşınma Oranları ve Yüzey Görüntüleri	46
7. SONUÇLAR	59
7.1 Sonuç ve Öneriler.....	59
8. KAYNAKÇA.....	62



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kisaltmalar	Açıklama
3DP	Üç Boyutlu Baskı
FDM	Eriyik Yığıma Modellemesi
CF	Karbon fiber
FG	Cam Elyaf
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
LOM	Lamine Nesne Üretimi
SL	Stereolitografi
F_s	Sürtünme Kuvveti
F_n	Normal kuvvet
HSHT	Yüksek sıcaklığa dayanıklı yüksek mukavemetli cam elyaf
PP	Polipropilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Sürünmeli Sürtünme halleri a)Kuru, b)Sınır, c)Sıvı sürtünme halleri (Akkurt, M.1982/1986/1990).....	4
Şekil 3.2 Hareket esnasında sürtünmeli yüzey düzlemindeki serbest cisim diyagramı (Akkurt, 1990).....	5
Şekil 3.3 Mikro kaynak (Akkurt, 1982).....	6
Şekil 3.4 Polar moleküllerin madensel yüzeylere bağlanmış hali (Akkurt, 1982).....	7
Şekil 3.5 Yağ tabakası tarafından birbirinden tamamen ayrılmış sıvı sürtünme hali (merkezi yağlama sistemleri/ sıvı sürtünmesi).....	9
Şekil 3.6 Hidrodinamik sıvı sürtünme hali a)eksenel yatak, b)radial yatak (merkezi yağlama sistemleri/ sıvı sürtünmesi)	10
Şekil 3.7 Polar moleküllerin madensel yüzeylere bağlanması (merkezi yağlama sistemleri, yuvarlanma sürtünmesi)	11
Şekil 4.1 En sık karşılaşılan aşınma türleri	12
Şekil 4.2 Kaynak bağlarının kopması ve adhezif aşınma (merkezi yağlama sistemleri/ adhezif aşınma)	13
Şekil 4.3 Kam mili üzerindeki adhezyon aşınma örneği (Wikipedia, Adezyon aşınması 2013)	13
Şekil 4.4 Bir mil üzerinde abrazyon aşınması sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü (Abrazyon aşınması 2013, Wikipedia).....	14
Şekil 4.5 Sonsuz vida karşı çarkında meydana gelen yorulma aşınması. (Triboloji 2013, Wikipedia).....	15
Şekil 4.6 Bir santrifüj pompada kavitasyon sonucu oluşan aşınma. (Wikiwand).....	16
Şekil 4.7 Çöl ortamında rüzgarın sebep olduğu bir erozyon (Wikiwand)	17
Şekil 5.1 Katmanlı üretim ile oluşturulmuş el (webtekno)	19
Şekil 5.2 Katmanlı üretim ile yapılan mega şato (TechCrunch).....	20
Şekil 5.3 Katmanlı üretim proses süreci (E&M Magazine-N. Kara).....	21
Şekil 5.4 Uçaklarda kullanılan motor kapak menteşesinin geleneksel ve katmanlı üretim metoduyla üretilmiş birer örneği (E&M Magazine-N. Kara)	22
Şekil 5.5 İklimlendirme sistemleri için kullanılan katmanlı üretim yoluyla imal edilmiş borular (E&M Magazine-N. Kara).....	22
Şekil 5.6 Katmanlı üretim teknolojisi ile batch halinde üretilen numuneler (E&M Magazine-N. Kara).....	22
Şekil 5.7 Katmanlı üretim metodunun şematik gösterimi.....	23
Şekil 5.8 Katmanlı üretim metodu ile yapılmış dişli kutusu (poligonmühendislik)	25
Şekil 5.9 Volkswagen 3D printed araba parçası (VWvortex).....	25
Şekil 6.1 Markforged® Mark-Two kompozit ve polymer üretebilen hava geçirmez 3D yazıcı (Markforged®)	27
Şekil 6.2 Baskı şeması a)filament malzemesi, b)motor beslemesi, c)Hot-Nozzle, d)XY ekseninde ekstrüde edilen malzeme (Ghebretinsae, 2019)	28

Şekil 6.3 Markforged® Mark-Two 3D Yazıcının İç Detayları (Ghebretinsae, 2019).....	29
Şekil 6.4 Malzemelerin bükülme mukavemeti (Markforged® Rev. 3.2-9/9/2019).....	32
Şekil 6.5 Markforged® Two Nylon White Numune Üretimi (PROMAKİM)	33
Şekil 6.6 Markforged® Two ONYX Numune Üretimi (PROMAKİM).....	33
Şekil 6.7 Markforged® X7 ONYX-FR Numune Üretimi (PROMAKİM).....	34
Şekil 6.8 Test numunesinin TE53 Çok amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazı üzerine bağlanmış bir örneği.....	34
Şekil 6.9 Üretilen polymer malzemelerin 12,7x12,7x12,7 mm'lik küpler şeklinde elde edilmesi ve kilitli poşetlerle muhafaza edilmesi.	35
Şekil 6.10 Deney cihazının şematik gösterimi	36
Şekil 6.11 Block-on-ring konfigürasyonu ve disk boyutları.....	37
Şekil 6.12 Ağırlık kaybı ölçümlerinin yapıldığı hassas ölçüm cihazı.....	40
Şekil 6.13 Yüzey aşınması görüntüleri için kullanılan KEYENCE VHX 5000 (Keyence)	40
Şekil 6.14 Üç farklı polymer malzemenin 1m/s, 67N ve 2000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları.....	42
Şekil 6.15 Üç farklı polymer malzemenin 2m/s, 67N ve 2000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları.....	43
Şekil 6.16 Üç farklı polymer malzemenin 1m/s, 92N ve 2000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları.....	44
Şekil 6.17 Üç farklı polymer malzemenin 2m/s, 92N ve 2000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları.....	45
Şekil 6.18 Farklı yük ve hız koşullarında deneye tabi tutulan polymer malzemelerinin aşınma oranlarının karşılaştırılması	46
Şekil 6.19 White Nylon 1 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	47
Şekil 6.20 White Nylon 1 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	47
Şekil 6.21 White Nylon 2 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	48
Şekil 6.22 White Nylon 2 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	48
Şekil 6.23 White Nylon 3 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	49
Şekil 6.24 White Nylon 3 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	49
Şekil 6.25 White Nylon 4 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	50
Şekil 6.26 White Nylon 4 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	50
Şekil 6.27 ONYX 9 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	51
Şekil 6.28 ONYX 9 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	51
Şekil 6.29 ONYX 10 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	52
Şekil 6.30 ONYX 10 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	52
Şekil 6.31 ONYX 11 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	53
Şekil 6.32 ONYX 11 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	53
Şekil 6.33 ONYX 12 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü	54
Şekil 6.34 ONYX 12 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	54
Şekil 6.35 ONYX-FR 13 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü.....	55
Şekil 6.36 ONYX-FR 13 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	55

Şekil 6.37 ONYX-FR 14 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü.....	56
Şekil 6.38 ONYX-FR 14 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	56
Şekil 6.39 ONYX-FR 15 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	57
Şekil 6.40 ONYX-FR 15 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	57
Şekil 6.41 ONYX-FR 16 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü.....	58
Şekil 6.42 ONYX-FR 16 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü	58

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 6.1 Markforged® Mark-Two 3D Yazıcısında üretilen malzemelerin teknik özellikleri (Markforged®Rev. 3.2-9/9/2019).....	31
Tablo 6.2 Deneye tabi tutulan polimer malzemelerin belirlenen yük, hız ve kayma mesafesi altındaki ağırlık kayıpları ve buna bağlı olarak belirlenen aşınma oranları	40

1.GİRİŞ

1.1 Giriş

Eklemeli üretim (AM) prototipleme ve araştırma alanlarında sınırlı olmakla birlikte, bu teknolojinin günümüzde geleneksel üretim süreçlerinde devrim yaratmada çeşitli avantajları ve önemli potansiyeli vardır. Son yıllarda, AM dahilinde metaller de dahil olmak üzere çeşitli polymer malzemeler incelenmiş ve test edilmiştir. Polimerler düşük mukavemet ve sertliğe sahiptir ve yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren mühendislik uygulamalarında uygulamaları sınırlıdır. Bununla birlikte, güçlendirici bir elyafın eklenmesiyle, polimer esaslı malzeme daha güçlü ve daha sert bir malzemeye, yani kompozit malzemelere dönüşebilir (Fithawi, 2019).

Şu anda, masaüstü 3D yazıcılar kullanarak iki veya daha fazla filament malzemeden küçük boyutlu bileşenler üretmek ticari olarak mümkündür. Bununla birlikte, 3D Baskı teknolojisi tarafından üretilen kompozitlerin malzeme özellikleri hakkında sınırlı bir bilgi vardır. Bunun üstesinden gelmek için, hem 3D baskı işlemleri hem de malzeme özellikleri üzerinde çeşitli araştırmalar yapılması gerekmektedir (Fithawi, 2019).

Polymer malzemeler seramik ve metal malzemelere kıyasla daha zayıftırlar. Bu dezavantajı aşmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için farklı tipte elyaf takviyeleri uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda sadece mekanik özellikleri iyileştirmenin dışında aşınma ve sürtünme özelliklerini de iyileştirmek için yapılabilir (Larsen, Andersen, Thorning, Vigild, 2008).

Sürtünme ve bunun sonucunda ortaya çıkacak olan ısı ve aşınma makine ve tasarım sürecinde seçilen malzemeler arasında önemli bir yere sahiptir. Birbirleri ile çalışan makine elemanları arasında oluşacak sürtünme güç kaybına, aşınma ise makinenin çalışma koşullarında ki tolerans ve hassasiyetinin kaybolmasına neden olacaktır. Bu sebeple, makine elemanlarının çalışma esnasında aşınmanın gerçekleşmesi istenmeyen bir durumdur (Mürsel, 2013).

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çoğu durumda, Y yönünde yazdırılan numuneler için harekete karşı direnç, X yönüne göre daha düşük görünüyor. Baskı teknolojisinin bir etkisi olarak bu durum şu şekilde açıklanabilir. Y yönü, polimerin ipliklerinin kayma yönüne paralel olduğu anlamına gelir. Y yönündeki mekanik özellikler X yönünden daha düşüktür (baskı sırasında erimiş iplikler arasındaki bağlanma nedeniyle). Erimiş polimerin laminer akışı (FDM 3d baskı sırasında) polimer ipliğinin iç yapısını da etkileyebilir. Bu durumu daha iyi anlayabilmek için, özellikle farklı yönlerde yazdırılan numuneler için elde edilen μ değerleri arasındaki küçük farklılıklar için daha fazla test yapılmalıdır. Bununla birlikte, böyle küçük bir etkinin D-10 malzemesi (CF) hariç diğer test edilen polimer malzemeler arasında pratikte bir etkisi yoktur. D-10 (CF) malzemesi durumunda sürekli karbon fiberin yük (Y) yönüne, dik yönü ise kayma yönüne paralel olacak şekilde test edildiğinde μ değerleri arasında bir farklılık gözlemlenmiştir. Tamamlanan araştırmalar, kullanılabilir sürtünme bileşenlerinin üretimi için mevcut 3D baskı malzemelerinin kullanımının pratik olasılığını göstermektedir. Basılan yapının çoğu mühendislik malzemesi için uygulanan yüke (X veya Y yönüne) göre yönlendirilmesi sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilemez. Sadece filament (D-10) ile takviye edilmiş malzeme için önemli bir etki elde edilmiştir (Konbin 48, 2018 /Sciendo).

Bu çalışmada kayma basıncı ve yüzey basıncının sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı üzerinde ki etkisi incelenmiştir. Elyaf yönünde ki değişimlere bağlı olarak aşınan numune yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile fotoğrafı çekilerek yüzey sonuçları yorumlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sürtünme katsayısı elyaf oryantasyonlarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Uygulanan test koşulları göz önünde bulundurulduğunda en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel oryantasyonda olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise counter yüzey tarafından çekmeye zorlanan elyafların çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle aşınma esnasında direnç gösterip kolay bir şekilde malzeme kopmaması ve matristen ayrılmamaları olduğu tespit edilmiştir. Son olarak aşınma esnasında kopan malzemelerin yüzeyde abrazyon etkisi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak

aşınma mükhtarları elyaf oryantasyonuna bağılı olarak değişkenlik göstermekte ve bu durum yapılacak çalışmalar esnasında göz önünde bulundurulmalıdır (Yaşar, Arslan, 2000).

3D baskı işlemi sırasında çeşitli baskı yönleri varyasyonları sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği değerlerinde bir farklılık yarattığını göstermektedir. Bulgular, belirtilen yönde baskı yapısının sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmaya yardımcı olduğunu göstermektedir (M. Hannon, 2020).

FDM tabanlı 3D baskı tekniğine aday olan PP potansiyelini ele almaktadır. Tüm filament üretim zinciri, PP peletlerden başlayarak, ekstrüzyonla filament üretimi ve test örnekleri baskısı ile değerlendirilir. Bu strateji, aynı kalitedeki hammadde kullanılarak kompresyon kalıplama ile üretilen parçalarla basılan numuneler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Basılan numunelerin mekanik özellikleri, filaman yönelimi, tabaka kalınlığı, dolgu derecesi ve malzemenin etkisi değerlendirilmiştir. Takviyeli ve takviyesiz olmak üzere iki sınıf PP değerlendirilmiştir. FDM'nin geleneksel üretim teknikleri ile rekabet etme potansiyelini, özellikle küçük parça / bileşen serilerinin üretimi için avantajlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bu tekniğin yeterli mekanik performansa sahip parçaların üretilmesine izin verdiği ve bu nedenle maketlerin ve prototiplerin üretimi ile sınırlandırılmasına gerek olmadığı belirtilmiştir. (O.S.Carneiro, 2015 /Materials&Design).

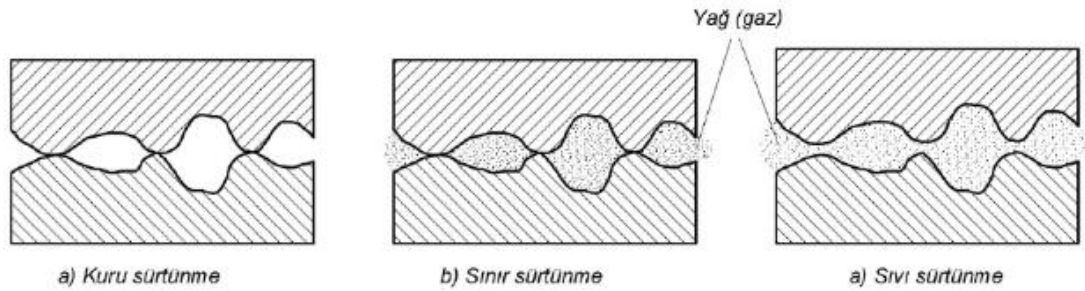
Kuru kayma aşınma şartları göz önünde bulundurularak farklı elyaf oryantasyonlarından oluşan epoksi reçine ve takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Üretim metodu olarak vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır.Elyafların birbiri üzerine belirtilen oryantasyon ve açılarda st üste konularak vakum ortamında reçinenin elyaflara emdirilmesi sonrasında belirli sıcaklıkta belirtilen saatlerde krleme işlemiyle kompozit malzeme üretimi gerçekleşmiştir. Bu retim metodu kompozit malzemelere gelişmiş mekanik özellik kazandırma açısından diğer tekniklere göre daha avantajlıdır (Mürsel, 2013).

3. SÜRTÜNME VE ÇEŞİTLERİ

3.1 Sürtünme

Sürtünme, birbirine göre bağıl hareket eden ve temasta olan cisim yüzeylerinin hareket veya hareket ihtimaline karşı göstermiş oldukları dirençtir. Temas halinde bulunan hareketli parçalar arasında kinematik bakımdan farklı sürtünme çeşitleri oluşabilir. Bunlar kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanma şeklindedir.

Birbirine göre bağıl hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı bir madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç farklı şekilde incelenebilir. Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre bağıl harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda, yani yüzeyler tamamiyle ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır.



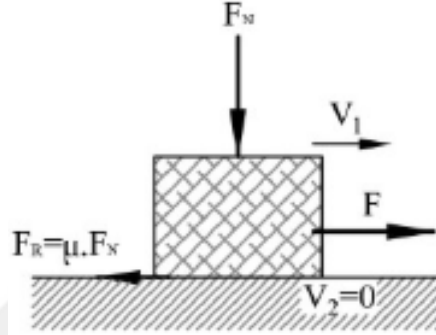
Şekil 3.1 Sürtünmeli Sürtünme halleri a)Kuru, b)Sınır, c)Sıvı (Akkurt, M.1982/1986/1990).

Oluşan sürtünme sonucunda aşınmalar meydana gelir. Makine elemanlarının herhangi bir tanesinde oluşacak bir aşınma ise parçalarda boyut değişkenliğine neden olacaktır. Parçalarda ki bu boyut değişiklikleri makinenin hassasiyetini kaybederek görevini yerine getirememesine kalite ve işlevselliğinin azalması ile sonuçlanır.

3.2 Sürtünme Çeşitleri

3.2.1 Kuru Sürtünme

Bağıl hareket yapan ve normal bir kuvvetin etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı Coulomb-Amontons şeklinde bir sürtünme kuvveti ortaya çıkar. ($F_s = \mu \cdot F_n$)



Şekil 3.2 Hareket esnasında sürtünmeli yüzey düzlemindeki serbest cisim diyagramı (Akkurt, 1990).

Şekilde de görüldüğü gibi cisme bir F kuvveti uygulandığında iki farklı durum ortaya çıkabilir. Cismin hareket etmesi için gereken kuvvete eşit veya daha az bir kuvvet uygulanabilir. Bu durumda cisim ve yüzey arasında statik sürtünme gerçekleşerek cismin hareket etmemesi ile sonuçlanır. Newton yasasına göre şekilde gösterilen serbest cisim diyagramı üzerinden açıklayacak olursak F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetine tamamen eşit ve ters yöndedir. Statik sürtünme ile çalışan sistemlere örnek vermek gerekirse kavrama ve fren gibi elemanlar bu kategori içerisinde yer alır. Diğer bir durumda ise, F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yönde olduğunda yüzeyler birbiri üzerinde kayarak hareket edecektir.

Bu iki durumu göz önünde bulundurursak, teknikte kullanılan yere göre sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir özellik olarak karşımıza çıkar. Kavrama, sürtünmeli çarklar, fren gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir durum olmasına rağmen birbirine göre bağıl hareket eden cisim ve yüzeyler için ise istenilmeyen bir özellik olarak ortaya çıkar.

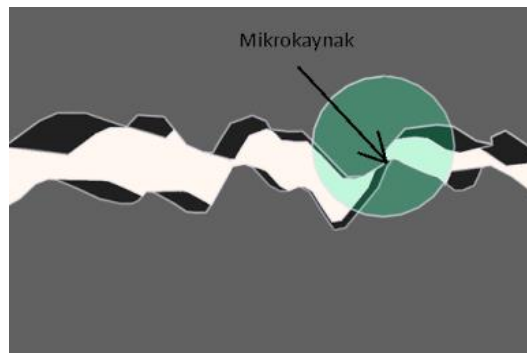
Açıklanan bu iki farklı durumu Coulomb – Amontons kanuna dayanarak sürtünme katsayısı;

$\mu = F_S / F_N$ şeklinde ifade edilir.

Genelde statik sürtünme katsayısı (μ_0), kinematik sürtünme katsayısı olan (μ)’den daha büyüktür. Kayma hızı arttırıldığında kinematik sürtünme katsayısının az da olsa azaldığı gözlemlenir. Hareketin başlangıç esnasında sürtünme kuvveti en yüksek değerdedir. Uygulamadan uygulamaya ve malzemeden malzemeye göre farklılık göstermekle birlikte genel olarak kayma hızlarında hıza göre sürtünme katsayısının değişimi oldukça az olduğundan dolayı sürtünme katsayısı sabit sayılabilecek düzeyde olduğu söylenebilir.

Sürtünme durumunu betimlemeye çalışan birden fazla teori vardır. Bu teorilerden gerçek duruma en yakın olanı T’abor ve Bowden’in kaynak bağları teorisidir. Bu teoriler şu şekilde açıklanabilir;

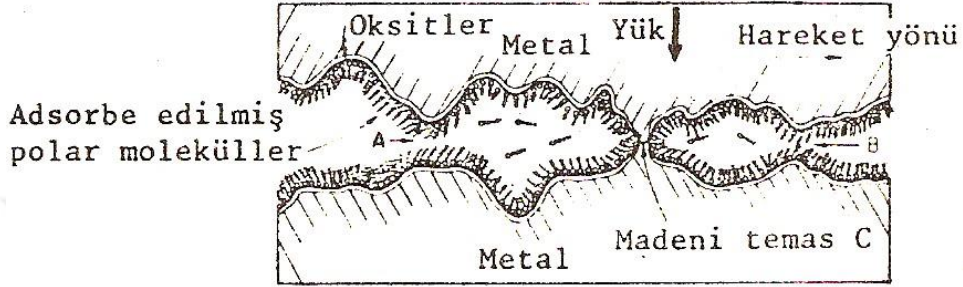
Yüksüz durumda yüzeyler belirli pürüzlük noktalarında temasta bulunurlar. Bu noktalarda tabii tabakalar arasında bağlar oluşur. Yük tatbik edildikten sonra, çok küçük olan temas yüzeylerinde çok büyük basınçlar meydana gelir. Bu basınçların etkisi altında bazı temas noktalarındaki tabii tabaka kopar, metalik temas meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskopik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar, tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir. Ternasta bulunan elemanların bağıl hareketi ancak bu bağların kopması ile mümkündür. Bu bağların kopması için gereken kuvvette ise sürtünme kuvveti adı verilir.



Şekil 3.3 Mikrokaynak (Akkurt, 1982).

3.2.2 Sınır Sürtünmesi

Sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı durumlarda ise sınır sürtünmesi hali ile karşılaşırız. Günlük yaşıntıda en çok rastladığımız bu sürtünme türünde sürtünme katsayısı 0,03 ile 0,1 arasında değişir.



Şekil 3.4 Polar moleküllerin madensel yüzeylere bağlanmış hali (Akkurt, 1982).

Kuru sürtünme ve film sürtünme arasında ki bölge teorikte sınır sürtünme olarak adlandırılır. Bu şekilde birbirleri ile temas halinde bulunan yüzeyler arasında farklı özelliklere sahip üçüncü bir yağlayıcı bulunur. Konulan bu yağlayıcı maddenin molekülleri adsorpsiyon olayının gerçekleşmesi sonucu olarak madensel yüzeylere çok iyi ve düzenli bir şekilde yapışırlar. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil-1). Bu sayede yüzeyler üstünde belirli kalınlıkta adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır. Yüzeyler arasında ki yağın bu özelliğine yapışma kabiliyeti adı verilir. Bu özellik yağ ve madensel birbirlerine karşı etkileşimine bağlıdır. Yüzeyler arasında oluşan bu tabaka, metalik yüzeylerin birbirleri ile direk temasa geçmesini önler. Yağ tabakası ile ana tabaka arasında çok önemli bir fark vardır. Ana tabaka üzerinde havanın etkisiyle oluşan oksit tabakasında yağ molekülleri azdır. Yağ tabakası tamamen yağ moleküllerinden oluşarak özelliğini oraya yağlamak amacıyla konulan yağ maddesinden alır. Yağ tabakasının ana tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti σ_{kf} ve kayma mukavemeti τ_{kf} ile ifade edilirse, aşağıdaki denklem burada da geçerlidir. İyi bir

yağlama sisteminde yükü taşıyan temas alanında oluşan metalik bağların yüzdesi çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı;

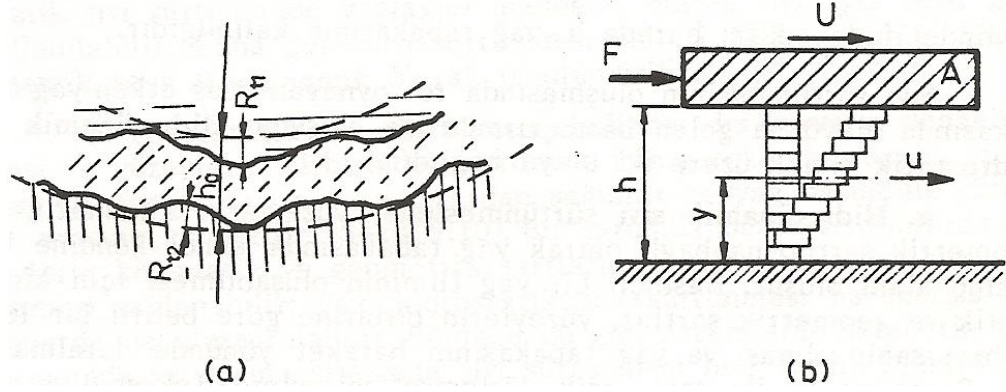
$$\mu = \tau_{kf} / \sigma_{kf}$$

olarak bulunur. Yağ tabakasının kayma ve kopma mukavemetleri burada ki en önemli noktadır. Kullanılan yağların oluşturduğu yağ tabakalarının göstermiş olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmek (kayma ve kopma mukavemetlerini değiştirmek) için additive adı verilen ek maddeler kullanılır.

Pratikte sürtünme katsayıları kuru sürtünmede tayin edildiği gibi sınır sürtünmesinde de yapılan deneyler sonucunda belirlenir. (Akkurt 1982/1986/1990, merkezi yağlama sistemleri/ sınır sürtünmesi).

3.2.3 Sıvı Sürtünmesi

Madeni yüzeylerin yağ tabakası tarafından birbirinden tamamen ayrılmış olduğu sürtünme haline sıvı sürtünmesi adı verilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Yağ tabakası tarafından birbirinden tamamen ayrılmış sıvı sürtünme hali (merkezi yağlama sistemleri/ sıvı sürtünmesi).

Yüzeylerin pürüzlülük değerleri göz önünde bulundurulduğunda, analitik bakımdan sıvı sürtünmesini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

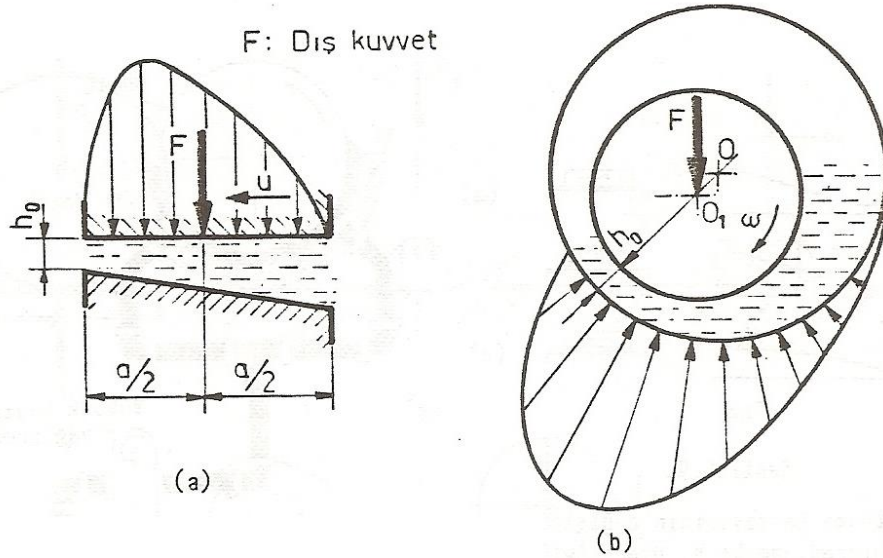
$$h_a > R_{t1} + R_{t2}$$

R_{t1} ve R_{t2} değerleri her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğünü ifade etmektedir. (merkezi yağlama sistemleri)

Yüzey boyunca temasta olan yağ tabakalarının adsorpsiyon nedeniyle her iki yüzey boyunca birbirlerine tamamen yapışmış olduğu görülür. Sıvı sürtünmesi birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşur ve bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olarak değişir. Bu sebeple yağ tabakasında oluşan basınç sıvı sürtünmesinin oluşmasında ki en büyük etmendir (Akkurt, 1982).

Hidrodinamik sıvı sürtünmesi halinde, yüzeylerin özelliklerine bağlı olarak yağ tabakasında bir basınç alanı oluşur. Basınçlı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartların yağ filmi oluşturmaya elverişli ve uygun olması, yağ tabakasının hareket yönünde gittikçe daralması ve yüzeylerin birbirine göre belirli bir bağlı hıza sahip olması gerekmektedir. Pratikte bu belirtilen şartlar, eğik düzlemsel

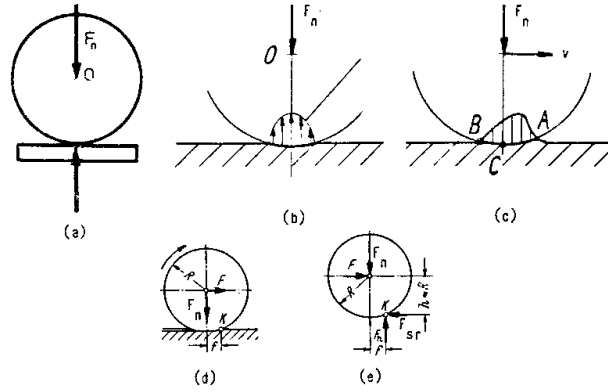
yüzeylerde yani eksenel yataklarda, Şekil-3.6 (a) ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde yani radyal yataklarda, Şekil-3.6 (b) gösterildiği gibi gerçekleşir.



Şekil 3.6 Hidrodinamik sıvı sürtünme hali (a)eksenel yatak, (b)radyal yatak (merkezi yağlama sistemleri/ sıvı sürtünmesi)

3.2.4 Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı birbirine temas eden yüzeyler arasında oluşan dirençtir. Teorik açıdan tam olarak rijit ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olan silindirik veya küre şeklindeki bir elemanın, yapı olarak tamamen rijit ve yine pürüzsüz yüzeye sahip bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanma esnasında (Şekil-1a), hiçbir şekilde sürtünme kuvveti oluşmaz. Bu şekilde belirtilen elemanların temas yüzeyleri üzerinde Hertz tipi şeklinde elastik ve daha az olacak şekilde plastik deformasyonlar oluşur (Şekil-1b). Ayrıca hareket yönüne doğru olacak şekilde temas alanında bir dalga oluşur (Şekil-1c). Dolayısıyla FN kuvvetine karşı basınçların tepkisi f değeri ile ileri kayar (Şekil-1d). Bu durumda, elemanın yuvarlanmasında meydana gelen yuvarlanma sürtünme momenti (Şekil 3.6).



Şekil 3.7 Polar molkeüllerin madensel yüzeylere bağlanması (Akkurt, 1982, merkezi yağlama sistemleri/ yuvarlanma sürtünmesi).

Yuvarlanma sürtünme hali genellikle kaymadan ve elastik deformasyondan oluşan sürtünme şeklidir. Bu sürtünme haline en çok rastlanan sistemlerde dişli çarklar ve rulmanlar gibi, temas yüzeylerindeki kayma, diğer faktörlere bağlı olarak oluşmaktadır. Örneğin rulmanlar için coriolis kuvvetleri ve dişli çarklar içinse kavrama özelliği gibi etmenler kaymayı meydana getirir. Özetle, yuvarlanma sürtünme halinde sürtünme kuvveti normal kuvvetinküçük bir payını oluşturur (Akkurt, 1982).

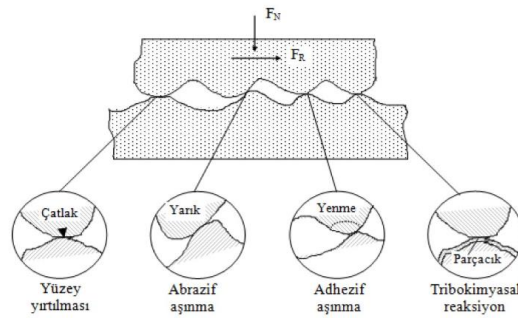
4. AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ

4.1 Aşınma

Birbirine göre izafi hareket yapan ve temas eden yüzeylerden parça kopması aşınma olarak isimlendirilir. Tribolojinin içerdiği konulardan içerisinde bir taneside aşınmadır. Belli bir süre sonra birlikte çalışan sistemlerin yüzeylerinde sıkça rastlanılan bir bozulma türüdür.

Aşınma sonrasında makine elemanlarının geometrik şekil ve toleranslarında belirli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler sonrası makine elemanları veya sistem içerisinde ki parçalar fonksiyonları istenilen kalitede yerine getirememeye başlar. Bu sebeple aşınmaya neden olan faktörlerin mekanizmalarını daha doğru anlayabilmek adına aşınmaya etki eden ana faktörleri yani aşınan ve aşındırıcı malzemeyi, yağlamanın olup olmama durumu, birbirine göre izafi hareket eden eleman ve üzerlerinde ki yük durumunu öğrenmek gerekir. Bu faktörler bilindiği takdirde buna sebep olan aşınma ile ilgili çözüm bulunabilir (Wikipedia).

Aşınma, dışarıdan etkiyen faktörler altında birbirine temas eden malzeme yüzeylerinde ki fiziksel ve kimyasal değişimlerin bir sonucu olarak nitelendirilebilir. Bu fiziksel ve kimyasal değişikliklerin farklılığı ve çokluğu sebebiyle birden fazla aşınma türü vardır. Bunlar adhezif, abrazif, korozif, yorulma(pitting), tabaka aşınması, yenme aşınması, erozyon aşınması, kavitasyon aşınması, erozyonlu kavitasyon aşınması, püskürtme aşınması, kimyasal aşınma. Bu aşınma türleri arasında en sık görülenleri ise aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

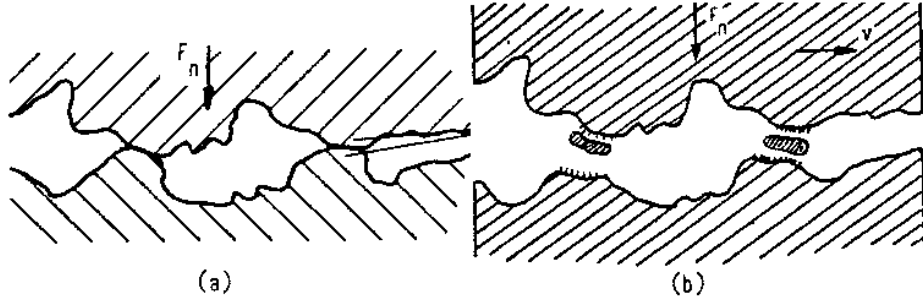


Şekil 4.1 En sık karşılaşılan aşınma türleri

4.2 Aşınma ve Çeşitleri

4.2.1 Adhezif Aşınma

Temas halinde bulunan yüzeyler arasındaki çekim kuvvetleri adhezyon aşınmasını meydana getirir. Çekim kuvvetleri iyonik, kovalent, metalik veya Van der Waals kuvvetleri olarak adlandırılabilir (Şekil 4.1 a, b).



Şekil 4.2 Kaynak bağlarının kopması ve adhezif aşınma (merkezi yağlama sistemleri/ adhezif aşınma)

Bir malzeme ne kadar iyi bir işlenme yüzeyine sahip olsa da ayna gibi bir görüntüsü dahi olsa moleküler düzeyde hiçbir zaman istenilen düzgünlükte olmayacaktır. Bu şekilde ki yüzey görünüşlerinde ise temas alanından daha az olan gerçek temas etme noktalarında, taşınma halinde olan yükün de etkisiyle malzemenin akma sınırı aşılmakta ve gerçek temas alanı bu yükü taşıyabilecek genişliğe ulaşıncaya dek artmaktadır. Böyle bir plastik deformasyon ile beraber yüzeysel kaymalar oluşabilir (Sarı, N. 1998).

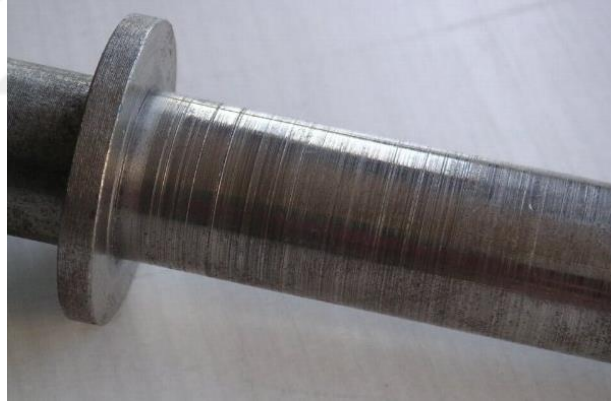


Şekil 4.3 Kam mili üzerindeki adhezyon aşınma örneği (Wikipedia, Adezyon aşınması 2013)

4.2.2 Abrazif Aşınma

Pratikte çizilme aşınması olarak da bilinir. Birbirine göre bağıl hareket eden iki cismin yüzeyleri arasına yabancı parçacıklar girebilir. Bu parçacıklar çalışma esnasında yüzeylerde kesik ve çizik oluşturabilir. Buda aşınmaya sebep olur. Bu yabancı parçacıklar zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki oluşturarak eğeleme ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının açığa çıkmasına neden olur. Bu sebeple, bu aşınma türünde en önemli noktalardan birisi cisimlerin yüzey sertliğidir. Abrazyon aşınmasında önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Yüzey sertlikleri ısıtıl işlem ve çeşitli yüzey kaplamaları sayesinde iyileştirilebilir.

Bu tarz aşınma türlerini engellemek için alınabilecek önlemler şu şekilde sıralanabilir: Yabancı madde girişlerini engellemek için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalı, malzeme yüzeyleri sertleştirilebilir, belirli periyotlarda bakım yapılarak sistem temizlenmelidir.



Şekil 4.4 Bir mil üzerinde abrazyon aşınması sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü (Abrazyon aşınması 2013, Wikipedia).

4.2.3 Yorulma Aşınması (Pitting)

Bu aşınma türünün görüldüğü yüzeylerde minik çukurcuk oluşumları meydana gelir. Bu aşınma genelde yuvarlanma hareketi yapan parça yüzeylerinde malzeme yorulması olarak meydana gelir. Kam mekanizmaları, dişli çarklar, rulmanlar bunlara örnek olarak verilebilir. Bu makine elemanlarında temas alanı küçük olduğu için Hertz yüzey basınçları oluşur. Bu yüzey basınçlarının etkisi altında yüzey altlarında kayma gerilmeleri oluşmaya başlar. Bu şekilde değişken zorlanma sebebiyle malzeme yüzeyinde yorulma başlar. Dislokasyon ve plastik deformasyon olaylarına bağlı olarak minik boşluklar meydana gelir. Belirli bir zaman içerisinde bu oluşan minik boşluklar yüzeye doğru hareket eder, büyür ve yüzeyde çukurcuklar meydana getirir. Bu esnada yüzeyler arasında oluşan yağ tabakasının etkisi de çok önemlidir. Yüksek basınçlar altında yağın oluşan çatlak ve çukurlar içerisine girmesi, oluşan çatlak ve çukurların daha çok büyümesine sebep olabilir (Akkurt, 1982).



Şekil 4.5 Sonsuz vida karşı çarkında meydana gelen yorulma aşınması (Triboloji 2013, Wikipedia).

4.2.4 Kaviteasyon Aşınması

Kaviteasyon bir sıvı içerisinde, sıvı üzerine etki eden kuvvetler sonucunda, sıvı içermeyen bazı özel bölgelerin (Boşlukların veya kabarcıkların) oluşmasıdır. Bir sıvının hızlı basınç değişikliklerine maruz kalması, basıncı sıvı basıncından nispeten daha düşük olan bu özel bölgelerinin oluşumuna neden olur. Sıvının yüksek basıncına maruz kalındığında bu boşluklar şiddetle içeriye çekilip patlayabilir ve bir şok dalgası da oluşturabilirler. Oluşan bu şok dalgası ve ani basınç değişiklikleri metale zarar verir kısa bir süre içerisinde kaviteasyon sebebiyle komponent kullanılamaz hale gelir.



Şekil 4.6 Bir santrifüj pompada kaviteasyon sonucu oluşan aşınma. (Wikiwand)

4.2.5 Koroziyon Aşınma

Temas yüzeylerinin kimyasal ve elektrokimyasal olarak tahrip olmasına korozyon denir. Metal ve alaşımları ile bulundukları ortam arasında kimyasal, elektrokimyasal ve metalürjik ilişkiler neticesinde yüzey yapısında çeşitli katmanlar oluşur. Sürtünen bu yüzeylerdeki tabakaların kolayca parçalanarak yüzeyden atılmasına koroziyon aşınma adı verilir. (insapedia)

4.2.6 Erozyon Aşınması

Erozyon ile aşınma bir nevi abrazyon aşınmaya benzer. Katı parçacık ve sıvı damlalarının yüksek hızda bir yüzeye çarpıp o yüzeyi aşındırmasıyla oluşur. Aşınma oranı, harici elemanların hız ve saldırı açısına bağlıdır. Yüksek saldırı açılarında ana malzemeyi deforme ederek üzerinden parça kopartabilir. Bu tarz durumlarda darbeden kaynaklı oluşabilecek deformasyonları engellemek için darbeye dayanıklı malzemeler kullanmak gerekebilir (wedwolf/ erozyon).



Şekil 4.7 Çöl ortamında rüzgarın sebep olduğu bir erozyon (Wikiwand)

4.2.7 Tabaka ve Yenme Aşınması

Önceden de bahsedildiği gibi metal yüzeyleri hava ile tepkimeye girerek oksit tabakaları meydana getirir. Bu tabakalar aşınmanın şiddetli olmasını engeller. Buna karşın ortamda kimyasal madde varsa metal yüzeyler ortamdaki bu maddeler ile tepkimeye girip sert ve ince tabakalar meydana getirir. Farklı yükler altında çalışan parçaların yüzeyindeki bu sert tabakalar kırılarak yüzeyden uzaklaşır. Geriye kalan temiz yüzeyde tekrar tepkimeler ve sert tabakalar oluşur ve aynı şekilde kırılarak tekrar yüzeyden uzaklaşır ve bu olay sürekli devam eder. Bu tür olaylara tabaka aşınması, oksidasyon aşınması veya sürtünme oksidasyonu adı verilir. (insapedia)

5. KATMANLI ÜRETİM VE ÇEŞİTLERİ

5.1 Katmanlı Üretim

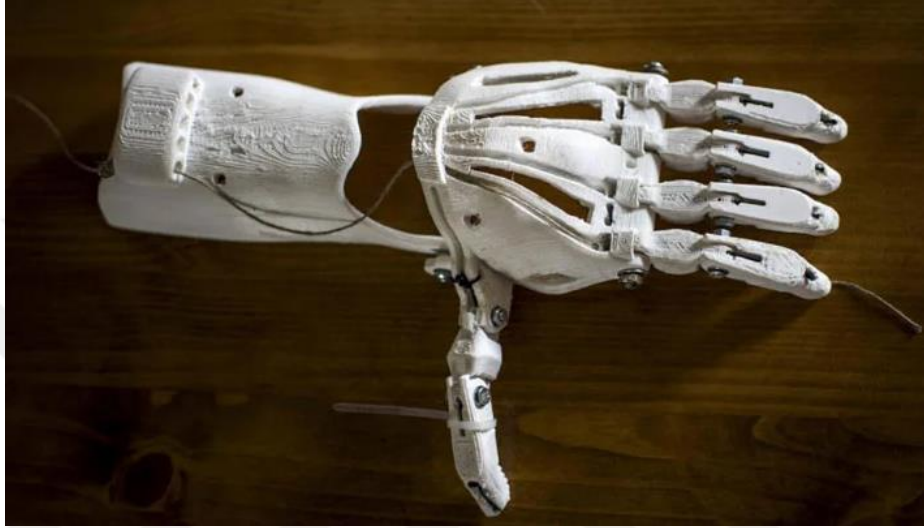
Katmanlı üretim, uzun zamandır kullanılan üç boyutlu yazıcılar ile yapılan hızlı prototipleme aşamasının gelişmiş ve endüstriyel anlamda işlevselleşmiş hali olarak tanımlanabilir. Endüstriyel üretim aşamaları, özellikle karmaşık ve çok fonksiyonlu ürün yapma sürecinde giderek uzayabiliyordu. Ancak hızlı prototipleme ve 3 boyutlu üretim ile multifonksiyonel ürünler oluşturmak daha kolay ve düşük maliyetli bir hale dönüştü. Katmanlı imalat nedir sorusuna verilebilecek en kısa cevap, 3 boyutlu yazıcılarla hızlı protatipleme yapılarak endüstrinin geliştirilmesi olabilir. Eklemeli imalat olarak da bilinen katmanlı üretim, endüstriyel süreçlerin tümünü hızlandırdığı gibi ürün maliyetleri, giderleri ve fire sayısını da azaltıyor.

Endüstriyel üretim, hayatımızın her alanında yer alırken günümüzde işlevsel, kolay taşınabilir ve başarılı bir dizayna sahip olan ürünler her zaman daha fazla dikkat çekiyor. Tasarım endüstriyel süreçlerin tümünde önemli bir yer oynadığı gibi dizayn ile fonksiyonelliği birleştirmek uzun bir süreç gerektirebiliyor. 3 boyutlu yazıcılar sayesinde tasarım ve işlevsellik aşaması hızlı prototipleme ile kolaylaştığından endüstriyel ürünlerin hem işlevselliği hem de tasarımında önemli iyileştirmeler yapılabilir.

Katmanlı üretim, tasarım ve imalat aşamasında birçok avantaj sağlıyor. Aynı zamanda üretim süreci boyunca oluşan maliyetlerde, katmanlı imalat teknolojisinde daha düşük 3 boyutlu üretimin avantajları şöyle:

- 1- Hızlı prototipleme ve optimizasyon yapma imkanı sağlar.
- 2- Kompleks parçaları üretme olanağı sağlar.
- 3- Katmanlı imalat yöntemleri ile fonksiyonel parçalar üretilebilir.
- 4- Üretim esnasında ki esnekliği sayesinde klasik yöntemlere göre daha fazla enerji tasarrufu sağlar.

- 5- Kompleks parçalar üretilebildiği için daha yaratıcı ve esnek çalışmalar yapmaya imkan verir.
- 6- Ürünlerdeki fire sayısı katmanlı üretim sayesinde düşerken, üretim maliyetleri ve giderlerde azalır.
- 7- Karmaşık veya multifonksiyonel imalatlar yapmayı kolaylaştırır. Ürünlerin daha kullanışlı ve düşük ağırlıkta olmasını sağlar.



Şekil 5.1 Katmanlı üretim ile oluşturulmuş el (webtekno)

Katmanlı üretim teknolojileri, günümüzde giderek daha yaygın olarak kullanılıyor. Endüstriyel anlamda, üretim ve geliştirme süreçlerini büyük ölçüde değiştiren katmanlı üretim, hızlı prototipleme sistemleri ile model uygulamalarını da geliştiriyor. Fonksiyonel ürünler yaratma ve ürünlerin uyumluluğunu ölçme aşamasında gereksiz masraf yapmadan hızlı prototipleme sayesinde üretim aşamaları hızlandırılabilir.

Katmanlı imalat yöntemleri içerisinde 3 boyutlu üretim sağlayan yazıcılar büyük önem taşıyan 3 boyutlu yazıcılar ile kavramsal ürün denemeleri kolaylıkla yapılabilir. Aynı zamanda giderek geliştirilen üç boyutlu yazıcılar sayesinde portatif ürünlerin yanı sıra, büyük yapılar dahi oluşturulabilir.

Endüstriyel üretim aşamalarında devrim yaratan katmanlı üretim, kişisel üretimlerde de kullanılabilir. Üç boyutlu yazıcı maliyetlerin çok yüksek olmaması, bireysel tasarımcılara büyük bir imkan sağlıyor. Medikal ve tıp alanında, yapı

sektöründe veya teknolojik ürünlerde yaygın biçimde kullanılan katmanlı üretim sayesinde tasarım ve üretim süreçleri tamamen değişiyor. Yüksek maliyetlerle oluşturulan endüstriyel üretim alanlarının yerini, az yer kaplayan ve düşük maliyetle üretim yapan 3D yazıcılar alıyor.



Şekil 5.2 Katmanlı üretim ile yapılan mega şato (TechCrunch)

Birçok AM proses türü vardır, ancak hepsi aynı temel prensipte çalışır. Önce istenen nesnenin 3B olarak bilgisayar ortamında tasarımı yapılmalıdır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) için çok sayıda yazılım paketi mevcuttur. CAD görüntüsü bir .stl dosyası olarak saklanır. .Stl file, 1987 yılında 3D Systems Inc. tarafından Stereolitografi teknolojisine yardımcı olmak üzere tasarlanmıştır ve "stl", Standart Mozaik Dilinin kısaltmasıdır (K.V Wong & A Hernandez, 2012). Sonraki hazırlık adımı, 3B CAD görüntüsünün katmanlara dilimlenmesidir. Günümüzde .stl uzantısı herhangi bir AM makinesi için standart formattır. Dosya oluşturulduktan sonra, parçayı oluşturacak olan AM makinesine katmanlı üretime başlaması için gönderilir (S Huang, 2013).



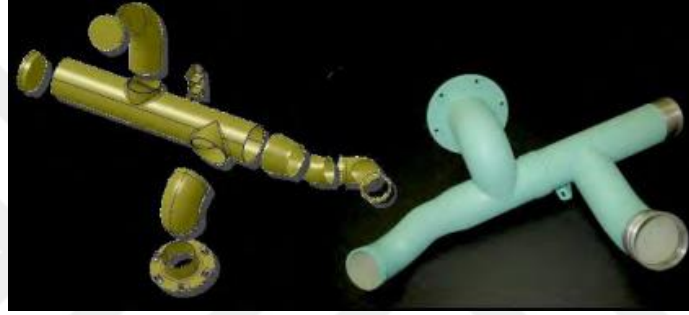
Şekil 5.3 Katmanlı üretim proses süreci (E&M Magazine-N. Kara)

Katmanlı üretimin son yıllarda kullanıcılara ve endüstriye sağlamış olduğu avantajlar sayesinde fonksiyonel ve alternatif çözüm amacıyla kullanımı gittikçe artmaktadır. Talaş kaldırma yerine katman katman malzeme ekleme metoduyla üretim gerçekleşir. Bu şekilde yapılan bir üretimin getirmiş olduğu dezavantajlardan bir tanesinde yüzey pürüzlülüğü ve kalitesidir. Havacılık sanayilerinde yüksek yüzey hassasiyeti ve kalitesinin gerektirmiş olduğu uygulamalarda katmanlı imalatın ardından ek olarak ikinci bir proses gerekebilir. Bunlar için çeşitli örnekler verilebilir; örneğin malzeme içerisinde üretimden kaynaklı oluşan boşluklu yapıların azaltılması için sıcak izostatik presleme, ya da yüzey pürüzlülüğü ve hassasiyetinin arttırılması için yüzey üzerinden istenilen ölçüde talaş kaldırılarak istenilen ölçü ve hassasiyete getirilebilir. Bu tarz uygulamaların gerçekleştirilebilmesi için hem katmanlı üretim hem de istenilen yüzey kalitesinin gerçekleştirilmesi gibi talaşlı imalat gereksinimleri melez üretim yöntemlerini açığa çıkarmıştır.

Katmanlı üretim teknolojileri kullanılarak üretilen bazı prototip ve modeller aşağıda resim olarak eklenmiştir.



Şekil 5.4 Uçaklarda kullanılan motor kapak menteşesinin geleneksel ve katmanlı üretim metoduyla üretilmiş birer örneği (E&M Magazine-N. Kara)



Şekil 5.5 İklimlendirme sistemleri için kullanılan katmanlı üretim yoluyla imal edilmiş borular (E&M Magazine-N. Kara)



Şekil 5.6 Katmanlı üretim teknolojisi ile batch halinde üretilen numuneler (E&M Magazine-N. Kara)

Çok sık kullanılan 3D baskı teknolojileri “katmanlı imalat teknolojileri” olarak da isimlendirilir. 3D yazıcı teknolojileri kullanılan gerçek mühendislik malzemelerinden farklı geometrilerde prototiplerin üretilmesine olanak sağlar. Bu teknoloji ile üretime destek yardımcı ekipmanlar, kullanıcı ürünleri ve seri üretim öncesi prototip ürünler üretilmesine de olanak sağlar. Klasik yöntemlerde malzeme işleme sonrasında uygulanan boyama, kaplama ve partlatma gibi yüzey işlemleri FDM teknolojisi ile üretilmiş parçalara da uygulanabilir.

Özellikle plastik parçaların çok sık ve yaygın olarak kullanıldığı otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayii başta olmak üzere birçok farklı sektörde birçok farklı ihtiyaçları karşılayabilmek adına endüstriyel sektörde sıklıkla kullanılır.

Aynı zamanda FDM teknolojisi endüstriyel alanda kullanılan mühendislik malzemeleri ile birlikte termal, mekanik ve kimyasal testlerde kullanılabilecek prototipler üretmeye de olanak verir. Bu teknoloji sayesinde yüksek ısı ve sıcaklığa dayanıklı, kimyasal açıdan daha stabil bu ve buna benzer iyileştirilmiş mekanik, fiziksel ve kimyasal malzeme özelliklerini bir araya getirmek içinde kullanılabilir.



Şekil 5.8 Katmanlı üretim metodu ile yapılmış dişli kutusu (poligonmühendislik)

FDM teknolojisi parça üretimlerini klasik imalat yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve esnek bir şekilde gerçekleştirerek zamandan tasarruf sağlar. Birçok farklı boyutta ve yüksek doğrulukta parçalar üretilebilir. Daha kompleks parçaların üretiminde esneklik sağlayarak klasik imalat yöntemlerinin üretim kısıtlamalarını ortadan kaldırarak montaj parça sayısını azaltılmasına imkan verir. Kısaca 3D modelleri kompleks şekle dahi sahip olsa bile FDM metoduyla kolayca üretilebilir. Bu parçaları üretirken katman kalınlıklarını ihtiyaç duyulan hassasiyete göre belirlenebilir, ihtiyaç duyulan iç doluluk oranını değiştirebilir ve tamamen esnek yapıda üretimler gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.9 Wolkswagen 3D printed araba parçası (VWvortex)

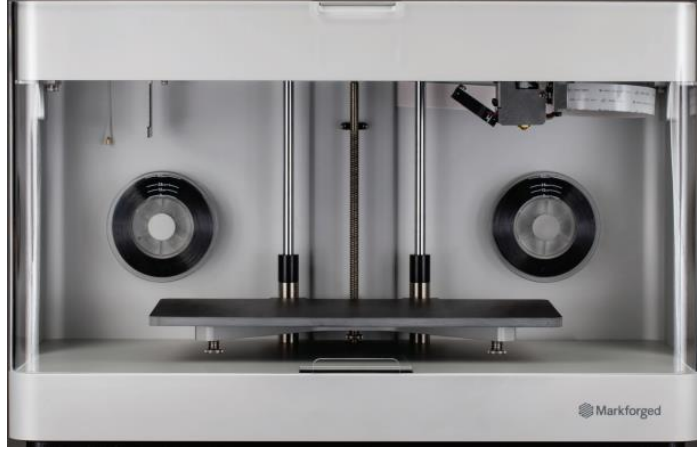
6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Makine imalatı ve makinelerde kullanılan parçaların bulunduğu çalışma koşulları göz önünde bulundurularak istenilen en önemli malzeme özelliklerinden birisi de sürtünmeye karşı direnç ve aşınma dayanımıdır. Günümüzde 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak katmanlı üretim gerçekleştirilmiş, gelişen ve değişen teknoloji ile ortaya birçok farklı termoplastik polimer malzeme ortaya çıkmıştır. Kullanılan termoplastik malzemelerin aşınmaya maruz kaldığı durum ve koşullarda nasıl bir performans göstereceğinin önceden bilinmesi gerekir. Bu deneysel çalışmada; White Nylon, ONYX, ONYX FR olacak şekilde 3 farklı malzemenin tribolojik davranışları test edilmiştir. Kullanılan malzemelerin 1 m/s ve 2 m/s hızla, 2000 metre kayma mesafesinde, 67N ve 92N olacak şekilde farklı yüklerde ki hız ve yük farklılıklarının aşınma davranışları üzerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

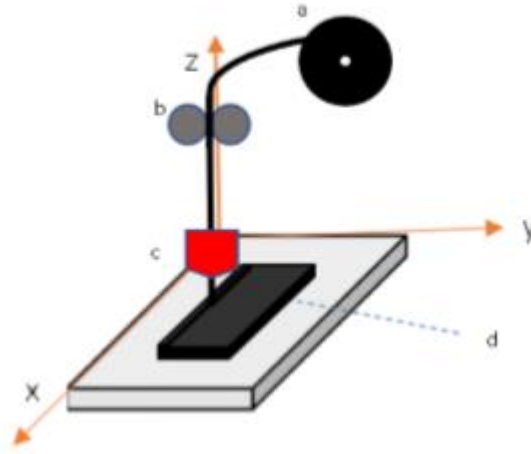
6.2 Numune Üretim Metodunun Belirlenmesi ve Üretimi

Bu tezde test numunelerinin üretimi için Markforged® Mark-Two 3D yazıcısı kullanılmıştır. Malzemelerin içerisine herhangi bir şekilde ilave bir takviye malzemesi kullanılmamıştır. Saf %100 kullanılan kendi malzeme bileşeninden üretilmiştir.



Şekil 6.1 Markforged® Mark-Two kompozit ve polymer üretebilen hava geçirmez 3D yazıcı (Markforged®)

İlk olarak, numunenin bir 3D modeli Autodesk Inventor Professional 2020'de modellendi ve dosya STL dosyasına dönüştürüldü. STL dosyası, eklemeli üretim makineleri tarafından yaygın olarak kullanılan dosya türüdür. STL dosyası, 3D CAD modelinin örgüsüz modelini içerir. Bu 3D model daha sonra "Eiger" adlı bir dilimleme yazılımı ile çalışma düzlemine paralel olarak ince katmanlara dilimlenir. Çalışma düzlemi, Şekil 3-1'de gösterildiği gibi XY düzleminde bulunur. "Eiger", Markforged® 3D yazıcı üreticisi tarafından geliştirilmiş, ücretsiz olarak bulunabilen çevrimiçi bir bulut tabanlı yazılımdır. Bu çalışmada, STL dosyası olarak sağlanan 3D modeli birkaç ince katmana kesmek için bu dilimleme yazılımı kullanılmıştır. Dilimleme sırasında, dilimleme yazılımı, sağlanan ayarlara göre her katmandaki takım yolu, katman kalınlığı, lif yönlendirme açısı, lif katman sayısı, dolgu yoğunluğu, desen türü, toplam katman sayısı ve malzeme türü hakkında bilgi üretir. Bu bilgi, yazdırma sırasında 3D yazıcı tarafından bir komut olarak kullanılır.



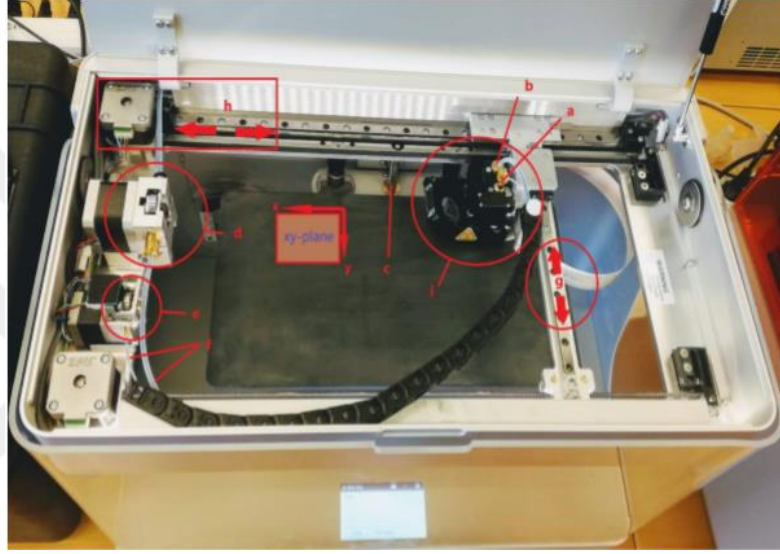
Şekil 6.2 Baskı şeması a)filament malzemesi, b)motor beslemesi, c)Hot-Nozzle, d)XY ekseninde ekstrüde edilen malzeme (Ghebretinsae, 2019)

Katmanlı üretim teknolojisi arasında, Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF), Stereolithography (SLA) ve Selective Laser Sintering (SLS), 3D baskı teknolojileri yaygın olarak kullanılan teknolojiler olduğunu önceki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştı. Bu çalışmada kullanılan 3D yazıcı FFF teknolojisini kullanmaktadır.

Test örnekleri, Markforged® Mark-two 3D yazıcı kullanılarak FFF teknolojisi ile üretildi. Mark-two, FFF ve Sürekli Filament Üretimi (CFF) teknolojisinin kombinasyonundan yararlanan, kompozit malzemeler için kompakt bir 3D yazıcıdır. Karbon Fiber (CF), Cam Elyaf (FG), Kevlar ve Yüksek Mukavemetli Yüksek Sıcaklık fiberglas (HSHT) gibi sürekli elyafı naylon veya Onyx matris içine serme kabiliyetine sahiptir. Mark-Two 3D yazıcının iki nozulu vardır, her tür malzeme için bir nozul. Fiber nozul 0,9 mm genişliğinde iken, termoset matris faz nozulu 0,4 mm genişliğindedir. Numunelerin üretilmesi için, "Onyx®" adı verilen, kesik karbon fiber ile güçlendirilmiş naylon polimerin içine sürekli bir karbon fiber yerleştirilir. Mark-Two 3D yazıcı, filamentleri karbon fiber için yaklaşık 272°C olan cam geçiş sıcaklığına (Tg) ısıtır ve onu sıcak nozullardan geçirerek XY düzleminde katman katman bir bileşen oluşturur.

Onyx, mikro kesikli karbon fiber ile güçlendirilmiş bir naylon polimerdir. Neme duyarlı bir malzemedir ve kuru depolanmalıdır. Polimer matris malzemesi,

Mark-Two'daki küçük tüpler aracılığıyla kuru bir kutudan kademeli motora nozüle beslenir. Bununla birlikte, bir süre kullanılmamışsa, step motor içinde nemin gözlemlenmesi olasılığı vardır. Daha sonra herhangi bir ıslak plastik filament çıkarmak için bir temizleme baskısı yapmak önemlidir. 3D yazıcı, bir süre kullanılmamışsa, yeni parçaları yazdırmaya başlamadan önce genellikle bir tasfiye baskısı alır. Ayrıca baskı sırasında malzeme değiştirirken nozül içinde kalmış olan malzemeleri de çıkarır. Ancak, yeni bir parça yazdırmak için sipariş vermeden önce, temizleme testini ayardan manuel olarak gerçekleştirmek önemlidir.



Şekil 6.3 Markforged® Mark-Two 3D Yazıcının İç Detayları (Ghebretinsae, 2019)

- a) Fiber besleme Nozzle'u,
- b) Plastik besleme Nozzle'u,
- c) Z eksen hareketi için kullanılan step motor,
- d) Plastik besleme motoru,
- e) Fiber besleme motoru,
- f) Filament taşıma tüpleri,
- g) Y eksen hareketi için kullanılan step motor,
- h) X eksen hareketi için kullanılan step motor,
- i) Yazdırma başlığı,

Yazıcı kafası, Şekil 6-3'de gösterildiği gibi hem x hem de y yönünde kayış ve itme sistemleri tarafından belirli bir hızda yatay xy düzleminde hareket eder. Kademeli bir motor, çalışma yatağını tek katmanlı bir kalınlıkta z yönünde hareket ettirir. Katmanın kalınlığı, Eiger yazılımında belirtilen şekilde uygulanır. İmalat sırasında Mark-Two, malzemenin ekstrüzyonu için her seferinde bir nozul kullanır ve ekstrüzyon hızı, filamentin türüne ve erime hızına bağlıdır. Bu ayarlar, üretici tarafından Mark-Two 3D yazıcıda önceden tanımlanmıştır ve kullanıcının bunları değiştirme imkanı yoktur.

Yazıcı, z yönünde katman üzerine katman oluşturan 100-200 mikronluk katman çözünürlüğü sağlar. Takviye malzemesi olarak karbon elyaf kullanılırsa elde edilebilecek en iyi çözünürlük 125 mikrondur. Ayrıca, yazıcının x- ve y-yönünde +0,05 mm'lik bir toleransı vardır. 3D yazdırılmış bileşenler, çalışma düzlemi boyunca düzlem içine (z eksen) göre daha güçlüdür. 3D yazıcı, sürekli fiberi yalnızca XY düzlemine yerleştirebilir. Bu nedenle, tasarım ve baskı sırasında sistematik tasarım yönlendirmesi gereklidir. Bileşenin mukavemeti ve sertliği fiber malzemeye önemli ölçüde bağlı olduğundan bu değerlendirme çok önemlidir. Bu çalışmada, ilave takviye malzemesi kullanılmamıştır.

6.3 Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

MATERIAL DATASHEET



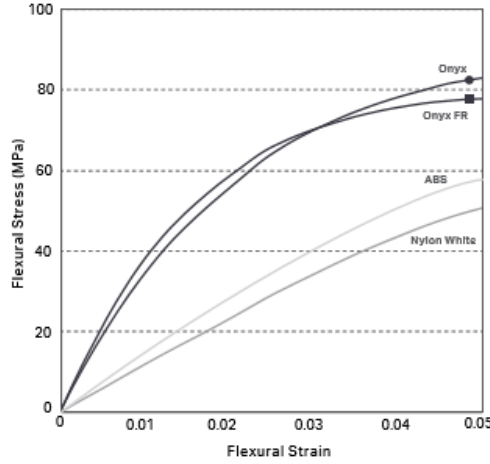
Composites

Plastic Matrix	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Nylon W	Dimensions and Construction of Plastic Test Specimens: - Tensile test specimens: ASTM D638 type IV beams - Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H) - Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B) All Markforged composite machines are equipped to print Onyx. Nylon White is available on the Mark Two and X7. Onyx FR is available on X3, X5, and X7. Markforged parts are primarily composed of plastic matrix. Users may add one type of fiber reinforcement in each part, enhancing its material properties. 1. Measured by a method similar to ASTM D790. Thermoplastic-only parts do not break before end of flexural test. 2. Onyx FR is UL 94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm.
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4	1.3	1.7	
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36	29	51	
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25	33	4.5	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30	31	36	
Tensile Strain at Break (%)	D638	58	58	150	
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	81	79	50	
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.6	4.0	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	41	
Flame Resistance	UL94	—	V-0 ²	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	110	
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.1	
Fiber Reinforcement	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar*	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140	192
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600	3100
Density (g/cm ³)	—	1.4	1.2	1.5	1.5

Tablo 6.1 Markforged® Mark-Two 3D Yazıcısında üretilen malzemelerin teknik özellikleri (Markforged® Rev. 3.2-9/9/2019)

Plastic Matrix

In Fused Filament Fabrication (FFF), a printer heats thermoplastic filament to near melting point and extrudes it through its nozzle, building a plastic matrix layer by layer. Plastics can be reinforced by any one type of fiber.



● Onyx Flexural Strength: 81 MPa

Onyx is a chopped carbon fiber reinforced nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

■ Onyx FR Flexural Strength: 79 MPa

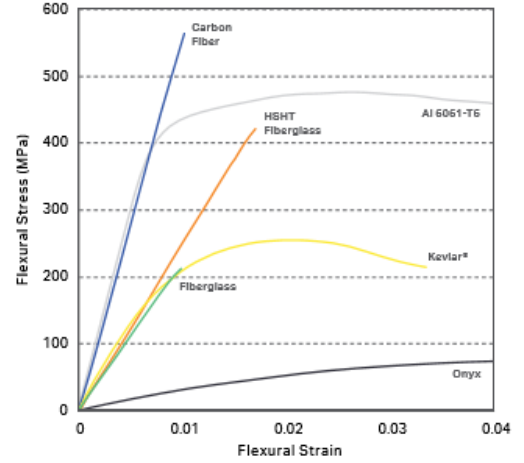
Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

● Nylon White Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

Fiber Reinforcement

Continuous Filament Fabrication (CFF) is proprietary technology that reinforces plastic printed parts with continuous fibers on each layer of a part. Users can control the layers reinforced, amount, orientation, and type of reinforcing fiber.



● Carbon Fiber Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. It's 18 times stronger and 18 times stiffer than Onyx. Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

● Fiberglass Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

● Kevlar® Flexural Strength: 240 MPa

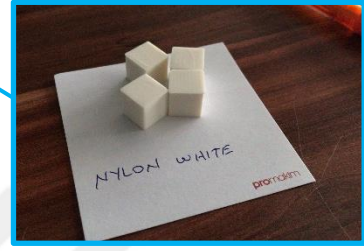
Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

● HSHT Fiberglass Flexural Strength: 420 MPa

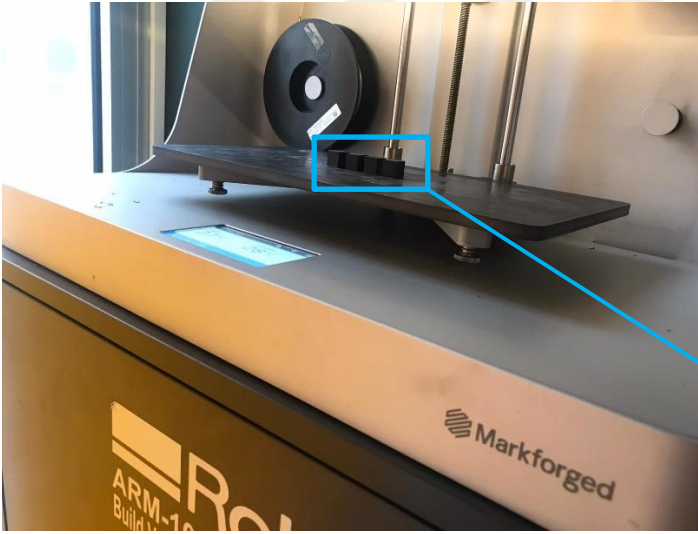
High Strength High Temperature (HSHT) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.

Şekil 6.4 Malzemelerin bükülme mukavemeti (Markforged® Rev. 3.2-9/9/2019)

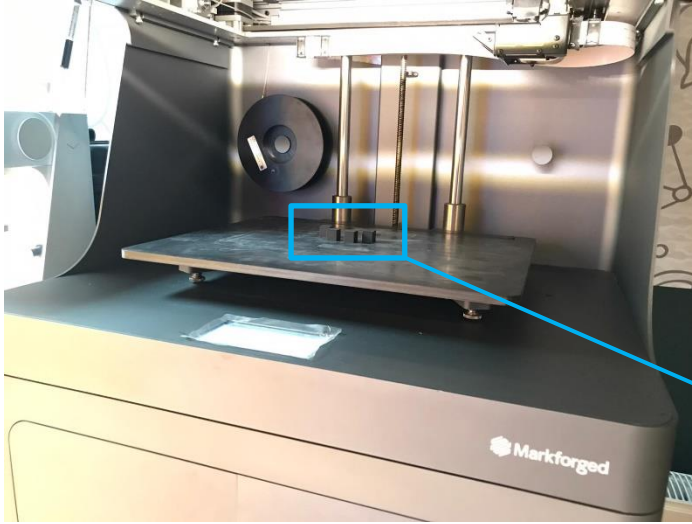
Bu çalışmada ele alınan White Nylon ve ONYX Markforged® Two makinesinde ONYX FR ise Markforged® X7 makinesinde PROMAKİM firması tarafından üretilmiştir. Üretilcek olan malzemelerin teknik özellikleri şekil 6.4 ve 6.5'te firma tarafından Rev. 3.2-9/9/2019 şeklinde belirtildiği gibi verilmiştir.



Şekil 6.5 Markforged® Two Nylon White Numune Üretimi (PROMAKİM)



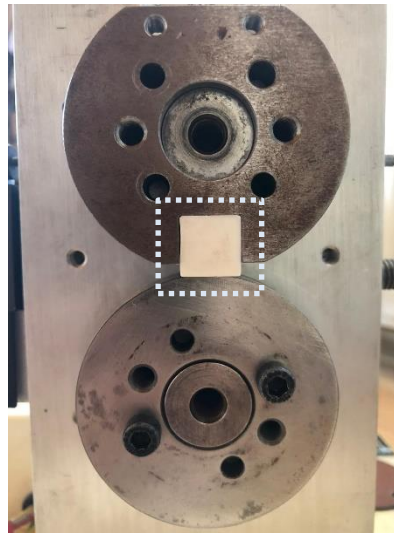
Şekil 6.6 Markforged® Two ONYX Numune Üretimi (PROMAKİM)



Şekil 6.7 Markforged® X7 ONYX-FR Numune Üretimi (PROMAKİM)

Deneyler TE53 çok amaçlı aşınma ve sürtünme test cihazıyla yapılacak ve test numunelerinin cihaza istenilen oryantasyonda bağlanabilmesi için en, boy ve yüksekliklerinin 12.7 milimetrelilik küp formunda olması gerekmektedir. Bu sebeple 3D yazıcı için hazırlanan stl dosyası içerisindeki hazırlanan üç boyutlu tasarım geometrisinin ölçüsü yani eni boyu ve yüksekliği 12.7mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

Deney numunesinin TE53 çok amaçlı sürtünme ve aşınma test deneyi üzerine bağlanmış hali (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Test numunesinin TE53 Çok amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazı üzerine bağlanmış bir örneği

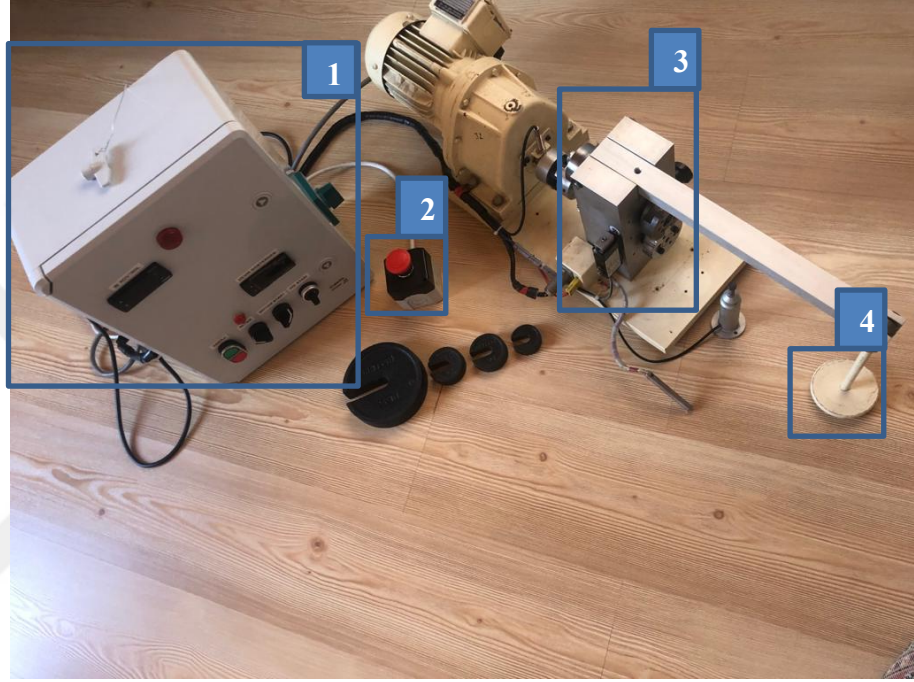
Deneyler için yeteri kadar numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin birbirlerine karışmalarını engellemek için kullanılan malzeme isimleri ve deney sonrası alınacak ölçümlerin kolayca takip edilebilmesi adına numunelere verilen numaralar kilitli poşet üzerine yazılmıştır. (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 Üretilen tüm polymer malzemelerin 12,7x12,7x12,7 mm'lik küpler şeklinde elde edilmesi ve kilitli poşetlerle muhafaza edilmesi.

6.4 Deneyin Yapılışı

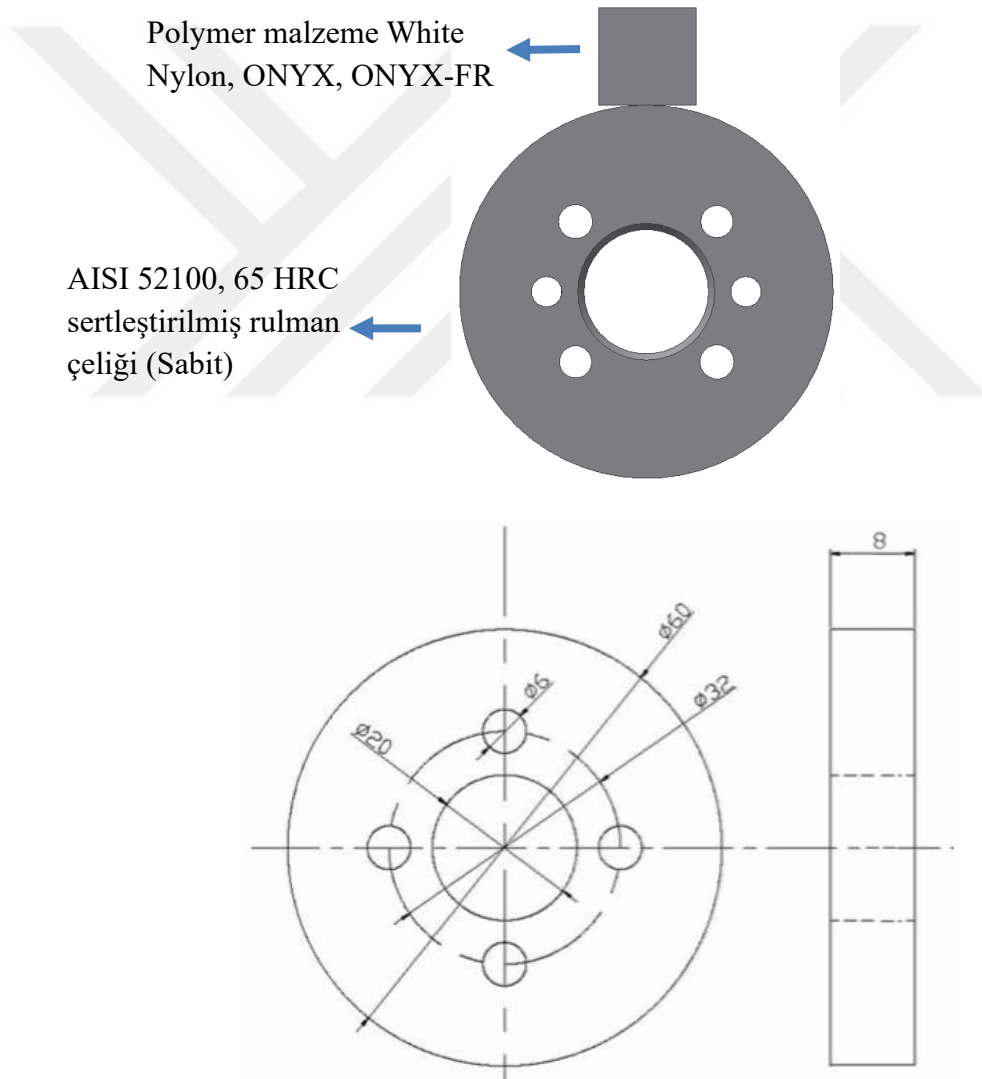
Yapılan deneysel çalışmalarda TE53 çok fonksiyonlu sürtünme ve aşınma deney cihazı kullanılmıştır (ekil 6.10).



Şekil 6.10 Deney cihazının şematik gösterimi

Resimde de işaretlenen kısımlar soldan sağa doğru; kontrol paneli (1), acil durdurma düğmesi (2), test numunesinin cihaz üzerinde takıldığı yer (3) ve son olarak da ağırlıkların deney cihazına eklendiği kısım (4) olarak belirtilebilir. Resimde dört numara ile belirtilen manivela kolunun üzerine farklı yükler uygulanarak numune üzerindeki sürtünme ve aşınma değerleri polymer malzemeler için kullanılan formüller aracılığı ile ağırlık kayıpları hesaplanarak bulunabilir. Kontrol nitesiyle kayma hızı kontrol edilebilir ve farklı kayma hızlarında ki sonuçlar gözlemlenebilir. Kayma mesafesi çevrim sayısı olarak hesaplanır.

Farklı konfigürasyonlarda aşınma testi gerçekleştirilebilir. Bunlardan birkaçına örnek verecek olursak; block-on-roller, yani disk üzerinde blok ve roller-on-roller, yani disk üzerinde disk yöntemleri verilebilir. Yapılan bu deneysel çalışmada ise block-on-disc yöntemi kullanılarak kullanılan malzemelerin aşınma testleri yapılmıştır. Dönme hareketi redüktörlü motor tarafından gerçekleştirilerek aşındırıcı disk bu redüktörlü motora bağlı mil üzerinde yer almaktadır. Polimer malzeme tutucu aparat ise üst mile monte edilerek küresel yataklama elemanları sayesinde deney süresi boyunca numunenin aşındırıcı disk ile temasını, numune yüzeyine dik olacak şekilde ayarlanmıştır. Aşındırıcı disk ve numune arasında %100 kayma gerçekleşmektedir.



Şekil 6.11 Block-on-ring konfigürasyonu ve disk boyutları

Deney başlangıç şartlarının aynı olması deney sonrası elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi adına büyük önem taşır. Bu sebeple deney esnasında sürtünmenin etkisiyle aşındırıcı disk üzerinde açığa çıkan sıcaklık ve deney sonuçlarına etki edebilecek diğer faktörlerin etkilerinden kaynaklanabilecek hataların önlenmesi için her deney sonrası diskin soğuması için yeteri kadar süre beklenerek bir sonraki deney başlatılmıştır. Disk üzerinde ki sıcaklık kontrol panelinden kontrol edilmiştir. Deney öncesi başlangıç sıcaklıklarının aynı olduğundan emin olunarak bir sonraki deneye başlanmıştır. Aşındırıcı disk olarak 65 HRC sertliğinde AISI 52100 rulman çeliği kullanılmıştır. Disk çapı 60 mm, kalınlığı ise 8mm'dir (Şekil 6.11).

Deney esnasında uygulanan parametreler aşağıda ki gibidir;

- Normal yük: 67N ve 92N
- Kayma hızı 1 m/s ve 2 m/s

Deneyler yukarıda belirtilen deney parametreleri doğrultusunda 1000 metre kayma mesafesini sabit tutturabilmek için test süresi 16,58 ve 33,17 dakika olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde 1000 metre kayma mesafesi sabit tutulup bunu farklı yük ve hızlarda sağlayabilmek için iki farklı test süresi kullanılmıştır. Deney sonrası sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının hesaplanabilmesi için ağırlık kayıpları hassas terazide ölçülmüştür. Aşınma sonrasında oluşan sürtünmenin neden olduğu yüzey aşınmalarının görüntüleri KEYENCE ile çekilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Disk çapı: 0,06 metre

160 rpm, r =0,03 metre → 0,5 m/s

320 rpm, r= 0,03 metre → 1 m/s

Disk çevresi: $2 \cdot \pi \cdot r = 0,1884$ metre

$$N_{(rpm)} = \frac{60}{2\pi \times r} v_{(m.s^{-1})}$$

160 rpm, r =0,03 metre → 0,5 m/s

160 rpm yani 0,5 m/s hız için belirlenmesi gereken toplam test süresi;

$160 \cdot 0,1884 = 30,144$ metre (Bir dakika da katettiği mesafe)

$1000 / 30,144 = 33,17$ dakika (Toplam test süresi)

320 rpm, r= 0,03 metre → 1 m/s

320 rpm yani 1 m/s hız için belirlenmesi gereken toplam test süresi;

$320 \cdot 0,1884 = 60,288$ metre (Bir dakika da katettiği mesafe)

$1000 / 60,288 = 16,58$ dakika (Toplam test süresi)

Formüllerde belirlenmiş olan 1000 metre kayma mesafesi yapılan deneme ve literatür araştırmaları sonucunda belirlenerek kullanılan malzeme, hız ve yüklerde ki test süreleri belirlenmiştir.

Deney sonrasında malzemelerde oluşan ağırlık kayıpları kalibre edilmiş hassas terazide en az üç kere ölçülerek ve kenarında ki kapakları kapatılıp yalıtılmış bir ortamda doğruluğu emin olunacak şekilde ölçülmüştür (Şekil 6.12). Deney sonrası yüzeyin aşınma görüntüleri ise KEYENCE VHX 5000 cihazı tarafından çekilmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.12 Ağırlık kaybı ölçümlerinin yapıldığı hassas ölçüm cihazı



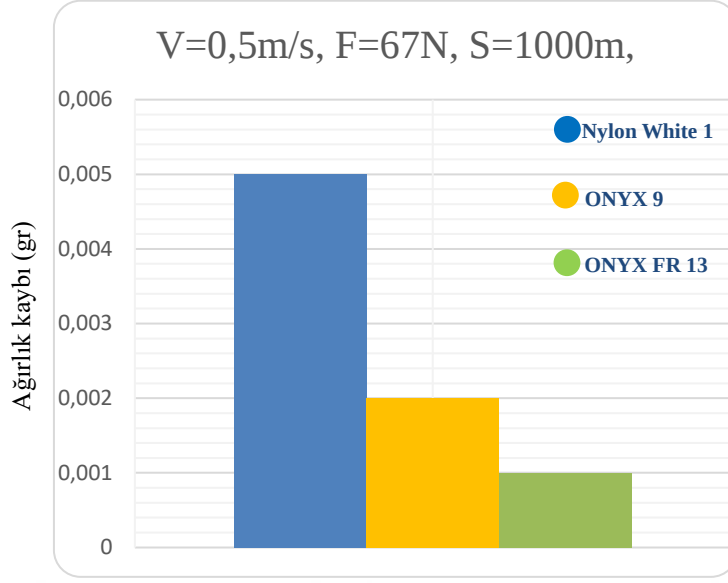
Şekil 6.13 Yüzey aşınması görüntüleri için kullanılan KEYENCE VHX 5000(Keyence)

6.5 Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Malzeme	Yük (N)	Hız ve Kayma Mesafesi	Test Süresi (dakika)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı Δm (g)	Aşınma Oranı
Nylon White 1	67	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,168	2,163	0,005	3,39213E-05
Nylon White 2	92	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,112	2,093	0,019	9,38735E-05
Nylon White 3	67	1 m/s, 1000m	16,58	2,108	2,1	0,008	5,42741E-05
Nylon White 4	92	1 m/s, 1000m	16,58	2,145	2,116	0,029	0,000143281
Onyx 9	67	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,248	2,246	0,002	1,24378E-05
Onyx 10	92	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,295	2,285	0,01	4,52899E-05
Onyx 11	67	1 m/s, 1000m	16,58	2,245	2,241	0,004	2,48756E-05
Onyx 12	92	1 m/s, 1000m	16,58	2,297	2,282	0,015	6,79348E-05
Onyx FR 13	67	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,289	2,288	0,001	6,21891E-06
Onyx FR 14	92	0,5 m/s, 1000m	33,17	2,299	2,295	0,004	1,81159E-05
Onyx FR 15	67	1 m/s, 1000m	16,58	2,279	2,277	0,002	1,24378E-05
Onyx FR 16	92	1 m/s, 1000m	16,58	2,29	2,279	0,011	4,98188E-05

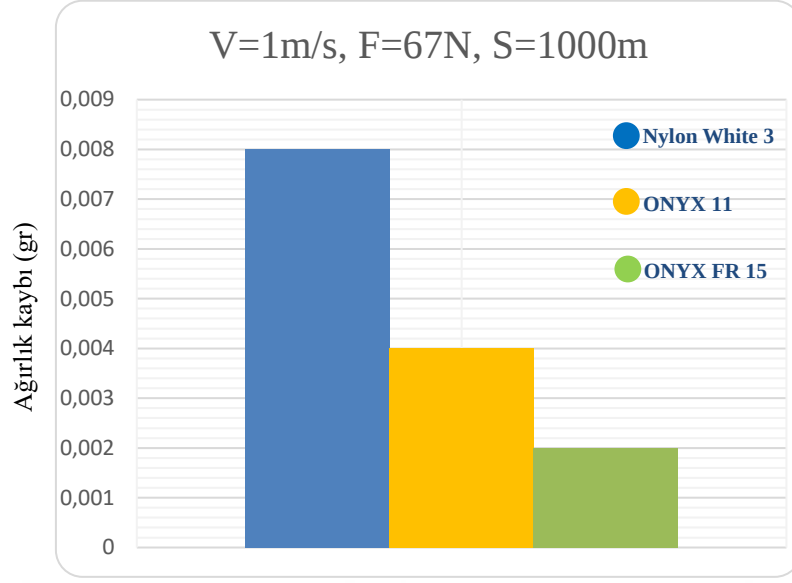
Tablo 6.2 Deneye tabi tutulan polimer malzemelerin belirlenen yük, hız ve kayma mesafesi altındaki ağırlık kayıpları ve buna bağlı olarak belirlenen aşınma oranları

Her malzeme tipi için farklı parametreler altında toplamda 12 tane deney gerçekleştirilerek her deney aşaması test 2 kez tekrarlanmış ve bunların ortalama değerleri alınmıştır. Deney sonrası numunelerin ağırlık kayıpları incelenmiş ve sonuçlarda aşırı fark olması dahilinde testler tekrardan gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası elde edilen verilerle birlikte çıkan sonuçlar kullanılan polymer malzemeler arasında kıyaslama yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar yorumlanmıştır. Öncelikle deney sonrası elde edilen ağırlık kayıpları sonuçları White Nylon, ONYX ve ONYX-FR arasında karşılaştırılacak. Ardından polymer malzemeler için kullanılan aşınma oranı formülü ile aşınma oranlarının nasıl bulunduğu detaylı bir şekilde formülize edilip gösterilecektir.



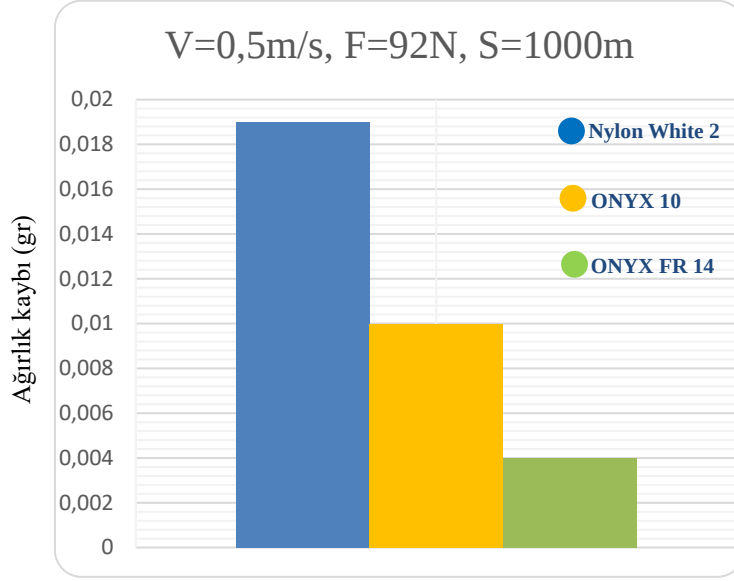
Şekil 6.14 Üç farklı polymer malzemenin 0,5m/s, 67N ve 1000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları

Şekil 6.14’de görüldüğü üzere 1000 metre kayma mesafesi sonrasında en düşük ağırlık kaybı ONYX-FR adlı malzemesinde olduğu görülmektedir. En fazla ağırlık kaybının ise Nylon White polymer malzemesinde olduğu görülür. ONYX polymer malzemesinde ki ağırlık kaybı ise White Naylon polymer malzemesinden düşük fakat ONYX FR malzemesine yakındır. Bu durumda düşük ağırlık ve düşük hızlarda ki sürtünme ve aşınma davranışlarını göz önünde bulundurarak kıyaslama yapacak olursak ONYX ve ONYX-FR polymer malzemelerinde ki ağırlık kayıpları birbirine yakındır.



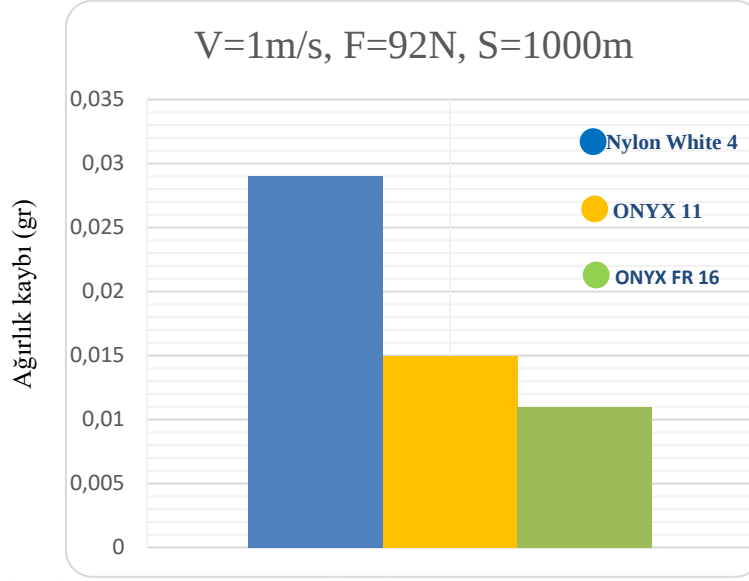
Şekil 6.15 Üç farklı polymer malzemenin 1m/s, 67N ve 1000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları

Şekil 6.15’de görüldüğü gibi diğer parametreler sabit tutulup sadece hız arttırıldığında ağırlık kayıplarının arttığını rahatlıkla gözlemleyebiliriz. ONYX-FR’da dramatik bir değişiklik görmezken ONYX ve Nylon White apırlık kayıplarında daha fazla artış olduğunu görebiliriz. 1000 metre kayma mesafesi sonrasında 67N yük ve 1m/s hızda ONYX ve ONYX-FR polymer malzemeleri arasında vvki ağırlık kayıpları yine birbirine yakındır. Tabi ki bu kullanılacağı yer ve uygulamaya göre değişkenlik gösterebilir. Bazı endüstriye uygulamalarda çok az bir ağırlık kaybı daha ciddi etkilere yol açabileceği gibi herhangi bir değişiklik göstermeyebilir. Bu noktada uygulanan alan ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.



Şekil 6.16 Üç farklı polymer malzemenin 0,5m/s, 92N ve 1000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları

Şekil 6.16’da görüldüğü gibi ele alınan 1000 metre kayma mesafesi sonrasında yük 67N’dan 92N’a çıkarıldığında en düşük ağırlık kaybı yine ONYX-FR adlı malzemesinde olduğu görülmektedir. En fazla ağırlık kaybının ise yine Nylon White polymer malzemesinde olduğu görülür. ONYX polymer malzemesinde ki ağırlık kaybı ise White Nylon polymer malzemesinden düşük fakat ONYX FR malzemesine yakındır. Fakat ağırlık kayıplarından da görüleceği gibi yük 67N’dan 92N’a çıkartıldığında dramatik bir değişiklik görülmektedir. Deney esnasında kullanılan yükün arttırılmasıyla ortaya çıkan sıcaklık artışı polymer malzeme üstünde daha fazla etkiye sebep olduğunu gözlemleyebiliriz. Bu sıcaklık artışı sebebi ile malzeme üzerinde oluşturduğu deformasyon ve aşınma sonrasında oluşan ağırlık kaybı en fazla White nylon’da görülmektedir. White Nylonu sırasıyla ONYX ve ONYX-FR takip etmektedir.



Şekil 6.17 Üç farklı polymer malzemenin 1m/s, 92N ve 1000 metre kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları

Yükün 92N’da sabit tutulup hızın 0.5 m/s’den 1 m/s hıza çıkartılması sonrasında ağırlık kayıplarında yine ciddi bir artış görülmektedir. Hızın arttırılmasıyla daha fazla sürtünme sebebiyle ortaya çıkan sıcaklık artışı polymer malzeme üstünde daha fazla aşınmaya neden olarak ağırlık kaybını attırdığı gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık artışı sebebi ile malzeme üzerinde oluşan deformasyon ve aşınma sonrasında oluşan ağırlık kaybı yine en fazla Nylon White’da görülmektedir. Buradan sıcaklık artışına karşı dayanıklılık göz önünde bulundurulduğunda ONYX-FR’ın karşılaştırılan diğer polymer türlerine göre daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

6.6 Aşınma Oranları ve Yüzey Görüntüleri

$$\dot{W}_s = \frac{\Delta m}{\rho F_N L} \quad (\text{mm}^3/\text{Nm})$$

Δm : Kullanılan malzemede ki ağırlık kaybı (mgr)

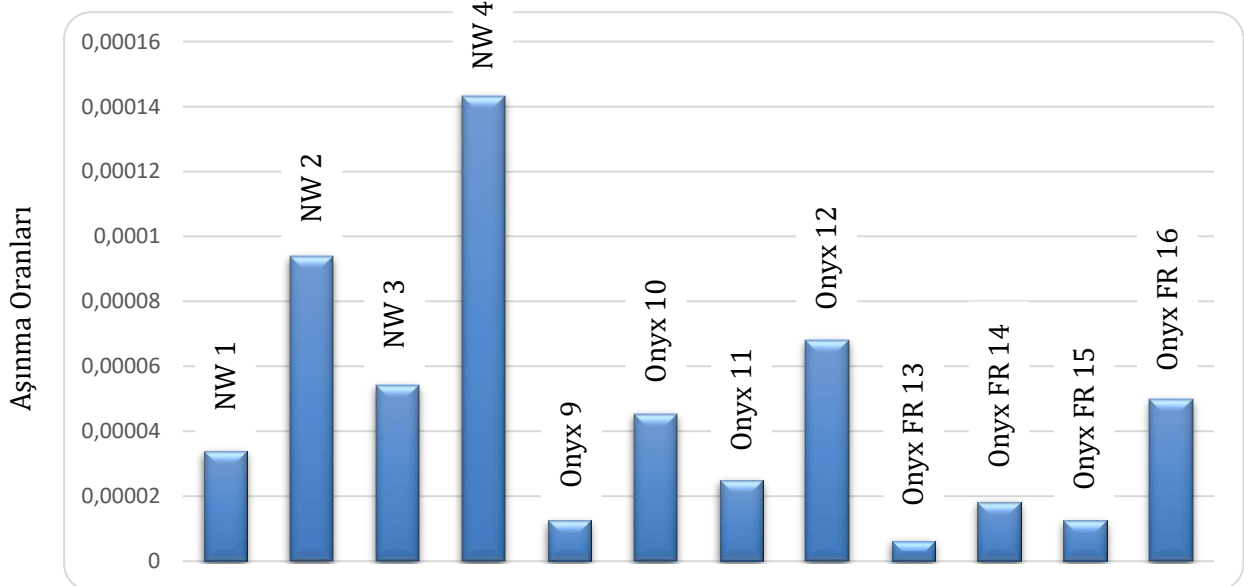
ρ : Malzemenin yoğunluğu (mgr/mm³)

L : Aşınma mesafesi (m)

F_N : Uygulanan normal kuvvet

W : Özgül aşınma miktarı

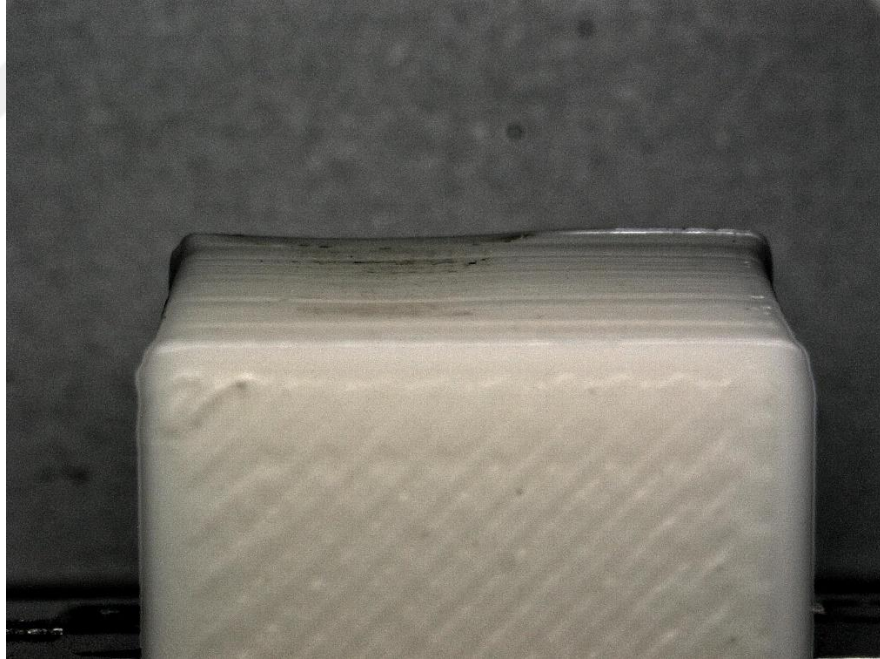
Deney sonrası elde edilen ağırlık kayıpları yukarıda verilen polymer malzemelerin aşınma oranlarının tespit edilebilmesinde kullanılan formülde yerine koyularak hesaplandığında;



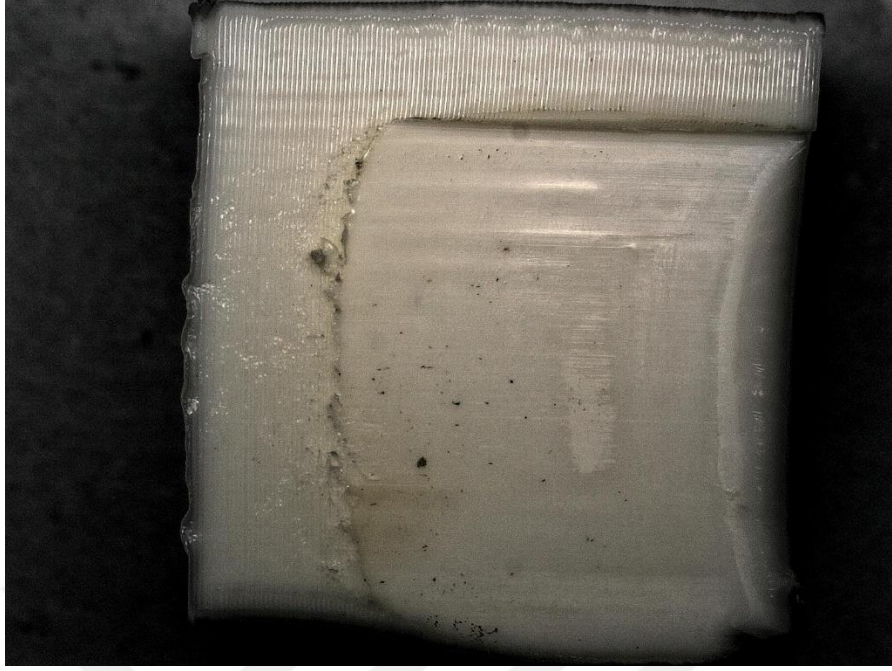
Şekil 6.18 Farklı yük ve hız koşullarında deneye tabi tutulan polymer malzemelerinin aşınma oranlarının karşılaştırılması



Şekil 6.19 White Nylon 1 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



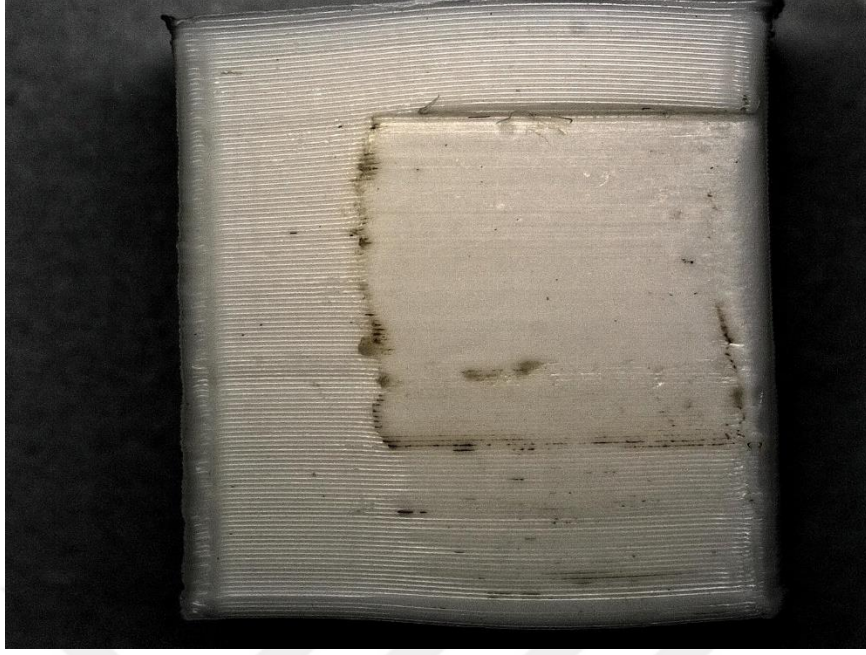
Şekil 6.20 White Nylon 1 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



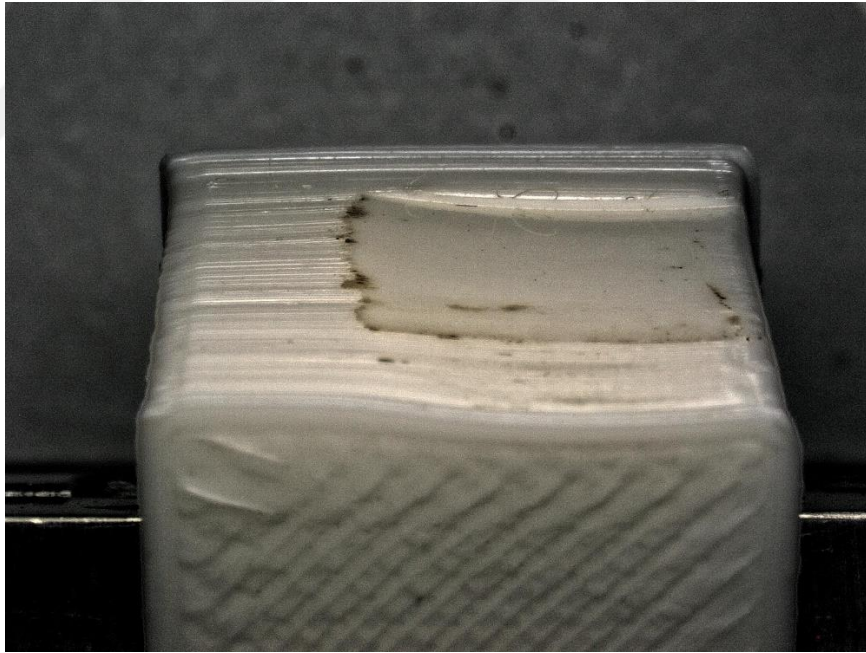
Şekil 6.21 White Nylon 2 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



Şekil 6.22 White Nylon 2 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



Şekil 6.23 White Nylon 3 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



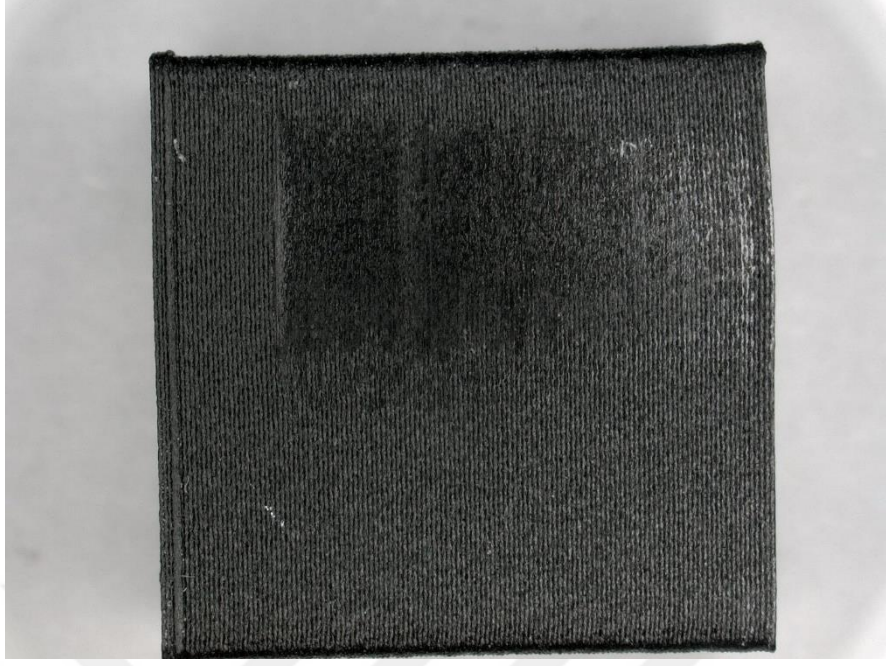
Şekil 6.24 White Nylon 3 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



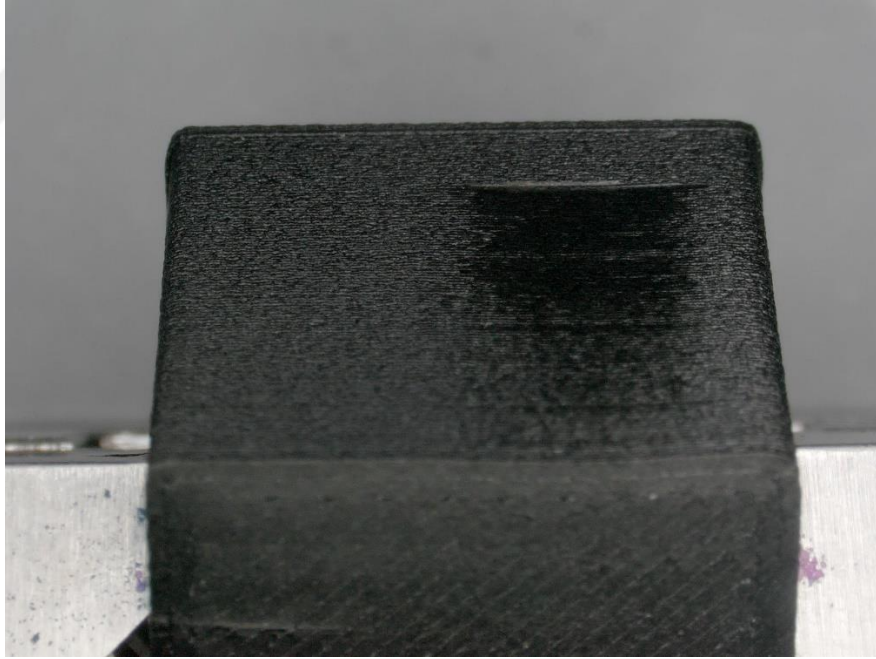
Şekil 6.25 White Nylon 4 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



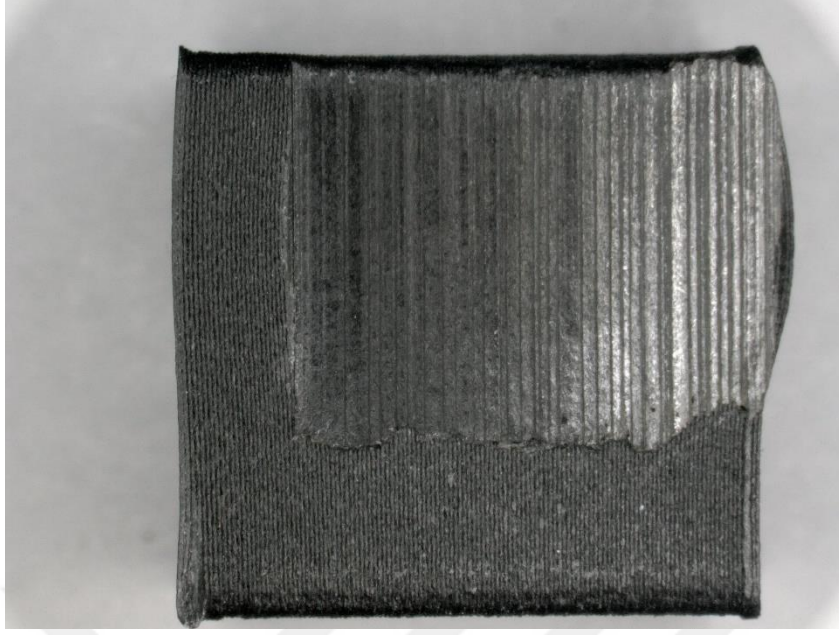
Şekil 6.26 White Nylon 4 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



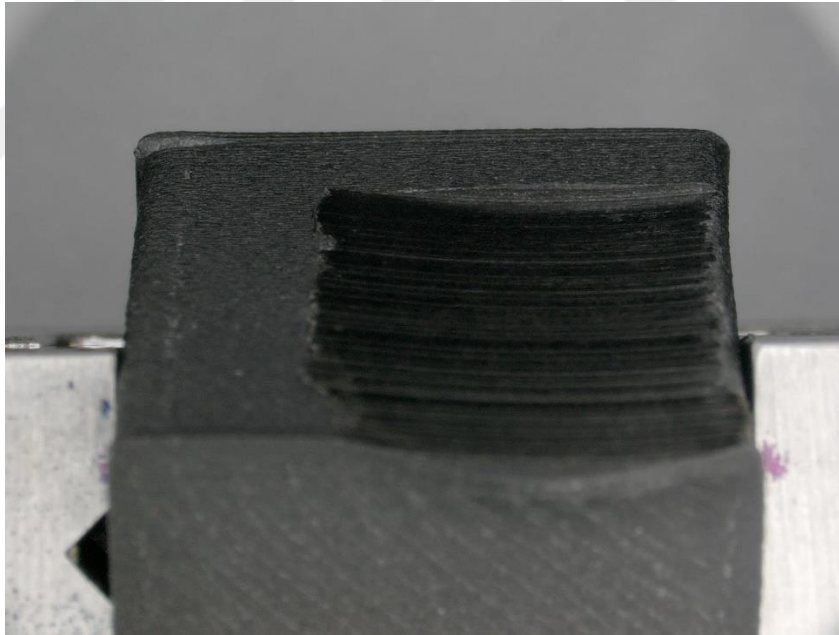
Şekil 6.27 ONYX 9 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



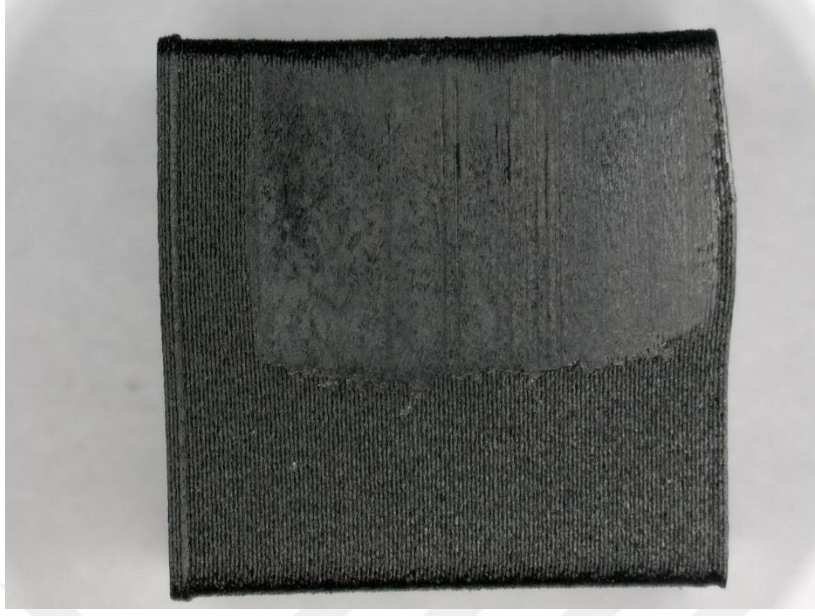
Şekil 6.28 ONYX 9 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



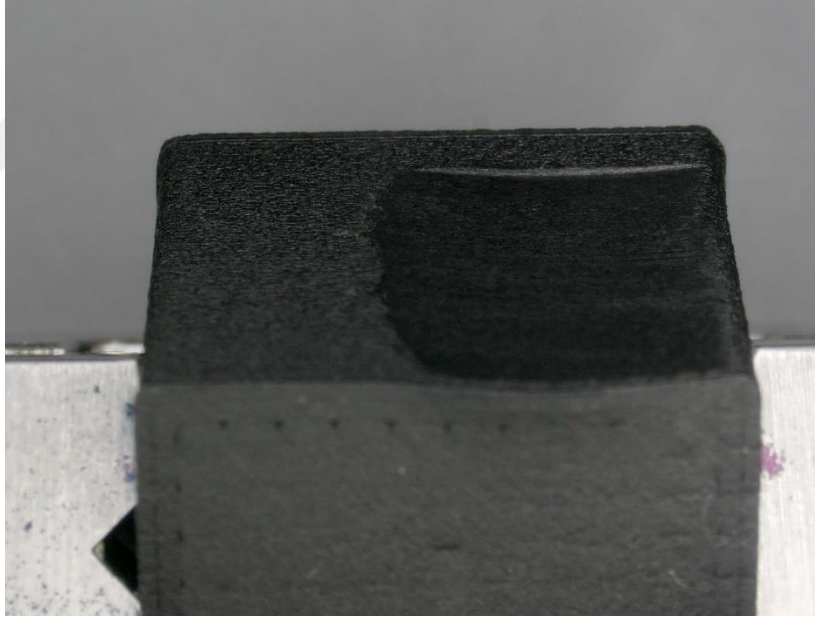
Şekil 6.29 ONYX 10 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



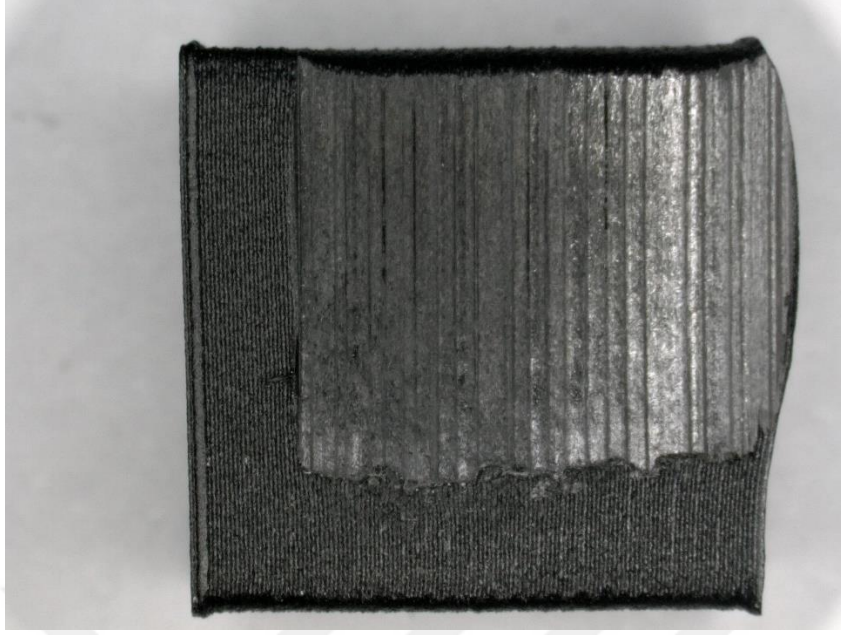
Şekil 6.30 ONYX 10 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



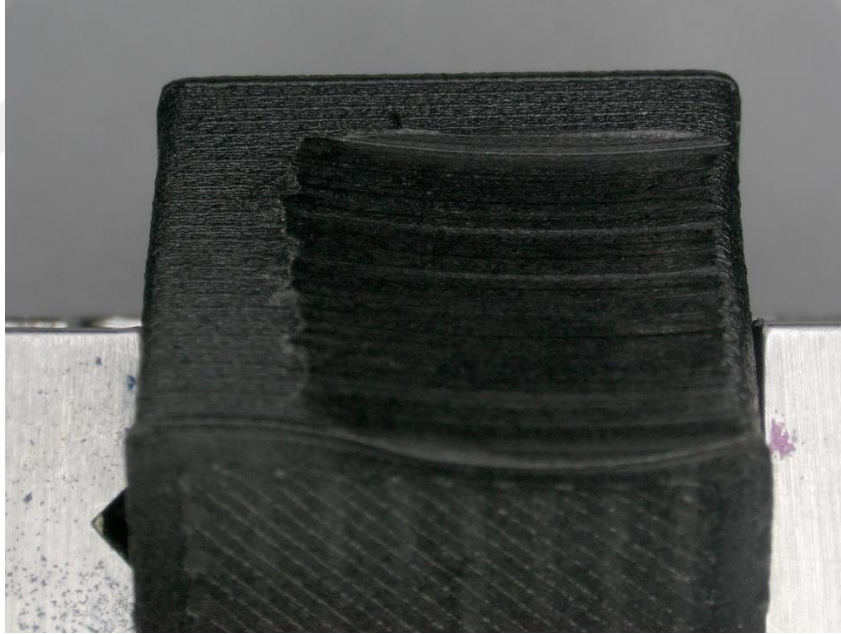
Şekil 6.31 ONYX 11 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



Şekil 6.32 ONYX 11 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



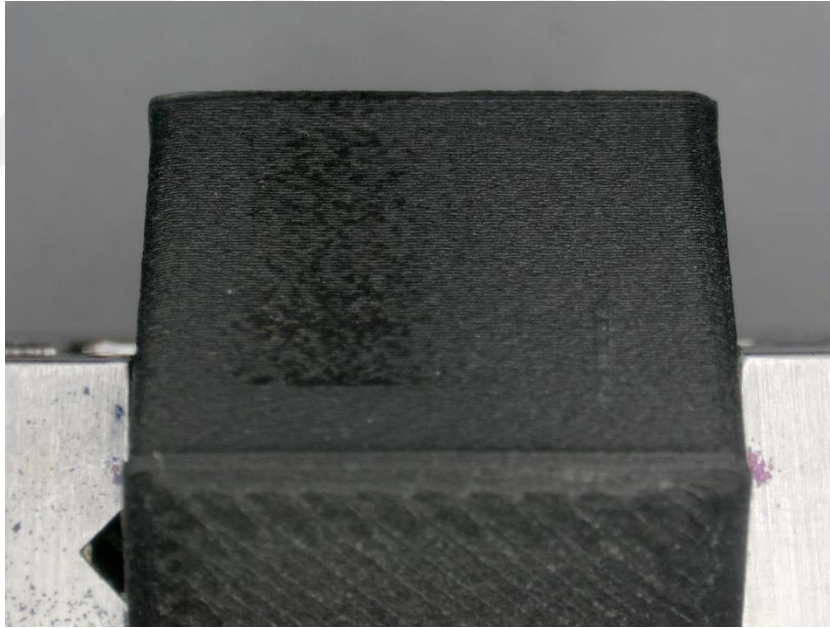
Şekil 6.33 ONYX 12 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



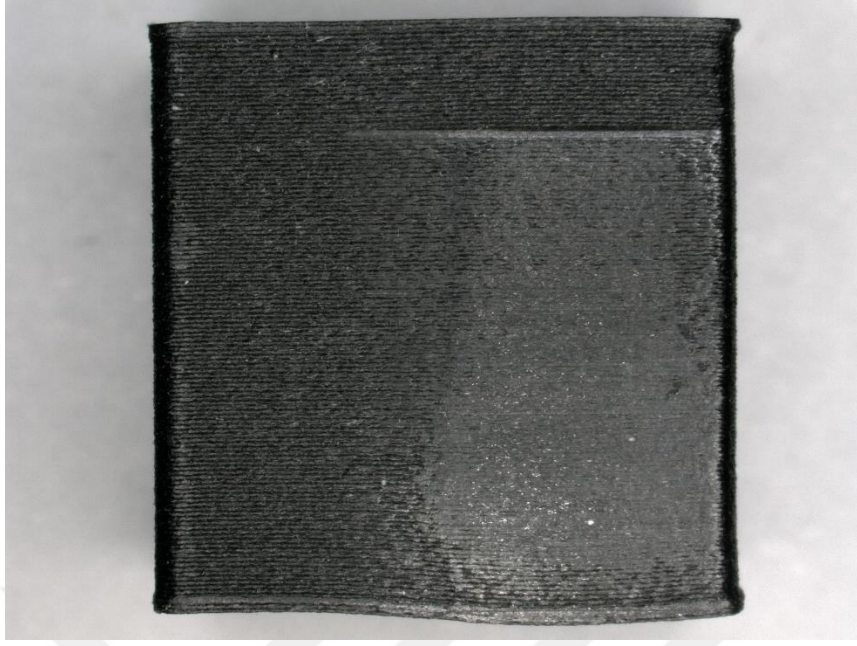
Şekil 6.34 ONYX 12 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



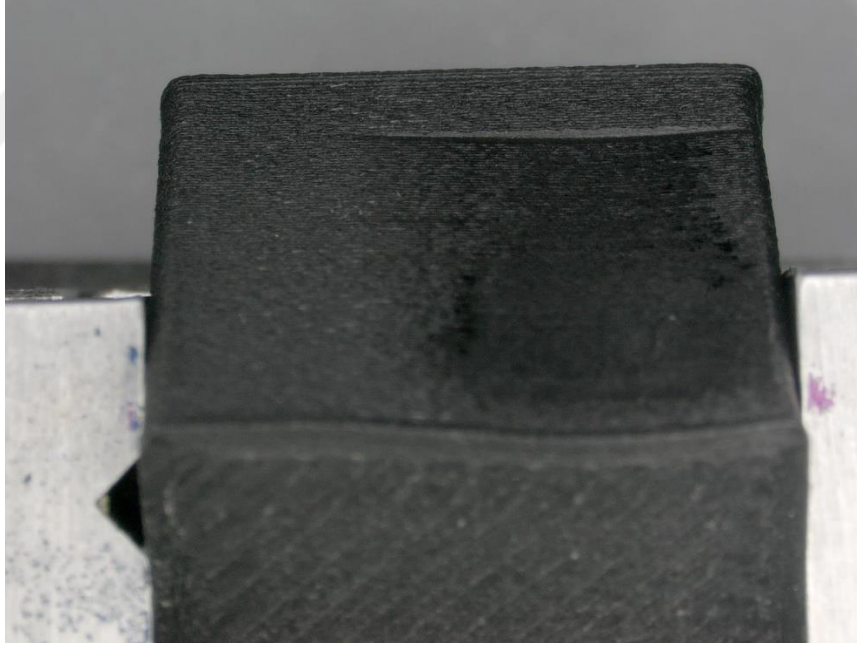
Şekil 6.35 ONYX-FR 13 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



Şekil 6.36 ONYX-FR 13 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



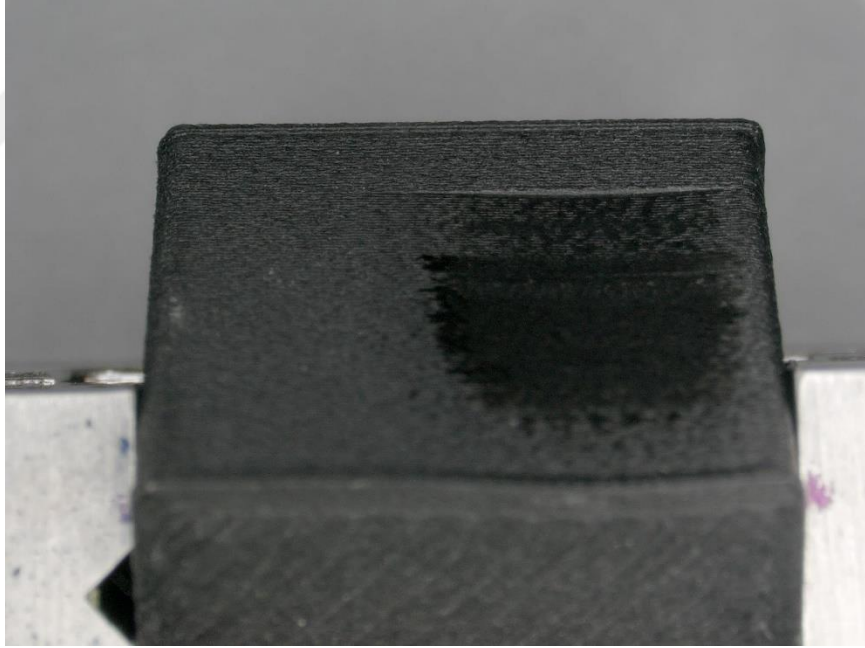
Şekil 6.37 ONYX-FR 14 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



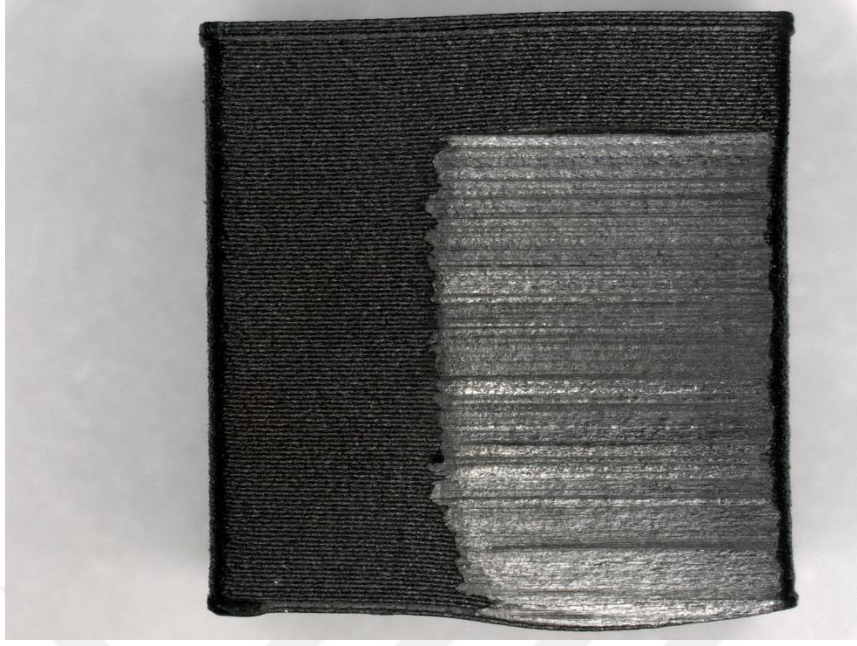
Şekil 6.38 ONYX-FR 14 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



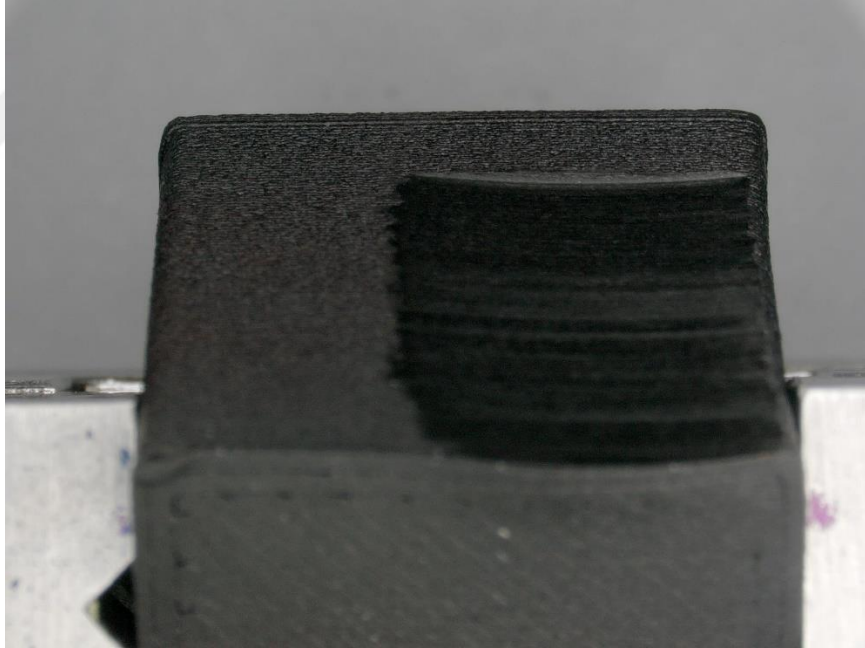
Şekil 6.39 ONYX-FR 15 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



Şekil 6.40 ONYX-FR 15 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü



Şekil 6.41 ONYX-FR 16 aşınma yüzeyinin dik yönden görünüşü



Şekil 6.42 ONYX-FR 16 aşınma yüzeyinin paralel yönden görünüşü

7. SONUÇLAR

7.1 Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, kuru kayma aşınması altında üç boyutlu yazıcıda üretilmiş White Nylon, ONYX ve ONYX FR polymer malzemelerinin aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

TE53 çok amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazının block on roller test yöntemi kullanılmıştır. Bu methodla farklı yük (67N ve 92N) ve kayma hızı (1m/s ve 2m/s) referans alınarak malzemelerin tribolojik davranışları incelenmiştir. Deney sonrasında ağırlık kayıpları ve buna bağlı olarak polymer malzemeler için kullanılan aşınma formülü yardımıyla tabi tutulan deney parametrelerine göre aşınma oranları hesaplanmıştır. Sonuçların tutarlılığı ve aşınma yüzeylerinin daha yakından görünümü için KEYENCE tarafından VHX 5000 modeli yardımıyla fotoğraflanmıştır. Yapılan çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda ki gibi yorumlanabilir;

- 3 Boyutlu yazıcıda üretilmiş polymer malzemelerin aşınma ve sürtünme performansı uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi gibi parametrelere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda yapılan analiz ve incelemelerde, uygulanan yükün polymer malzemelerin tribolojik davranışları üzerindeki etkisi hız parametresine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- Kayme süresi boyunca yapılan test esnasında uygulanan yük ve hız altında belli bir süre sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı ile birlikte polymer malzemenin matrisinde termal yumuşamaya neden olur. Bu termal yumuşama sürtünmesinde etkisiyle malzeme birikintisine neden olarak malzeme kopmalarına neden olur. Malzeme kopması yaşanmaması dahilinde bulunduğu noktada daha fazla sürtünme ve ısı açığa çıkmasına neden olur.

- Araştırılan literatür çalışmalarında elyaf yönünün kayma yönüne paralel ve dik olması, aşınma ve sürtünme değerlerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Fakat bu çalışmada, üretilen tüm polymer malzemeler üzerindeki elyaf yönü kayma yönüne paralel olarak denenmiştir.
- Uygulanan yük ve hızlar göz önünde bulundurulduğunda en iyi aşınma performansı ONYX-FR malzemesinde, en kötü aşınma performansı ise White Nylon malzemesi üzerinde elde edilmiştir. Düşük hız ve yüklerde ise ONYX'in kısmen ONYX-FR'a yakın özellik göstermesi de dikkat çekmektedir. Ek olarak ONYX'in White Nyloga göre iyi, ONYX-FR'a göre ise daha kötü bir aşınma performansı gösterdiği görülmektedir.
- Kayma süresi boyunca oluşan aşınma çeşitleri incelendiğinde hem abrazif hem de adhezif aşınma görülmüştür. Deney esnasında belli bir süre sonra polymer malzeme yüzeyinde ki bağlar koparak metal disk üzerine yapıştığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak ortaya çıkan sürtünme ve yüksek ısı nedeniyle malzeme yüzeyinde kopmalar meydana gelmiştir. Ortaya çıkan bu ısı belli bölgelerde thermal malzeme birikintilerine de yol açmış ve şekil bozuklukları gözlemlenmiştir.
- White Nylon ve ONYX'te deney sonrası lokal bazı noktalarda sürtünme ve ısı nedeniyle yanma tespit edilmiştir.
- Yapılan deney sonucunda ONYX-FR ısıya ve yanmaya karşı daha dayanıklı olmasından dolayı sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısıdan çok fazla etkilenmediği için teste tabi tutulan diğer polymer malzemelere göre ağırlık kaybı daha azdır.

Bu çalışma, yapılan literatür araştırması sonucu incelenen diğer çalışmalarla desteklenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçları göz önünde bulundurarak bundan sonra yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıda ki öneriler verilebilir;

- Hız ve yük değişkenliklerinin yanında belirli sıcaklıklarda aşınmaya olan etkisi ayrıca araştırılabilir. Farklı sıcaklıklarda olabileceği gibi sıcaklığı sabit tutacak bir sistem tasarımı yapıp incelenebilir.
- Elyaf yönünün aşınmaya olan etkisi ayrıca incelenebilir. Kayma mesafesine paralel ve dik yönde olacak şekilde aşınma ve sürtünmeye olan etkisi araştırılabilir.
- White Nylon, ONYX ve ONYX-FR herhangi bir şekilde farklı bir malzeme özelliği içermemektedir. Markforged Two belirli oranlarda cam elyaf takviyesine de olanak sağlıyor. Belirli oranlarda takviye edilen cam elyafların aşınma davranışı üzerine etkisi gözlemlenebilir.
- Bu çalışma da yapılan hız ve yüklere ek olarak farklı hız ve yük endeksleriyle çalışılıp bunların aşınma davranışlarına olan etkisi ayrıca araştırılabilir.
- Kayma mesafeleri daha geniş aralıklarda incelenebilir.
- Sürtünmeyi azaltmak ve polymer malzemeler üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla test esnasında sıvı kullanılabilir.
- Sürtünme ve aşınmayı arttıracak şekilde abrasif malzeme sistem tarafından beslenerek yapılan bu değişikliğin sürtünme ve aşınmaya olan etkisi incelenebilir.

8. KAYNAKÇA

1. **Mechanical Testing And Finite Element Analysis Of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced Onyx® Thermoplastic**, Fithawi Ghebretinsae 2019.
2. **Yaşar, İ., ve Arslan, F., (2000). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı Ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi**, Turkish Journal Of Engineering And Environmental Sciences, 24, 181-191.
3. **Pihtili, H., ve Tosun N. (2002). Effect of load and speed on the wear behaviour of woven glass fabrics and aramid fibre-reinforced composites** Wear, 252, 979-984. Retrieved May 06, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.
4. **Kukureka, S.N., Hooke C.J., Rao, M., Liao, P., ve Chen, Y.K. (1999). The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rollingsliding contact**, Tribology International, 32, 107-116. Retrieved July 23, 2009, from Elsevir database.
5. **Kishore, P., Sampathkumaran, S., Seetharamu, S., Vynatheya, S., Murali, A., ve Kumar, R.K. (2000). SEM observations of the effects of velocity and load on the sliding wear characteristics of glass fabric-epoxy composites with different fillers**, Wear, 237, 20-27. Retrieved May 06, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.
6. **Akkurt, M. (1982). Makine Elemanları Cilt II. İstanbul**, Birsen Kitapevi Yayınları.
7. **Plint Tribology Products from Phoenix Tribology Ltd**, T53 Multi-Purpose Friction and Wear Tester. <http://www.phoenix-tribology.com/>
8. **Markforged**, <https://markforged.com/>

9. Caminero, M., et al., **Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling**, 2018. 68: p. 415-423.
10. Ning, F., et al., **Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling**, 2015. 80: p. 369-378.
11. Jiang, D. and D.E.J.A.M. Smith, **Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication**. 2017, 18: p. 84-94.
12. Strong, A.B., **Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications**, 2008: Society of Manufacturing Engineers.
13. Schwartz, M.M., **Composite materials handbook**, 1984: McGraw-Hill.
14. **Kompozitlerin kuru kaymadaki aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması**, Mürsel Yılmaz 2013.
15. Markforged, <CompositesDesignGuide_V1-1.pdf>. 2019
16. Markforged, <Mark Two product specification.pdf>. 2016.
17. Markforged-3D, <Markforged-Products-and-Applications.pdf>. 2016.
18. Markforged, Onyx, material specification. 2019, retrived.
19. ,Markforged, <composites-data-sheet.pdf>. 2018/6/15.
20. ASTM F2792 – 12a “**Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**”, DOI: 10.1520/F2792-12A.
21. <https://www.merkeziyaglamasistemleri.com/>
22. Markforged® Rev. 3.2-9/9/2019.

23. <https://www.webtekno.com/>
24. **Larsen, Andersen, Thorning**, Vigild, 2008.
25. **Yaşar, Arslan**, 2000.
26. **M. Hannon**, 2020.
27. **O.S.Carneiro**, 2015 /Materials&Design
28. <https://www.wikipedia.org/>
29. <https://insapedia.com/>
30. <https://www.wikiwand.com/>
31. <https://techcrunch.com/>
32. **S Huang**, 2013.
33. **F Van Der Klift**, 2017
34. <https://www.vwvortex.com/>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : HAKAN TÜRKMEN

Doğum Yeri ve Tarihi :Osmangazi/BURSA – 11.01.1993

Yabancı Dil: : İngilizce (iyi), Almanca (Başlangıç)

Eğitim Durumu

Lise :Hasan Ali Yücel Anadolu Lisesi

Lisans : Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği

Lisans :Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği (Çift Anadal)

Çalıştığı Kurumlar :

Ottonom Mühendislik Çözümleri (2016-2019) – Tasarım Uzmanı

Robert BOSCH (2019-...)

İletişim e-posta :turkmen.hakan@outlook.com

Yayınları : -