



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÜÇ BOYUTLU YAZICILARDA FARKLI PLASTİK MALZEMELER
KULLANILARAK ÜRETİLEN DİŞLİ ÇARKLARIN AŞINMA
DAYANIMLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Bekir Volkan AĞCA

Çorum- 2023

**ÜÇ BOYUTLU YAZICILARDA FARKLI PLASTİK MALZEMELER
KULLANILARAK ÜRETİLEN DİŞLİ ÇARKLARIN AŞINMA
DAYANIMLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Bekir Volkan AĞCA

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Mert Şafak TUNALIOĞLU

Çorum 2023

KABUL ONAY SAYFASI

Bekir Volkan AĞCA tarafından hazırlanan “Üç boyutlu yazıcılarda farklı plastik malzemeler kullanılarak üretilen dişli çarkların aşınma dayanımlarının deneysel incelenmesi” adlı tez çalışması/.../..... tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Abdullah ALTIN (Başkan)

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mert Şafak TUNALIOĞLU (Danışman)

.....

Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mithat ŞİMŞEK

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile Bekir Volkan AĞCA ‘nın Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof.Dr. Muhammed Asif YOLDAŞ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Bekir Volkan AĞCA

ÜÇ BOYUTLU YAZICILARDA FARKLI PLASTİK MALZEMELER KULLANILARAK ÜRETİLEN DİŞLİ ÇARKLARIN AŞINMA DAYANIMLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Bekir Volkan AĞCA

ORCID:0000-0002-2801-256X

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Şubat 2023

ÖZET

Bir mekanizma elemanı olarak çalışan dişliler hareket iletirlerken belirli bir yüke maruz kalırlar ve aşınırlar. Bu nedenle dişlilerin ömürlerinin tayini için aşınma miktarlarının belirlenmesi büyük önem taşır.

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcı ile üretilen plastik düz dişli çarkların aşınması, önce teorik olarak incelenmiştir. Bu aşamada dişlilerin aşınma derinlikleri, Archard denklemi temelinde hazırlanan bir Matlab programı kullanılarak belirlenmiştir.

Daha sonra düz dişliler EYM (Eriyik Yığılma Modelleme) teknolojisi ile ABS, PETG VE PLA olmak üzere üç farklı plastik malzeme seçilerek üretilmiş, daha sonra deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir. Bu teknoloji, üretim aşamasında iç doluluk oranı ve dış çeper kalınlığında değişim yapılmasına imkân vermektedir.

Üretilen dişlilerin aşınma deneyleri çelik bir dişli ile FZG adlı kapalı devre güç dolaşım sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney sistemi ile dişli numunelerin çalışma anında maruz kaldığı yük ve dönme hızları kontrol edilebilmektedir. FZG test düzeneği sayesinde düz dişliler üzerindeki yükler çeşitlendirilerek aşınma davranışları incelenmiştir. Test düzeneği belirli periyotlarla durdurulmuş, dış çeper kalınlıkları ve dolgu yoğunlukları farklı plastik dişlilerin aşınma miktarları kütesel olarak ölçülerek, plastik sınıflarının aşınma davranışı hakkında karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kavramlar: FDM teknolojisi, üç boyutlu yazıcı, plastik düz dişliler, aşınma

Bilim Kodu:91438

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF VARIOUS POLYMER SPUR GEARS MANUFACTURED BY 3D PRINTER

Bekir Volkan AĞCA

ORCID:0000-0002-2801-256X

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Şubat 2023

ABSTRACT

Gears, as elements of any mechanism, are exposed to an accurate load while transmitting motion and they wear off. That is why it is crucial to designate a wear rate to determine their lifespan.

In this study, firstly the wearing (off) of 3D printer produced plastic gears is evaluated theoretically. In this context, wear depths are calculated in Matlab programme based on Archard Equation.

Then, spur gears made up of different types of polymer materials, such as PLA, PETG and ABS, are manufactured by using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. Then they were made available for experimental processes. FDM technology enables the changes to be made in the percentages of infill material and in the shell thickness of the gears.

Wear experiments of plastic spur gears are conducted by means of Closed Circuit Power Circulation System (FZG) by merging steel spur gears. This test rig can modify angular velocity and magnitude of forces on spur gears. Thanks to the capability of arrangement of forces, wear behavior was observed under various forces. The test rig was stopped to measure the mass loss at specific periods. Finally, the results were compared with those of all types of plastics.

Keywords: FDM technology, 3D printer, polymer spur gear, wear

Science Code:91438

TEŞEKKÜR

Doktora tezinin hazırlanmasında beni yönlendiren ve yardımını esirgemeyen başta değerli hocam Dr. Öğr.Üyesi Mert Şafak TUNALIOĞLU'na, Novetek Teknolojileri yönetimi ile çalışanlarına, Serdar DEMİRTAŞ'a, Makine Mühendisi Gökhan ÖZTÜRK'e, kuzenim Çağhan AĞCA 'ya ve şu zamana kadar üzerimdeki emekleri sonsuz olan aileme teşekkür ederim.

Bekir Volkan AĞCA



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

TARİHÇE

1.Tarihçe	6
-----------------	---

2. BÖLÜM

DİŞLİ ÇARKLAR

2.1. Paralel Eksenli Dişliler	9
2.1.1. Düz Dişliler	10
2.1.2. Helisel Dişliler	10
2.1.2. Kramyer Dişliler	11
2.2. Eksenleri Kesişen Dişliler	11
2.2.1. Konik Dişli Çarklar	11
2.2.2. Çavuş Dişli Çarklar	12
2.2.3. Sonsuz Vidalı Dişli Çarklar.....	12
2.2.4. Planet Dişli Çarklar	13
2.2.5. Zincir Dişliler	14

	Sayfa
2.3.Dişli Çark Temel Büyüklükleri	15
2.4.Dişli Çarklarda Kavrama.....	17
2. 5.Kavrama Açısı	19
2.6.Düz Dişli Çarkların Mukavemet Hesabı	20
2.7.Genel Dişli Kanunu	22

3. BÖLÜM

PLASTİK DİŞLİ ÇARKLAR

3.1. Plastik Çeşitleri.....	24
3.1.1. Polyamid.....	24
3.1.2. Polietilen	24
3.1.3. Politetraflor Etilen Teflon	24
3.1.4. Poliester Reçinesi	25
3.1.5. Epoksi Reçinesi	25
3.1.6. Kestamid	25
3.1.7. Akrilonitril Bütadiyen Stiren(ABS).....	25
3.1.8 Polilaktik asit (PLA).	26
3.1.9 PETG (Polyethylene terephthalate Glycol-Modified).....	29
3.2. Plastik Dişli Çarkların Üretim Yöntemleri	30
3.2.1 Kalıpla Enjeksiyon Yöntemi.....	31
3.2.2 Eriyik Yığılma Modelleme	32
3.3. Plastik Dişlilerde Yorulma	34
3.4. Polimerlerin Termal Özellikleri	37

4. BÖLÜM

DİŞLİ ÇARKLARDA AŞINMA

4.1. Aşınma Türleri.....	38
4.1.1. Adheziv Aşınma	38
4.1.2. Abrasif Aşınma	39
4.1.3. Yorulma Aşınması	39
4.1.4. Polisaj Aşınması	40
4.1.5. Korosiv Aşınma	40
4.1.6. Sürtünme Aşınması	41
4.2. Dişli Çarklarda Aşınmanın Teorik İncelenmesi	42

5. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Test Malzemeleri	51
5.2. Test Malzemelerinin Üretimi	53
5.3. Test Yöntemi	56
5.4. Deney Cihazı	59
5.4. Elektronik Tartım Cihazı	62

6. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Plastik Dişli Çarkların Teorik Aşınma Derinliklerinin Belirlenmesi	63
6.2. Farklı Yüklemlerde Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri	66
6.3 Farklı Dolgu Yoğunluklarında Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri	68
6.4 Farklı Çember Kalınlıklarında Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri	69

SONUÇ /SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	75
EKLER	78
EK-1. Düz Dişli Çarkların Ana Boyutlarının Hesaplanması	78
EK-2. Aşınma Derinliğinin Teorik Hesabında Kullanılan Matlab Yazılımının Görüntüsü.....	80



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Dişlilerin Gruplandırılması.....	9
Tablo 2.2. Dişli Çark Mekanizması Sembol ve Formülleri.....	15
Tablo 2.3. Diş Tanımlarının Gösterimi	16
Tablo 3.1. PLA ile ABS malzemelerinin kıyaslanması	27
Tablo 3.2. Polimerlerin Mekanik Özellikleri	28
Tablo 3.3. Rigid.ink firmasına PETG Malzeme Özellikleri	30
Tablo 3.4. Deneyde Kullanılan Polimer Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	30
Tablo 5.1. Deneyde Kullanılacak Dişli Numunelerin Boyut Değerleri.....	51
Tablo 5.2. Plastik Dişli Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	53
Tablo 5.3. Plastik Pinyon Dişlilerin Yazıcı Baskı Parametreleri	54
Tablo 5.4. Analitik Terazinin Özellikleri	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Arşimet'in odometer tasarımı	6
Şekil 2.1. Düz Dişliler	9
Şekil 2.2. Helisel Dişli Örneği.....	11
Şekil 2.3. Kramyer Dişli Örneği.....	11
Şekil 2.4. Konik Dişli Çark.....	12
Şekil 2.5. Sonsuz Dişli Çark.....	13
Şekil 2.6. Planet Dişli Örneği.....	14
Şekil 2.7 Bazı Terimlerin Dişli Üzerinde Gösterimi.....	16
Şekil 2.8 Kavrama Süresince Dişliye Etkiyen Kuvvetler.....	17
Şekil 2.9 Kavrama Sırasında Diş Üzerindeki Yük Dağılımı.....	18
Şekil 2.10 Evolvent Eğrisinin Çiziminin Gösterimi	19
Şekil 2.11 Kavrama Açısının Dişli Üzerinde Gösterimi	20
Şekil 2.12 Diş Kuvveti ve Bileşenleri	21
Şekil 2.13 Genel Dişli Kanununda Hızların Gösterimi	23
Şekil 3.1 Enjeksiyon Kalıpla Plastik Şekillendirme	32
Şekil 3.2. FDM Teknolojisinin Çalışma Prensibi	29
Şekil 3.3. Diş geometrisi modifikasyonuna örnek	34
Şekil 3.4 Sıcaklığın Polimerler Üzerindeki Etkisi.....	37
Şekil 4.1. Kavrama Sırasındaki Anlık P Noktasının Kayma Hareketindeki Gösterimi	43
Şekil 4.2. Hertz Basıncının Gösterimi	45
Şekil 5.1. Plastik Dişlilerin Üretim Aşamaları	50
Şekil 5.2. Pinyon Katı Modelleme Çizimi	52
Şekil 5.3. Çelik Dişli Çarkın Katı Modelleme Çizimi	52
Şekil 5.4. Dolgu Miktarının %100 olarak ayarlanması	57

Şekil 5.5. Dolgu Miktarının %50 olarak ayarlanması	57
Şekil 5.6. Dış çeper kalınlığının ara yüz programında 0.4mm olarak ayarlanması	58
Şekil 5.7. Dış çeper kalınlığının ara yüz programında 0.8mm olarak ayarlanması	59
Şekil 5.8. Test Düzenekinin Şematik Gösterimi	60
Şekil 5.9. Deneyde İzlenen Metodun Akış Şeması.....	61
Şekil 6.1. Plastik Dişli Çarkların Kavrama Boyu Boyunca Aşınma Derinlikleri.....	63
Şekil 6.2. Plastik Dişli Çarkların Servis Ömürleri	65
Şekil 6.3. Farklı Yükler Altında ABS Plastik Dişlisinin Aşınma Dayanımı	65
Şekil 6.4. Farklı Yükler Altında PLA Plastik Dişlisinin Aşınma Dayanımı	66
Şekil 6.5. Farklı Yükler Altında PETG Plastik Dişlisinin Aşınma Dayanımı	66
Şekil 6.6. Doluluk Oranlarına Göre Plastik Dişli ÇarklarınAşınma Davranışları	69
Şekil 6.7. Plastik Dişli Çarkların Dış Çeper Kalınlıkları Değişimi.....	70
Şekil 6.8. Çeper Kalınlıklarına Göre Plastik Dişli Çarkların Aşınma Davranışları	70

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Da Vinci ‘nin dişli taslağı.....	6
Resim 1.2. Arşimetin Antikythera Mekanizması.....	7
Resim 2.1. Çavuş Dişli Örneği.....	12
Resim 2.2. Aktarmalı Zincir Dişli Örneği	14
Resim 3.1. PLA ‘nın Gıda Sanayinde Kullanımına Örnek	27
Resim 3.2. PETG Filamentlerinin Gösterimine Bir Örnek	29
Resim 3.3. Soğutma kanalı hakkındaki örnek	35
Resim 3.4. Metal katkılı filament örnekleri	36
Resim 4.1. Adhesiv Aşınmanın Gösterimi	38
Resim 4.2. Abrasiv Aşınmanın Gösterimi.....	39
Resim 4.3. Yorulma Aşınmasının Gösterimi.....	39
Resim 4.4. Polisaj Aşınmasının Gösterimi.....	40
Resim 4.5. Koroziv Aşınmanın Gösterimi.....	41
Resim 4.6. Sürtünme Aşınmasının Gösterimi.....	41
Resim 5.1. Üç Boyutlu Yazıcının Görüntüsü.....	54
Resim 5.2. PETG Pinyon Dişlinin Üretim Aşamaları	55
Resim 5.3. Test Dişlileri	56
Resim 5.4. Deney Düzenekinin Görüntüsü	60
Resim 5.5. Tartımda Kullanılan Elektronik Terazinin Görüntüsü	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ω	Açısal hız
α	Kavrama açısı, derece
Z	Diş sayısı
m	Modül
i	Çevrim Oranı
α_t	Alın kavrama açısı
D_g	Temel dairesi çapı
h_b	Diş başı yüksekliği
h_t	Diş tabanı yüksekliği
D_b	Diş başı dairesi çapı
D_{tb}	Diş tabanı dairesi çapı
a	Eksenler arası mesafe
ε	Kavrama oranı
n	Devir
x	Profil Kaydırma
v	Çevresel hız
F	Kuvvet
M	Moment
P	Basınç
R	Yarı çap
C0	Derece Santigrat
K	Boyutsuz Aşınma Sabiti
H	Sertlik
k	Aşınma katsayısı

h	Aşınma derinliği
E	Elastik Modül
ν	Posion Oranı
Pa	Pascal

Kısaltmalar

FDM	Fused Deposition Modelling
EYM	Eriyik Yığma Modelleme
PLA	Polilaktik Asit
PETG	Polietilen tereftalat
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
FZG	Forschungsstelle für Zahnrad und Getriebebau

GİRİŞ

Bu çalışmada, üç boyutlu yazıcı ile farklı polimerik malzemelerden (PLA, ABS ve PETG) üretilmiş düz dişliler, çelik bir dişlinin aşınmasına maruz tutularak aşınmaya karşı davranışları incelenmiştir.

Deneysel çalışmaların öncesinde, Archard aşınma denklemi kullanılarak bir Matlab uygulaması elde edilmiş, aşınma denkleminin her bir polimer için kullanılması ile elde edilen sonuçlar tablolar ile gösterilmiş ve deneysel çalışmalar teorik sonuçlar ile desteklenmiştir. Elde edilen matlab yazılımı EK-2 de gösterilmiştir.

Deneyselerde kullanılan polimerik dişliler Eriyik Yığma Modelleme Yönetmi ile çalışan üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Bu yöntem, plastik dişli numunelerinin iç dolgu yoğunluğuna boşluk verebilme imkanının yanında dış çeper kalınlığının da talebe göre ayarlanmasına imkan vermektedir. Bu imkanlar doğrultusunda dişlilere farklı dolgu yoğunluğu ve kabuk kalınlıkları kazandırılarak üretim sağlanmıştır.

Deneysel sonuçlar neticesinde, hangi plastik sınıfının çelik dişli karşısında daha dayanıklı olduğu, dolgu yoğunluğunun değişiminin, aşınma dayanımına ne kadar etkidiği ve üretim süresine yani maliyete ne kadar yansıdığı, ayrıca etki eden torkun bu plastik sınıflarında aşınmaya ne kadar etkili olduğu bilgileri karşılaştırılarak incelenmiştir.

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan üç boyutlu yazıcı ile üretim yönteminin yaygınlaşmasından önce polimerik dişliler literatür çalışmalarında enjeksiyon kalıp yöntemi ile üretilmiş, çeşitli aşınma düzenekleri kullanılarak aşınmaya maruz bırakılmış ve aşınma davranışları incelenmiştir. Literatür çalışmalarından bazı örnekler aşağıda sıralanmıştır.

Boncina ve ekibi (2000) polimer dişlilerde AL-PVD kaplamanın aşınma davranışına nasıl etki ettiğini incelemişlerdir.Çalışmada POM düz dişlisi için üç farklı kalınlıkta Al kaplama yapılarak sade POM dişlisi ile aşınma karşılaştırılmaları yapılmıştır.Kaplamada yeterli düzeyde bağlanma olmayan uygulamalarda dişli çalışmaya başlarken yüzeyde ayrılmalar gözlemlendiği belirtilmiştir.Kaplama malzemesinin tabaka formundan ayrıldığı durumlarda daha sonra abrasive bir partikül olarak aşınmaya neden olduğu gözlenmiştir.Al kaplamasının polimere daha iyi tutunması için plazma aktivasyon işlemi önerilmektedir.

Kuruokowa ve ekibi (2003) plastik enjeksiyon yöntemi ile ürettikleri polyamid türevi dişlilerde karbon fiber katkısının aşınmaya olan etkisini incelemişlerdir.Çalışmada PA12 CF tipi dişli grubunun diğer dişlilere göre daha iyi aşınma direnci gösterdiğini,bükme baskısının 40 Mpa olduğunda yine da az miktarda aşınma gözlemlendiğini belirtmişlerdir.Ayrıca aşınma davranışına benzer olarak suyu absorbe özelliğinin de diğer polyamitlerden üstün olduğundan pratikte boyutsal hassasiyetinde daha iyi olduğu belirtmişlerdir.

Alencar ve ekibi (2005) plastik dişlilerde meydana gelen çoklu hasar mekanizmalarını Sonlu Elemanlar Metodu (FEA) ile analitik denklemler üreterek incelemişlerdir. Bu kabulle meydana gelebilecek tüm olası hasar mekanizmalarını benzersiz bir dişli perspektif analizi elde etmişlerdir. Plastik dişliye bir dizi yük uygulandığında oluşan hasarın modunun uygulanan yüke bağlı olduğunu doğrulamışlardır. Uygun hasar modunun belirlenmesi plastik dişlinin hareket kabiliyetin belirlenmesine ve optimum kullanımın sağlanabilmesi için hasar önleyici önlemlerin alınmasına imkan verir. Hasar modelleme stratejisi ile tasarımcı plastik malzemenin uygulanabilirliği hakkında daha hızlı bir karar alabilir.

Choong Hyong Kim ve ekibi (2006) plastik dişlilerin sertliği ve aşınmaları hakkındaki deneysel çalışmalarında S45 C çelik çark ile Nylon/asetal plastik pinyon dişli çiftlerini deney makinesinde sabit 1273 rpm hız ve 9,8; 19,6 ve 29,4 N/mm olmak üzere üç farklı yüke maruz bırakmak suretiyle 1×10^7 tur birlikte çalışmaya maruz bırakmışlardır. Araştırmacılar deneyde dişli profili üzerinde delik açarak ve kesit alanında değişiklikler yaparak sıcaklık artışını ve aşınma oranlarını gözlemlemişlerdir.

Sonuç olarak delik açmak ve çelik bir pin yerleştirmenin naylon plastik dişlinin diş yüzeyinde 3-10 C° lik bir sıcaklık düşüşüne neden olduğu, bu düşüşün aşınmada %30, ömürde ise %415 e varan bir iyileştirme sağladığını tespit etmişlerdir. Öte yandan acetal pinyon dişli kesit alanındaki değişimin yük artışı ile birlikte aşınmayı artırdığını saptamışlardır.

Mao K. ve ekibi (2008) çalışmasında acetal ve nylon dişlilerin sürtünme ve aşınma davranışlarını acetal-acetal, acetal-naylon, nylon-acetal ve nylon-naylon dişliler olmak üzere çeşitli konfigürasyonlarla incelemişlerdir.

Aşınmanın kritik yük değerinin üzerinde çok hızlı bir şekilde arttığı, orta rejimde düzgün bir şekilde düşük rejimlerde düzgün bir şekilde arttığı kırılmaya yaklaştıkça hızlı bir şekilde artış görüldüğü belirtilmiştir. Bu kritik değerin acetal-acetal ikilisi için yaklaşık 9 Nm olduğu, nylon-naylon ikilisi için 10 Nm tork yükü altında daha az servis ömrü elde edildiği, nylon pinyon olarak seçildiğinde, acetal dişlisinin termal aşınmaya bağli olarak kırıldığı, acetal pinyon olarak seçildiğinde aşınma performansında oldukça iyileşme görüldüğünü belirtmişlerdir.

Çalışmada aşınma oranındaki değişimin (azdan çoğa) diş yüzeyindeki sıcaklık artışından, diğer bir anlamda polimerin ergime noktasına kadar ısınmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Döndüren dişlinin yuvarlanma noktasında çatlak oluşumunun nedenini ise sıcaklık artışının en çok burda olmasından dolayı bu bölgenin en zayıf olması ihtimalini değerlendirmişlerdir. Öte yandan aşınma ile birlikte pinyon kesit alanının azaldığını, bunun da gerilme yığılmalarına neden olduğunu vurgulamışlardır.

Yakut ve ekibi (2009) diğer bir çalışmalarında plastik dişli diş yüzeyinde oluşan temas sıcaklığının diş hasarı üzerine etkisi hakkında Polyamid 66 malzemeli dişli çark numunesi ile AISI 8620 çelik pinyon dişli numunesini FZG deney test cihazında birlikte çalıştırmışlardır.

Sabit dönme hızı ve üç farklı uygulama yük değerleriyle yaptıkları deneyde diş profillerinde meydana gelen sıcaklık artışının yol açtığı hasarları incelemişlerdir.

Yaptıkları çalışma ile plastik temelli dişli çarkların ısı iletimi metallere göre yüksek olmadığından çalışma esnasında biriken ısı dişli hasarını hızlandırdığı, ısı birikimin özellikle bölüm dairesi civarında olduğu, diş üzerinde biriken ısıyı dağıtmak için ısı iletimi daha yüksek olan farklı bir dişli malzeme seçiminin diş ömrünü artıracığı, malzeme seçiminde elyaf takviyesinin uygun olabileceği sonuçlarına varmışlardır.

Amarnath ve ekibi (2011) çalışmasında düz dişlilerin aşınma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Aşınma katsayıları önce teorik olarak analiz edilmiş, bir model oluşturulmuştur. Çalışmada görülen şu ki, test düzeneğinde meydana gelen titresimin yüzey aşınması üzerinde doğru orantılı bir ilişkisi vardır. Sonuç olarak test koşullarında sertlikte 216 saat sonra %6,2 azalma görülmüştür.

Yakut ve ekibi (2013) ise dişli mekanizmasındaki aşınmayı incelemek amacıyla plastik enjeksiyon makinesi ile ürettikleri PA66GFR30 adlı iyileştirilmiş malzeme çifti ile AISI8620 malzemesi ile üretilmiş dişli numunesini FZG test cihazı kullanarak 750 rpm dönme hızı ve farklı varyasyonlardaki yükler ile birlikte çalıştırmış daha sonra diş yüzeyindeki sıcaklıkları, diş profilindeki korozyon derinliklerini ve diş yüzeyleri ile oluşan hasarı SEM mikroskobu altında incelemişlerdir.

Yapılan çalışmada görülen o ki plastik PA66 malzemesine fiberglas ve karbon fiber ilave edildikçe daha yüksek yüklere dayanabildiği görülmüştür. En belirgin hasarın 750 rpm dönme hızında taban yüksekliği (dedendum) boyunca olduğu görülüp, diş kesiti üzerindeki etkiyen yükün ısı birikimi neticesinde gevşeme ile kopmaya neden olduğu görülmüştür.

Dighe (2014) ve ekibi çalışmasında cam takviyeli polyamid ve PEEK kompoziti ile üretilmiş düz dişlilerin tork iletim kapasitesini ve aşınma direncini araştırmışlardır. PA 66 GF30 ve PEEK GF30 dişlilerine farklı tork ve dönme hızları uygulanmıştır.

Yük artışı sıcaklık artışına ve termal yumuşamalara neden olmuştur. PA 66 GF30 malzemesinin aynı şartlar altında birim aşınma oranının PEEK GF30 dan daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Ayrıca oluşan çatlakların birim aşınma miktarının belirlenmesinde rol oynadığını tespit etmişlerdir.

Zhang ve ekibi (2015) düzgün olmayan bir kavramının, düz dişlerde aşınma yüzeyindeki etkilerini incelemişlerdir. Achard denkleminin Sonlu elemanlar metodu ile kullanıldığı çalışmada, çalışmanın öncesinde aşınma yüzeyi tahmini yapılmıştır. Aşınmada ve servis ömründe etkili olan yük miktarına vurgu yapılmıştır. Düzensiz bir kavramanın düzensiz bir aşınma derinliği rejimine neden olduğu aşınma derinliği önermelerinde uygun bir kavrama tipi görülmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen numunelerin aşınma incelemesi hakkındaki diğer bir çalışmada Rupinder Singh ve ekibi (2017) FDM (Fused Deposition Modeling) Eriyik Yığılma Modelleme yöntemiyle, kullanılan filament malzemede; Nylon6-SiC-Al₂O₃ yüzdeleri değiştirilerek pimler üretmiş, daha sonra oda sıcaklığında DUCOM TL-20 test cihazında çelik bir disk üzerinde aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir.

Daha sonra elde edilen numunelerin aşınma miktarları hesaplanmış ve ABS malzemesi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Numunelerin aşınma izleri SEM de incelenmiş, aynı şartlar altında aşınma miktarının en çok ABS malzeme için 409 µm olduğu görülürken, en az aşınma miktarının ağırlıkça %50 Nylon6, %10SiC, %40 Al₂O₃ karışımında 28 µm olduğu saptanmıştır.

Ramanjaneyulu ve ekibi (2017) enjeksiyon kalıplama yöntemiyle ürettikleri Acetal copolimer plastik dişli içerisindeki grafin malzemesini (ağırlıkça %0,5; 1; 1,5 ve 2 olmak üzere) farklı ihtiva oranları ile üreterek nihai ürünün mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmalarında düz dişliler kullanmışlar, sonlu elemanlar analizi ile en iyi oranın %1,5 oranı olduğu kanaatine varmışlardır.

Çalışmada 5 farklı yükte; kompozit, dökme demir ve polikarbonat dişli çiftleri için Von-Mises stress analizi ve toplam deformasyonu çalışması yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizinde Von Mises gerilmelerinin ve deformasyonların kompozit dişlilerde metalik dişlilere nazaran daha çok olduğunu, düşük yüklü uygulamalarda metalik dişlilerin yerine plastik dişlilerin kullanımının avantajlı olduğunu, tribolojik uygulamalar için değiştirilmiş acetal grafin kompozitinin polikarbonat dişli ile karşılaştırıldığında daha düşük gerilme değerlerine sahip olduğunu, Von -Mises gerilme değerlerinin ve deformasyonların Grafin acetal dişlilerinde polikarbonat dişlilerine göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yalçın ve ekibi (2017) diğer bir çalışmada aşınmanın Tarayıcı Elektron Mikroskobu ile incelenmesi hakkında, AISI 1040 çeliğini farklı süre ve sıcaklıklar altında ortalama 1000°C'de 10 ve 20 N yük yöntemi ile kaplama yaparak morfolojilerini incelemişlerdir. Benzer şekilde 10 ve 20 N yük altında pin on disk methodu ile aşınmalarını incelemiş, SEM görüntüsü alınarak aşınma tipi hakkında yorum yapabilmişlerdir.

Çalışmanın başında abrasif aşınmanın etkili olduğu, zaman ilerledikçe kaplama tabakasının kırılarak kalktığı, kalkan bu tabaka kalıntılarının abrasif aşınmaya, kaymanın ise adhesif aşınmaya neden olabileceği kanısına varmışlardır.

SEM görüntülerindeki aşınma iz genişliklerine bakarak aynı borlama süresinde sıcaklık değişiminin aşınmayı çok da etkilemediğini görmüşlerdir. Sonuç olarak artan yük ve azalan borlama süresi ile aşınma hızının arttığı bilgisine varmışlardır.

Prashant Kumar Singh ve ekibi (2017) polimer düz dişlilerin aşınma ve termal dayanımlarını araştırmak maksadıyla granül formundaki polimerleri enjeksiyon kalıplama metodu ile üretmişlerdir.

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), High Density Polyethylene (HDPE) and Polyoxymethylene (POM) malzemeleri kullanılan çalışmada 0,8; 1,2; 1,6 ve 2,0 Nm tork değerleri ile 600 ,800 ,1000, 1200 rpm dönme hızları varyasyonları ile aşınmanın nasıl gelişme gösterdiği incelenmiş öte yandan servis ömrünün belirlenmesi için sabit dönme hızı (900 rpm) ve tork değerlerinde (1,4 Nm) hangi plastik sınıfının kırılarak daha az dayanıklı olduğu sorgulanmıştır.

Ömür belirlenmesi testi sonrasında ABS'nin 0,5 milyon, HDPE inin 1,1 milyon POM dişlisini kırılmadan 2 milyon çevrim yaptığı, dolayısıyla en dayanıklı polimer çeşidinin POM olduğu gözlenmiştir. Diğer bir yandan yüzey sıcaklık artışının POM da maksimum, HDPE polimerin minimum olduğu, dikkat çeken diğer bir husus ise birim aşınma miktarının ABS de en çok POM da ise en az görülmesidir.

Tavcar ve ekibi (2017) takviyeli polimer dişlilerin hızlandırılmış ömür testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada PA6, PA66, POM and PP malzemelerine cam ve karbon fiber takviyeleri ilave edilmiştir.

Çalışmanın ana amacı çeşitli malzeme varyasyonları elde ederek sürtünme katsayısı, servis ömrü hasar mekanizması konularının çevrim turu ve yüke bağlı olarak incelemektir. Kendinden yağlamalı PTFE malzemesi kullanıldığında sürtünme katsayısında %60, operasyon sıcaklığında %41 'e varan azalma görülmüştür.

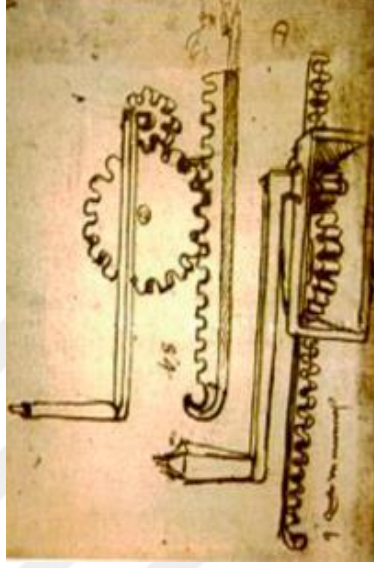
Ayrılmış (2018) çalışmasında odun talaşı katkılı PLA filamentini kullanarak ürettiği numularda katman kalınlığının yüzey kalitesine olan etkisini incelemiştir. Katman kalınlıkları olarak 0,05 mm; 0,1mm; 0,2 mm ve 0,3 mm olmak üzere farklı katman kalınlığı varyasyonları kullanılarak yüzey pürüzlülükleri profilometer ile ölçülmüştür.

Ayrıca katı yüzeydeki gerilmelerin azalması ile malzemenin yazdırılabilme özelliğinin arttığını belirtmiştir. Öte yandan katman kalınlığı ile yazma süresi arasında ters bir orantı olduğunu ve optimum katman kalınlığı 0,2 mm olarak belirlemiştir.

1.BÖLÜM

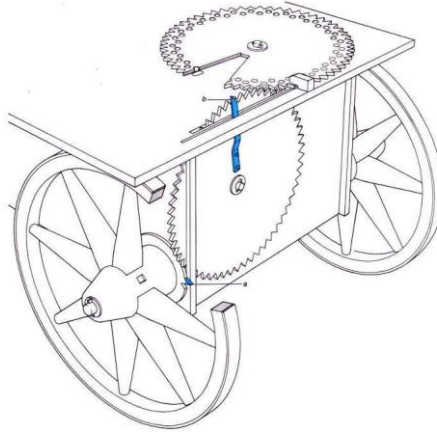
TARİHÇE

Dişlilerin tarihçesi tekerleğin bulunmasına dayanmakla birlikte dişliler hakkında ilk tanımlar 4. Yüzyılda Aristo tarafından; birlikte çalışan iki dişli hakkında yapılmıştır. Dişlilerden biri diğerini döndürmeye başladığında dönme yönünün ters olduğu anlaşılmıştır. Dişlilerin daha sonra Yunan mucitler tarafından saatlerde ve su çarklarında kullanıldığı bilinmekte olup farklı tipte dişli çark taslaklarına Leonardo Da Vincinin notlarında rastlanılmaktadır. (Carvero,2020)



Resim 1.1. Da Vinci nin dişli taslağı (Carvero,2020)

M.S 60 yıllarda Alextendra Heron dişliler ile hareket iletimi konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiş, büyük yükleri birbirine paralel dişler kullanarak az bir efor ile taşımayı başarmış, Arşimet tipi tahrik mekanizmasını kullanarak hazırladığı mesafe ölçer (odometer) cihazı geliştirmiştir.



Şekil 1.1. Arşimetin odometer tasarımı (Anonim,2022)

Yunanlılar M.S 80'li yıllarda 30'dan fazla dişli mekanizması içeren, daha bir karmaşık yapısı olan Antikythera adlı cihazı tasarlamışlar, bu cihazı Astronomi alanında Güneş ve Ayın mesafelerini ölçebilmek için kullanılmışlardır (Gear Technology Journal, 1999).



Resim 1.2. Arşimetin Antikythera mekanizması (Yunan Ulusal Arkeoloji Müzesi, Atina)

2. BÖLÜM

DİŞLİ ÇARKLAR

Dişliler ağır makine sanayinin yanında günlük hayatta fanlarda, çamaşır makinelerinde küçük ev aletlerinde, oyuncak bir trenin mekanizmasında, yazar kasa gibi basit araçlarda da kullanılmaktadır.

Silah, gemi, tank gibi savunma sanayide kullanılan dişliler de ise mümkün olduğunca boşluksuz dişliler kullanılmaktadır. Burada asıl amaç hareketi iletmekle birlikte ikinci amaç olarak iyi bir açısal hareket kontrolü ile güç iletimidir.

Otomobil sanayinde genelde şanzımanda iletim aracı olarak düz ve helisel dişli çarklar kullanılmaktadır. Birçok otomatik şanzıman da ise manuel şanzıman tertibatından daha çok dişli bulunmaktadır.

Traktör, kamyon gibi büyük yükler taşıyan araçlarda da büyük çapta dişli çarklar kullanılmaktadır. Otomotiv sanayinde kullanılan dişlilerin sertleştirilmesi için ısıtma işlemi olarak karbürleme işleminin yapılmasının yanı sıra kimi zaman nitrürleme işleminin de yapıldığı görülmüştür.

Gemilerin pervane tahrikleri için 5m ye yakın dişliler kullanılmakla birlikte gürültü faktörünün önemli olması nedeniyle karbürlenmiş ve taşlanmış dişliler daha hafif ve küçük olarak tasarlanmaktadır. (Raarezevic,2012)

Plastik dişliler yükün az olduğu daha çok hareket iletiminin ön plana çıktığı sistemlerde kullanılmaktadır. Örneğin; Gıda sanayinde hijyen şartlarının önemli durumlarda yağlama; sızıntı ihtimaline karşı istenmeyen bir uygulama olmaktadır. Benzer şekilde kimyasal reaksiyonlarının önüne geçilmesi ve yine hijyen şartlarının ön planda tutulduğu ilaç sanayinde, plastik dişlilerin kullanımı elzem hale gelmiştir.

Plastik dişlilerin yağlama olmadan çalışması, bu sektörlerde kullanımını cazip kılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi yükün az olduğu durumlarda, Oyuncak arabaların, hareketini sağlayan dişli çark mekanizması da plastik dişlilerden oluşmaktadır.

Plastik dişlilerin çelik dişlilere göre daha kısa sürede ve kolay üretilmesi ile üretim maliyetleri de oldukça azalmıştır. Plastik dişlilerin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kimyasal reaksiyona girme eğilimleri düşük olduğu için korozyon direnci
- Aşınma katsayıları düşük olduğu için daha sessiz çalışma
- Üretim aşamalarının daha az sayıda olması ve bu aşamaların daha kısa süre alması ile daha az enerji ve üretim maliyeti oluşturmaları
- Hafif olmaları

Bahsedilen avantajlarının yanında plastik dişlilerin dezavantajları da şöyle sıralanabilir.

- Termal dirençlerinin düşük olmasından sıcaklık artışı ile yumuşamaya başlaması
- Taşıma kapasitesinin düşük olması sebebiyle yüksek tork ile çalışan mekanizmalarda kullanmak yerine hareketin iletimi maksadıyla kullanılması
- İşlenebilirliği metallere göre daha kötü olması

Dişli çarklar, eksenleri birbirine yakın veya birbirini kesen miller arasında hareket ve güç ileten makine elemanlarıdır. Çevrelerine diş açılmış iki dişli çark bir dişli çiftini oluştururlar ve bunlardan biri diğerini çevirir. Hareket ve kuvveti aktaran dişliye ÇEVİREN (pinyon), diğerine de ÇEVİRİLEN (çark) denir. Dişli çarklar biçimlerine ve takıldıkları millerin konumlarına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

Genel olarak dişliler, dişli çiftinin eksenlerinin konumlanmalarına göre sınıflandırılabilir. En genel dişli çifti türünde eksenler dik ya da paralel değildir. Aynı düzlem üzerinde uzanmazlar.

Tablo 2.1. Dişlilerin Gruplandırılması (Varol,2005)

Dişli Cinsi	Millerin Konumu	Dişli Biçimi
Düz Dişli Çarklar	Paralel	Silindir
Helisel Dişli Çarklar	Paralel Çapraz	Silindir
Konik Dişli Çarklar	Birbirini Kesen	Konik
Sonsuz Vida ve Karşılık Dişlisi	Çapraz	Silindir

2.1. Paralel Eksenli Dişliler

Paralel şaftlara bağlı en basit dişli tipleridir. Üretimi kolay ve yüksek miktarda gücü iyi bir verimle iletebilen dişlilerdir. Diğer dişli tipleriyle kıyaslarsak daha verimli paralel eksenli dişliler daha etkili bir güç aktarımı sağlarlar.

2.1.1. Düz dişliler

En yaygın olan düz dişli modelinde dişler silindirin dışında yer almıştır ve dişler silindir eksenine paraleldir. Daha az sayıda diş sayısına sahip Pinyon dişlilerde düşük basınç açısı diş dibi kesilmesi (undercutting) gibi tehlikeli durumlar yaratabilir. Düşük basınç açılı dişliler daha düşük eğilme dayanımına sahiptir ve daha yüksek kayma hızlarıyla çalışırlar. Bu da aşınma direncini azaltıcı bir faktördür.

Daha yüksek basınç açılarının dayanıklılık ve düşük kayma hızlarıyla birlikte daha iyi bir yük taşıma kapasitesi olduğunu söylenebilirken, bazı durumlarda $28,30^\circ$ yüksek basınç açıları çok yüksek yük kapasiteleri ile çok düşük hızda ve gürültünün önemli olmadığı durumlarda kullanabilmektedirler.



Şekil 2.1.Düz dişliler (Hijazi)

2.1.2. Helisel dişliler

Bir silindir etrafında sarılı bir spiral şeklindeki dişli tipi helisel dişlilerdir. Helisel dişliler eşlenme bölgesine kademeli olarak girerler ve daha sessiz çalışma eğilimindedirler. Daha küçük helisel dişliler düz dişliler ile karşılaştırıldığında aynı yükü iletilebilirler.

Aynı yüke maruz kalan düz ve helisel dişliler kıyaslandığında helisel dişlinin ki daha yüksek de denilebilir. Helisel Dişliler düz dişlilerin eksenleri ayırmak için shaft eksenleri boyunca son bir itki üretirler. Helisel dişli çiftinin verimi; normal toplam diş yüküne (sürtünme katsayısı ve kayma hızı) bağlıdır ve az da olsa eşdeğer düz dişliden düşüktür. Kavramsal olarak helisel dişliler adımı sonsuz, daha küçük düz dişliler olarak da düşünülebilir.

Dış paralel eksenli helisel dişliler aynı helis açısına sahip olmalıdırlar ancak farklı elle gösterilmelidir. Düz Dişlilere göre gürültüyü azaltmak için helis açısını 0 dan 45 dereceye kadar artırdığımızda yük kapasitesi de artar. (Radzevich,2016)



Şekil 2.2. Helisel Dişli Örneği(Hijazi)

2.1.3. Kramyer dişliler

Kramyer Dişliler Dairesel hareketin doğrusal harekete çevrilmesi için kullanılırlar. Kayar kapılarda, vinçlerde kullanılırlar.



Şekil 2.3. Kramyer Dişli Örneği (Hijazi)

2.2. Eksenleri Kesişen Dişli Çarklar

2.2.1. Konik dişli çarklar

Konik dişliler, eksenleri birbirine paralel olmayan bir milden diğer bir mile hareket ve kuvvet iletmekte kullanılırlar. Torna tezgâhında genel parça geometrisi işlendikten sonra Freze tezgâhında dişler açılır. Dönme ekseninin belli bir açıyla iletilmesinde kullanılır. Kuvvet makinelerinde ve taşıtların dişli kutusunda sıkça rastlanılır.



Şekil 2.4. Konik dişli çark (Varol,2005)

2.2.2. Çavuş dişli çarklar

İki adet zıt yönlü helis dişlinin birleşiminden oluşurlar. Eksenleri paralel miller arasında güç ve hareket iletmek için endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadırlar.

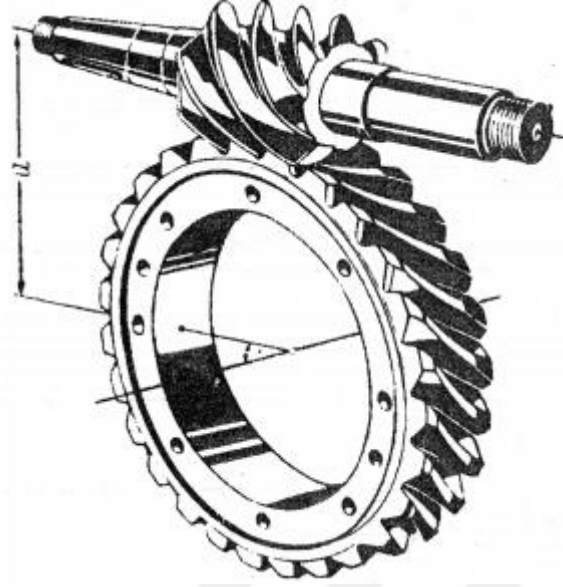


Resim 2.1. Çavuş dişli örneği (Anonim,2022)

2.2.3. Sonsuz vidalı dişli çarklar

Yüksek devir oranları düşürülerek, yükün ağır ve hız oranının küçük olduğu yerlerde az bir kuvvet harcayarak çok iş görme sağlanır. Dişli çifti, sonsuz vida ve karşılık dişlisinden oluşmuştur. Sonsuz vida; dişler, dişli mili etrafında helisel bir yörünge üzerindedir. Vida kenar yüzleri 30° kremayer şeklindedir.

Karşılık dişlisinin dış tarafında çalışır. Çalışma durumlarına göre sağ veya sol helis olarak yapılmakta olup 1,2,3,4 ve daha çok ağızlı olabilirler. Hesaplar sonsuz vidaya göre yapılır. Vida tek ağızlı ise düz dişliler gibi hesap edilirler, 2 ve daha çok ağızlı olduklarında helisel dişli gibi hesaplanırlar.



Şekil 2.5. Sonsuz Vidalı Dişli Çark(Varol,2005)

2.2.4. Planet dişli çarklar

Planet dişliler bir iç dişli, bir merkez dişli ve ikisi arasında çalışan genellikle 3 adet planet adı verilen dişliden oluşan bir dişli grubudur. Özellikle kepçe, greyder, vinç gibi iş makinelerinin yürüyüş takımlarında kullanılır.

Sabit bir çevre dişlisi ve bunun etrafında dönen pinyon dişlilerden çıkış şaftına aktarılan düşük devir ve yüksek tork bu dişli grubunun temel çalışma prensibini oluşturur.

Planet dişli gurubundaki ana elemanlar şunlardır:

- a) Çevre dişlisi (Bu daha çok sabit bir iç dişlidir)
- b) Planet dişliler (çevrede dönen dişliler)
- c) İnpıt şaftı: İnpıt şaftından planet dişlilere dönme hareketini aktaran kol
- d) Güneş Dişli: Dönme hareketini planet dişlilerden output şaftına aktaran merkez dişli (Sun gear)



Şekil 2.6. Planet Dişli Örneği [Anonim,2022]

2.2.5. Zincir dişliler

Zincir dişliler birbirine paralel fakat mesafesi uzak iki eksen arası hareket iletimini sağlar. Hareket iletiminde kayma söz konusu değildir. Bilhassa sessiz çalışmaları ve güvenli olmalarından, endüstrinin birçok dallarında, otomobil, gemi, makine yapımında özellikle tercih edilirler. Bazı makinelerde ve bisikletlerde kullanılır.



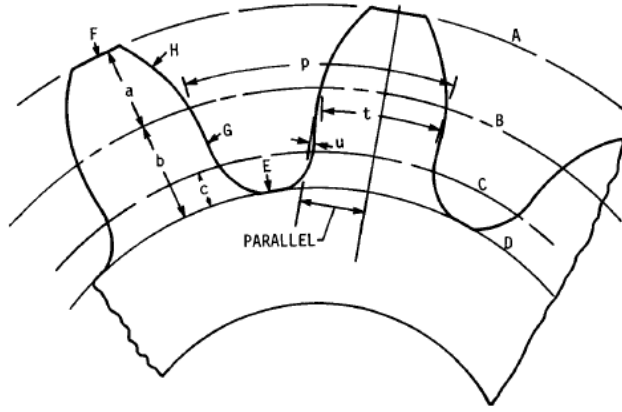
Resim 2.2. Aktarmalı Zincir Dişli Örneği (Anonim,2022)

2.3. Dişli Çark Temel Büyüklükleri

Bir makine elemanı olarak dişliler, mekanizma içersinde hareketi düzenli iletilebilmeleri için, uyum içerisinde çalışabilmeleri gerekir bu nedenle de dişlilerin tasarım aşamasında boyutlarının bilinmesi gerekmektedir. Dişli çarklar ile ilgili temel boyutlar ve formülleri **Tablo 2.2'**de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Dişli çark mekanizması sembol ve formülleri

Tanım	Sembol	Formül
Diş sayısı	Z	
Modül	m	$m = \frac{D_o}{Z}$ veya $m = \frac{t}{\pi}$
Adım, taksimat	t	$t = \pi m$
Taksimat dairesi çapı	D_o	$D_o = mZ$
Diş başı yüksekliği	h_b	
Diş tabanı yüksekliği	h_t	
Diş baş dairesi çapı	D_b	$D_b = D_o + 2h_b$
Diş taban dairesi çapı	D_{tb}	$D_{tb} = D_o - 2h_t$
Diş tabanı dairesi		$D_i = D_o - 2 \cdot 1.25$
Standart Kavrama açısı	α	$\alpha = 20^\circ$ (DIN 867)
Diş taban dairesi çapı	D_{t_1}	$D_{t_1} = D_{o_1} - 2,5m$
	D_{t_2}	$D_{t_2} = D_{o_2} + 2,5m$
Eksenler arası mesafe	a	$a = \frac{D_{o_1} + D_{o_2}}{2}$
Temel Dairesi çapı	D_g	$D_g = D_o \cos \alpha$
Kavrama Oranı	ε	$\varepsilon = \frac{\text{Kavrama Kıtası}}{t \cos \alpha}$
Çevrim Oranı	i	$i = D_{o_2}/D_{o_1} = \omega_1/\omega_2 = Z_2/Z_1$



Şekil 2.7 Bazı terimlerin dişli üzerinde gösterimi (Shigley, 2004)

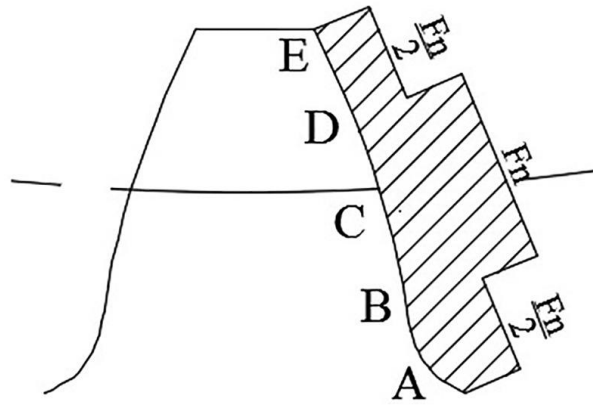
Tablo 2.3. Dişli tanımlarının gösterimi

Sembol	Tanım	Formül
A	Diş üstü(baş) dairesi	$A=B+a$
B	Yuvarlanma dairesi	$d=z.m$
C	Temel dairesi çapı	$C=D_t=d.\cos\alpha$
D	Taban dairesi çapı	$D=B-2b$
F	Diş üstü çapı	$F=B+2a$
P	Taksimat, hatve, adım	$t= \pi.m$
a	Diş başı yüksekliği	
b	Diş dibi yüksekliği	
	Diş yüksekliği	$a+b$
t	Diş kalınlığı	
ϵ	Kavrama oranı	$\epsilon=\text{Kavrama boyu}/t.\cos\alpha$
v	Çevresel hız	$(v)=\pi.d.n/60000 \text{ (m/h)}$

2.4. Dişli Çarklarda Kavrama

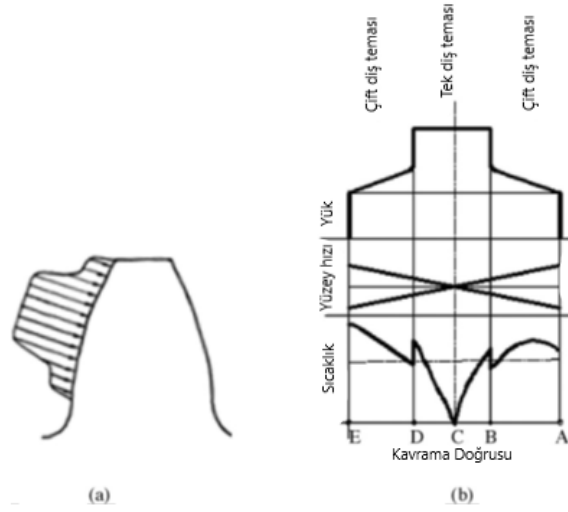
Bir dişli çiftinin kavramaya girmesi bir dişlinin başının diğer dişli tabanı ile teması ile başlayıp, temaslarının bitinceye kadar ki süredir. Bu süre içerisinde temas halindeki noktaların oluşturduğu doğru kavrama boyu olarak tanımlanmıştır.

Kavrama boyunca, kavrama oranı düz dişlilerde ϵ olarak simgelenirse, kavrama oranı $1 > \epsilon > 2$ olarak ifade edildiğinde; bir dişlinin kavrama sırasında birden fazla dişle temasta olduğu, bir dişin neden olduğu kuvvetin karşılık iki dişli tarafından paylaşıldığı; Öte yandan dişli hareketinin sürekliliği açısından ϵ değerinin 1 den küçük olmadığı sonucu elde edilebilir.



Şekil 2.8. Kavrama süresince dişliye etkiyen kuvvetler (Yuan,2018)

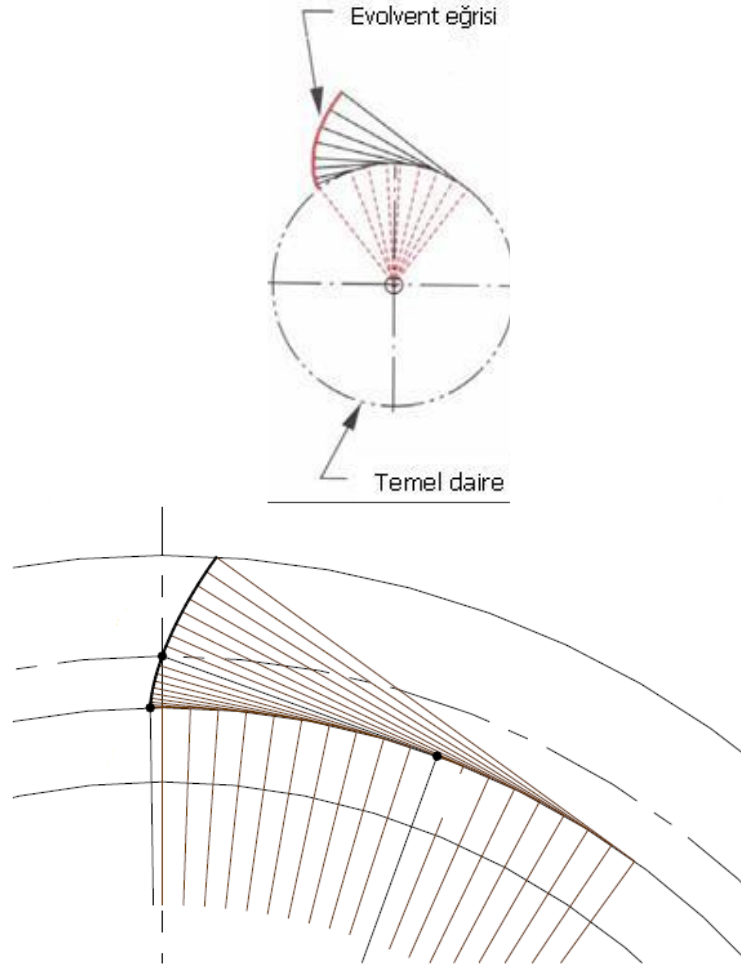
Şekil 2.8’de A kavramanın başlangıç noktası, E kavramanın bitiş noktası olarak farz edilirse, F_n kuvvetinin tamamının taksimat noktası da dâhil olmak üzere B ve D noktaları üzerinde etkili olduğu (tekil kavrama), AB ve ED bölgeleri arasında ise F_n kuvvetinin yarısının dişliyi etkilediği (çift kavrama) görülmektedir.



Şekil 2.9 Kavrama sırasında diş üzerindeki yük dağılımı (İmrek, 2007)

Şekil 2.9 (b) incelendiğinde ED bölgesinde çift kavramanın olduğu, tekil kavrama noktası olan D noktasında yükün arttığı, BD doğrusu boyunca maksimum olduğu, tekrar B noktasında ise yarıya düştüğü görülmektedir. Kuvvet dağılımının aksine (kavrama) C noktasına yaklaştıkça sıcaklık ve hızın sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Bu durumun nedeninin, kavrama noktasında kayma hareketinin olmadığı, sadece yuvarlanma hareketi olduğundan kaynaklandığı bilinmektedir.

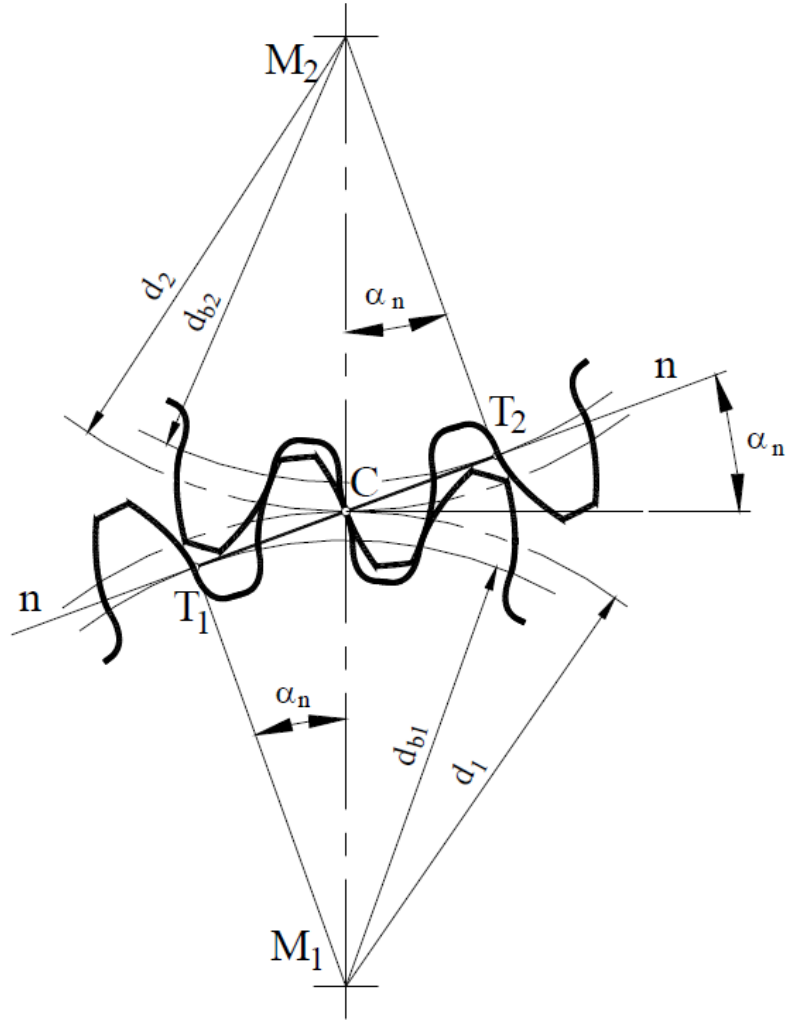
Diş profili, çalışma sırasında iki dişli arasındaki oranı değişmeyecek şekilde tasarlanır. Dişli profillerinde en çok kullanılan ve bu özelliği sağlayan eğri *evolvent* eğrisidir. Evolvent, bir çember üzerinde kaymadan yuvarlanan bir doğru parçası üzerindeki bir noktanın çizdiği eğri olarak tanımlanmaktadır. Doğru üzerindeki bir noktanın, doğrunun daire üzerinde kaymadan yuvarlanması esnasında çizdiği eğriye evolvent eğrisidir ve bu eğri, temel daire olarak adlandırılan çember üzerinden başlar. (Varol Kemal, Dişli Çarkların Teknik Çizimi, Dokuz Eylül Üniversitesi)



Şekil 2.10. Evolvent Eğrisinin Çiziminin Gösterimi (Varol, 2005)

2.5. Kavrama Açısı

Kavrama Açısı dişli çiftinin temel dairelerine çizilen teğet n-n doğrusu ile taksimat dairelerinin kavrama noktasından geçen C noktasından geçen teğet ile yaptığı açıdır. α_n talebe göre seçilir. Genelde evolvent dişlilerde $\alpha_n = 20^\circ$ olarak kullanılır. Bazı özel hallerde diş dibi mukavemetini artırmak, diş dibi kesilmesi olmadan dişli üretmek ve sınır diş sayısını büyütmek için kavrama açısı 20° 'den büyük seçilir.



Şekil 2.11 Kavrama Açısının Dişli Üzerinde Gösterimi (Varol,2005)

2.6. Düz Dişli Çarkların Mukavemet Hesabı

Dişliler birlikte çalışırken birbirlerinin profil yüzlerine dik olacak şekilde kuvvet uygularlar. Temas süresince dişli yüzeyine etkiyen, değişmeyen bu kuvvete diş kuvveti denir. Kavrama boyunca oluşan bu kuvvet iki bileşene ayrılmak istenirse; F_r radyal ve F_t teğetsel olarak tanımlanır ve bu bileşenler arasındaki basınç açısı da α_b olarak gösterilmiştir.

$$F_{tb} = F_n \cos \alpha_b \quad (2.1)$$

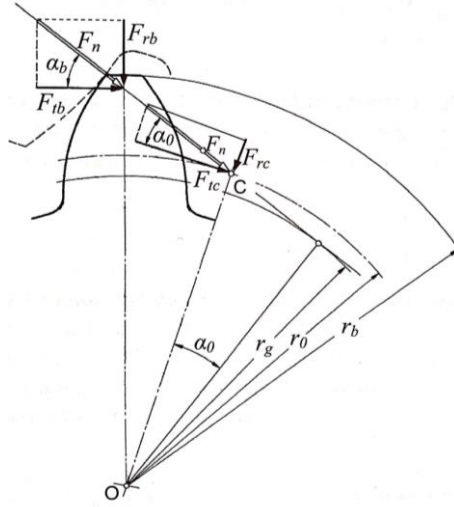
$$F_{rb} = F_n \sin \alpha_b \quad A = \pi r^2 \quad (2.2)$$

şeklindedir. İletilen nominal burulma momenti M_b

$$F_{tb} = \frac{2M_b}{db} \quad (2.3)$$

$$M_b = \frac{P}{\omega} \quad (2.4)$$

olmak üzere P makinenin nominal gücüdür.



Şekil 2.12. Diş kuvveti F_n ve bileşenleri (Tevruz,2015)

Dişlilerin yuvarlanma dairesi üzerinde temas anındaki kuvvet bileşenleri yeniden ifade edilirse,

$$F_t = F_n \cos \alpha_0 \quad (2.5)$$

$$F_r = F_n \sin \alpha_0 \quad (2.6)$$

ise bu eşitliklerden;

$$F_r = F_t \tan \alpha_0 \quad (2.7)$$

$$F_t = \frac{2Mb}{d_{01}} \quad (2.8)$$

Döndüren dişli (pinyon) 1, döndürülen(karşılık) dişli 2 indisi ile gösterildiğinde; pinyonun çarka uyguladığı kuvveti 2, çarkın pinyona uyguladığı kuvveti 1 olarak tanımlanırsa, etki tepki eşitliğinden;

$$F_{nb1} = F_{nb2} \quad (2.9)$$

$$F_{tb1} = F_{tb2} \quad (2.10)$$

$$F_{rb1} = F_{rb2} \quad (2.11)$$

Yatak kuvvetlerinin hesaplanmasında, dişli çarkların malzeme seçiminde kuvvet yönlerinin ve şiddetlerinin belirlenmesi tasarım açısından önemlidir. Teğetsel kuvvet döndürülen dişliye tesir eder ve yönü, dönme yönü ile aynıdır. Pinyon dişliye tesir eden kuvvet ise bu kuvvetin tersi yönünde olup, şiddet olarak eşittir. Radyal kuvvetlerin yönü her zaman ait olduğu dişlinin merkezine doğrudur. (Tevruz Talat; Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Cilt 3)

2.7. Genel Dişli Kanunu

Dişliler dönme ve yuvarlanma hareketi yaparlar ve birlikte çalışabilmeleri için profillerinin birbirleriyle uyum sağlamaları gerekmektedir. O_1 noktası etrafında pinyon dişli ω_1 açısal hızıyla, karşılık dişli ise O_2 noktası etrafında ω_2 açısal hızıyla dönerken, birbirilerine X noktasında etkidikleri varsayılırsa, X noktası bu iki dişlinin kavrama noktası, V_1 ve V_2 ise dişlilerin çevresel hızları olarak ifade edilmiştir.

$$V_1 = R_1 \omega_1 \quad (2.12)$$

$$V_2 = R_2 \omega_2 \quad (2.13)$$

Bu hızların bileşenleri V_{n_1} , V_{t_1} , V_{n_2} , V_{t_2} olsun.

$V_{n_1} = V_{n_2}$ dir.

O_1 ve O_2 noktalarının ortak normale uzaklıkları sırasıyla $O_1T_1 = r_{g1}$ $O_2T_2 = r_{g2}$ olduğuna göre hızlar O_1

$$V_{n1} = r_{g1} \omega_1 \quad (2.14)$$

$$V_{n2} = r_{g2} \omega_2 \quad \text{olmak üzere çizgisel hızlar birbirine eşit olduğundan} \quad (2.15)$$

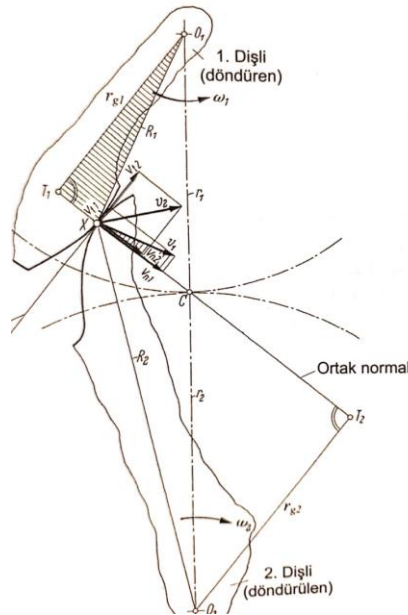
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{g2}}{r_{g1}} \quad \text{ifadesi elde edilir ve } O_1T_1C \text{ ve } O_2T_2C \text{ üçgenlerin benzerliğinden} \quad (2.16)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{g2}}{r_{g1}} = \frac{r_2}{r_1} \quad = \text{sabit olmak üzere } V_{n1} = V_{n2} \text{ eşitliği elde edilir.} \quad (2.17)$$

Diğer taraftan $\frac{\omega_1}{\omega_2} = i$ çevrim oranı olup, sabit bir değer alır. O_1O_2 eksenler arası mesafeyi her çevrimde hep aynı oranda $\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$ bölen yalnızca bir C noktası vardır. Dişli çarkların ortak normallerinin bu C noktasından geçmesiyle çevrim oranı sabit olarak kalır. Bu tanım ise dişli kanunu olarak açıklanmaktadır.

Dişli kanunun bir sonucu olarak dişli çarklar, dönmenin her anında sabit oranda hız iletebilmeleri için, profillerin herhangi bir temas noktasındaki ortak normali daima "C" yuvarlanma noktasından geçmek zorundadır.

C noktasında diş profillerinde kayma hareketi olmamakta, yalnızca yuvarlanma hareketi gerçekleşmektedir. Bu nedenle C noktasına yuvarlanma noktası (pitch point), oluşan daireye de yuvarlanma dairesi adı verilmektedir. (Tevruz, 2015)



Şekil 2.13. Genel Dişli Kanunu'nda hızların gösterimi (Tevruz, 2015)

3. BÖLÜM

PLASTİK DIŞLI ÇARKLAR

Malzeme seçimi gerek dişli çarkın ileceği tork, dişlinin maruz kalacağı basınç açısından gerekse çalışma ömrünün belirlemesi açısından, önem arz etmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi traktör, vinç gibi yükün önemli olduğu alanlarda büyük çaplı dişli çarkların yapımında, ya da hızın önemli olduğu araç vites kutularındaki dişli çarkların yapımında çelik, sementasyon çeliği gibi metaller kullanılırken özellikle tekstil sektöründe, sesin önemli olduğu elektrik motorlarında, oyuncaklarda, basit ev aletlerinde, yükün az olduğu alanlarda plastik dişlilerin kullanımına da sıkça yer verilmiştir.

Plastik malzeme olarak Nylon (PA12, PA66), Teflon (PTFE), Polietilen (PE) gibi termoplastik malzemelerin yanında termoset sınıfı (yeniden dönüşümü olmayan) malzemelerde kullanılmaktadır. Bu malzemelere belli oranda karbon, bronz, cam elyaf da katılarak malzemeyi iyileştirme yoluna gidilmektedir. (Talat, 2015)

3.1. PLASTİK ÇEŞİTLERİ

3.1.1. Polyamid (PA)

Piyasada Nylon olarak da bilinen Polymaid, dünyada üretilen ilk sentetik lifidir. Mekanik dayanımın iyi olmasının yanında, kimyasal dayanımı çok iyi değildir. Nylon tekstil sektöründe başlarda çorap imalatında kullanılırken daha sonra giyim sektöründe daha çok yerini almıştır. [tekstilbilgi.net]

3.1.2. Polietilen (PE)

Normal ve düşük sıcaklıkta çarpma mukavemeti yüksektir. Asitlerden, alkalilerden ve organik çözücülerin birçoğundan etkilenmez. Bu nedenle yapıştırılamaz. Her türlü ek ve birleştirme parçalar ısıtılıp (ergitilip) birbirine bastırılarak yapılır. Yumuşama derecesi 75 C° dolayında olup 120-130 C° dolayında yumuşayan türü de vardır. Elektrik yalıtkanlığı iyidir. Bu özelliği nedeniyle elektrik kablolarında kullanılır. Polietilenin bir diğer kullanım alanı ise, sulama ve yağmurlama borularıdır. Ancak malzemenin ısı genleşme katsayısının çok yüksek olduğundan malzeme güneş ışınlarından etkilenecek şekilde zamanla kırılabilir.

3.1.3. Politetraflor etilen, teflon (PTFE)

Sıcağa karşı dayanıklı, sürtünme katsayısı çok düşük bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle daha çok mutfak eşyalarının kaplanması (teflon tava vb.) kullanılır. Yapı alanında köprü mesnetlerinde ve katı madde taşıyan boruların iç kısımlarının kaplanmasında kullanılır. Pahalı olduğundan daha çok kaplama malzemesi olarak kullanılır. (Sarıbayık Mehmet, Sakarya Üniversitesi)

3.1.4. Poliester reçinesi

Poliester reçinesinin pek çok kullanım alanı vardır. Örneğin dakron ve terilen diye bilinen kumaşlar, poliester reçinesi yapıda daha çok cam takviyeli plastik (CTP) malzeme halinde kullanılır. CTP malzeme poliester reçinesi emdirilmiş cam tl veya cam keçenin kalıplanarak şekillendirilmesi ve polimerleşme sonucu sertleşmesiyle üretilir. CTP malzemeye örnek olarak oluklu, ondüleli çatı kaplama levhaları, su tankları, basınçlı borular gösterilebilir. CTP malzeme genellikle yarı saydamdır. Ancak boyanabilir. Poliester reçineleriyle üretilen başka örnekler; polimer betonu ve suni mermerdir.

3.1.5. Epoksi reçinesi

Epoksi reçinesi bir sertleştiricinin katılmasıyla sertleşen iki bileşenli bir plastik maddedir. Bileşime ayrıca renklendiriciler, dolgu maddeleri, seyrelticiler de katılabilir. zellikleri çok değişken olup çok sert veya yumuşak, hafif veya ağır olarak üretiler.

zellikleri bileşime giren maddelere bağlıdır. En önemli özellikleri yapıştırıcı olmalarıdır. Her türlü malzemeyi yapıştırmada kullanılabilir.

Yapıda yapıştırma işlerinde, çatlakların kapatılmasında, yüzeylerin dış etkilere karşı korunmasında kullanılır. Reçine karışımı, uygulanacağı yüzeye fırçayla sürülebildiği gibi püskürtme ve diğer yollarla da uygulanabilir. Karışım kısa sürede sertleştiğinden kullanımdan hemen önce hazırlanmalıdır. Piyasada Araldit, 404 gibi adlarla satılmaktadır. (Sarıbayık M., Sakarya Üniversitesi)

3.1.6. Kestamid (Cast Polyamid)

Kestamid polyamid grubundan bir malzemedir ve döküm yoluyla elde edilir. Sarı renktedir, arzu edilirse siyah ya da farklı renklerde retiler. Kestamid in üstün tarafı aşınma mukavemetinin yüksek olmasıdır.

Takım tezghlarında ve işleme tablalarında işlenmesi kolaydır. Piyasada döküm naylon olarak da bilinmektedir. Yatak, burç, kızaklarda, kaplinlerde, elevatör kovalarında, dişlilerde kullanılmaktadır.

3.1.7. Akrilonitril btadiyen stiren (ABS)

ABS, Akrilonitril, 1,3-Bütadiyen ve Stiren monomerlerinden elde edilen, opak bir termoplastik polimer malzemesidir. Düşük sıcaklıklarda dahi güçlü ve dayanıklı olan yapısı sayesinde ısı ve kimyasallara karşı iyi direnç gösterir ve işlenmesi kolaydır. Akrilonitril Bütadiyen Stiren 1940'lardan beri kullanılmaktadır.

Stiren karşısında artan sağlamlığı onu çoğu uygulamaya uygun hale getirmiştir, ancak beraberinde getirdiği kısıtlamalar üçüncü bir monomer olarak kauun (btadiyen) kullanılmasına yol açmıştır. Böylece yaygın şekilde ABS olarak bilinen malzeme birleşimi ortaya çıkmıştır.

Bu malzeme 1950'de piyasada yer edinmiştir ve bu kopolimerlerin çeşitliliği ve kolay işlenebilirliği sayesinde ABS en yaygın kullanılan mühendislik polimeri olmuştur. ABS, piyasadaki en popüler polimerlerden biri olmasının nedenleri:

- esnek tasarım
- mükemmel yüzey kalitesi
- parlak ve derin renkler
- ilgi çekici his ve dokunuş
- boyut kararlılığı
- kimyasal direnç
- darbe dayanımı

ABS, enjeksiyonla kalıplama veya ekstrüzyon tekniğiyle işlenebilir. İşlenmemiş ABS pahalı bir malzeme olduğundan, ABS'in geri dönüştürülmesi ekonomik olarak çok caziptir. Geri dönüştürülmüş ABS, işlenmemiş malzemeye harmanlanarak düşük maliyetli ancak yüksek kaliteli ürünler üretilebilir. (Anonim, 2022)

3.1.8. Polilaktik asit (PLA)

Üç boyutlu yazıcılar ile üretimde oldukça sık kullanılan polimer çeşidi olan PLA, kaynağının şeker ve mısır kamışından olması ile çevre dostu olarak anılmaktadır. Medikal sanayide tek kullanımlık ürünlerin imalatında kullanılıyor olması PLA'nın kimyasal direncinin yüksek olduğunun ve biyolojik olarak insan sağlığı ile uyumlu olduğunun bir göstergesidir.

PLA bir biyopolimer olup, şeker kamışı ya da mısır nişastası gibi yenilebilir kaynaklardan elde edilir. Üç boyutlu yazıcı ile üretimi elverişli bir malzeme olmasına rağmen üretim sonrası çekilme, büzülme oluşması olasıdır.

PLA hızlı katılaşması ve soğuması sebebiyle şekil vermesi zor bir plastik türüdür. PLA ile üretim birçok renk seçeneği sunmasına karşın, elde edilen ürünlerin suya karşı dayanıklılığı kötüdür. (Anonim, 2022)



Resim 3. 1 PLA nın gıda endüstrisinde kullanımına bir örnek (Anonim,2022)

PLA kullanım alanları arasında ev aletleri, hazır gıda paketlerinde, oyuncaklar, gösteri objeleri, mimari modellerin üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca PLA ürünleri uzun süre dışarıya açık ve 50 C⁰ üzerindeki sıcaklıklardan da uzak tutulmalıdır.

Plastik basım öncesi önce katı durumdan ısınır, daha sonra camsı sıcaklığa ulaşır ve en son ergime noktasına ulaşarak basılmaya hazır duruma gelir. Camsı geçişe ulaşma sıcaklığı, yazıcı platformu sıcaklığını ve yazma sıcaklıkları hakkında karar verebilmek için önem arz etmektedir. Baskı işleminde daha sonra değişiklik yapmamak için platform sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığın altında tutulmalıdır.

Tablo 3.1. PLA ile ABS malzemelerinin kıyaslaması

	Birim	PLA	ABS
Yazıcı Platform Sıcaklığı	(C°)	20-60	80-110
Camsı Geçiş Sıcaklığı	(C°)	57	104
Ergime Sıcaklığı	(C°)	150-160	*
Yazma sıcaklıkları	(C°)	190-230	210-250

*Saf amorf yapıdaki ABS malzemesinin net bir ergime noktası olmamakla birlikte yazma sıcaklığının altında erimektedir.

Tablo 3.1. de görüleceği üzere camsı geçiş ile ergime sıcaklığına daha kolay erişebilmesi ve yazıcı platformuna ihtiyaç duyulmaması nedeniyle PLA malzemesinin avantajları olduğu söylenebilir.

Bu avantajlarının yanında PLA erirken yapışkanlı bir hal kazanarak yazıcı nozuluna zarar verebilir. ABS ise yüksek sıcaklıklarda iyi bir akma eğilimi gösterir. (Anonim,2022)

Tablo 3.2. Polimerlerin mekanik özellikleri hakkında genel bir tablo (İngiliz Plastik Federasyonu)

Polimer	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastise Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Çentikli İzod Darbe Dayanımı (kJ/m)	Yüzey Sertliği
Yüksek yoğunluklu polietilen(HDPE)	32	1,25	150	0,15	SD68
Çapraz Polietilen (PE)	18	0,5	350	1,064	SD58
Polipropilen (PP)	26	2	80	0.05	RR85
Asetal	50	27	20	0.10	RM109
Nylon(PA) 6	40	1	60	0.25	SD75
PA12	50	1,4	200	0,06	RR105
Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS)	34	2,1	6	0,18	RR96
Poliüretan (PU)	24	0,003	700	1,064	SA70
Polikarbonat (PC)	50	2,1	200	0,05	RM70

RM: Rockwell M123 hardness (sert)

RR: Rockwell R112 hardness

SA 65: Shore A65 hardness(yumuşak)

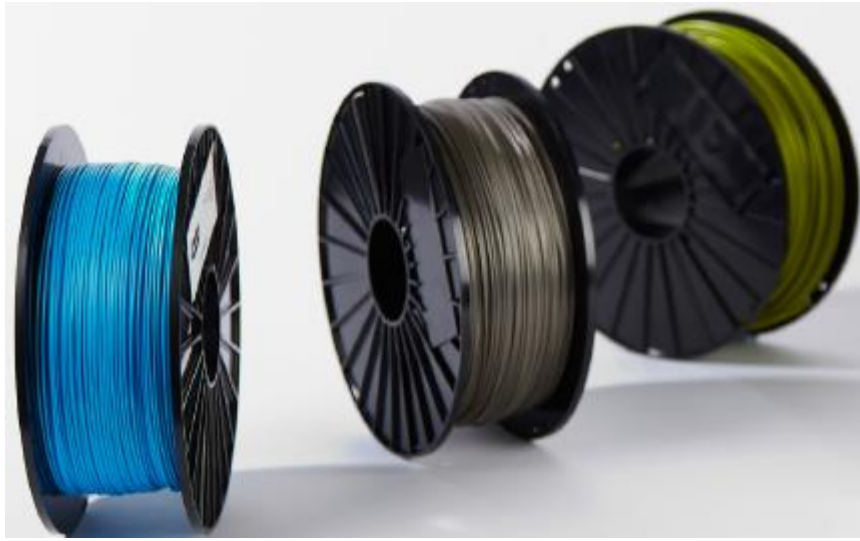
SD75: Shore D75 hardness

Not: İzod darbe testleri oda sıcaklığında yapılmış olup, + işareti [+1,06 gibi] kırılma olmadan numunenin daha çok darbe enerjisi olduğunu ifade etmektedir.

3.1.9. PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified)

PETG çok sert bir termoplastik olmasının yanında iyi de bir termal dirence sahip bir malzemedir. Üretim esnasında çarpılma olayının yaşanmamasının yanında; PLA malzemesinin kullanışlılık özelliğini ve ABS malzemesinin dayanıklılık özelliklerini birlikte barındıran bir plastik sınıfıdır.

ABS malzemesi üretim esnasında pis koku ve duman yayarken, PETG’de bu olay görülmez. PETG; PLA gibi biyopolimer değildir ancak tamamen geri dönüştürülebilir. (Anonim,2022)



Resim 3.2. Rigid.ink firmasına ait farklı renkteki PETG filament ruloları

Ayrıca ABD ‘de FDA (Food and Drug Administration) tarafından sağlık açısından uygun bir malzeme olarak onaylandığından ilaç kutusu, sporcu ürünleri, içecek şişeleri, bazı medikal ekipmanlarda kullanılmaktadır. PETG malzemesi ile üretilen ürünlerde 80C° ye kadar mukavemetinde herhangi bir azalma görülmez.

Tablo 3.3. Rigid.ink firmasına ait 1.75mm PETG malzeme özellikleri

Özgöl ağırlığı	1,27 gr/cm ³	Camsı geçiş sıc	80C°
Yazma sıcaklığı	220-240 C°	Rockwell sertlik	109
Yazıcı platform sıc	70-80 C°	Akma Noktasında Çekme Gerilimi	50 MPa
Gerilim Modülü	2,1 GPa	Kopma Noktasında Çekme Gerilimi	28 Mpa

Tablo 3.4. Deneyde kullanılan polimer malzemelerin mekanik özellikleri

	PLA	ABS	PETG
Yoğunluk (g/cm ³)	1.2	1.06	1.27
Çekme Mukavemeti (Mpa)	62	40	50
Sertlik (Shore D)	71	82	79.2
Posion Oranı	0.35	0.35	0.43
Kırılmada Uzama (%)	21.8	30	110
Kayma Modülü (Gpa)	2.4	0.88	4.6
Isıl Çarpılma Sıcaklığı(C°)	53	73	70
Isıl Geçirgenlik(W/m-K)	0.13	0.17	0.21
Camsı Geçiş Sıcaklığı(C°)	60	105	80

3.2. Plastik Dişli Çarkların Üretim Yöntemleri

Plastik dişliler klasik üretim yöntemleri olan azdırma ve frezeleme gibi metotların yanında enjeksiyon yöntemi ile bir kalıp aracılığıyla da üretilmektedir. Kalıp ile üretim, çok adetli üretim için uygun maliyetli olurken protip üretiminde ve az adetli üretimlerde 3 boyutlu yazıcı ile imalat günümüzde yaygınlaşmaktadır.

Metal dişli kullanımı dişli kutusunda olduğu gibi hızın, yükün yüksek olduğu yerlerde kullanılırken aşınmanın azaltılması için yağlama ya da kaplama gibi yöntemlere başvurulmaktadır. Yüksek darbe yükü ve yükün hızın olmadığı durumlarda endüstri de metalin yerini plastik dişlilere bırakmaktadır.

Plastik dişlilerin ucuz, kimyasal reaksiyona dirençli olması, sessiz çalışması, yağlamaya gerek kalmadan kullanılabilmesi ve hafif olması kullanımını yaygınlaştıran özellikleri olarak sayılabilir. Plastik dişlilerin günümüzdeki başlıca kullanım alanlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir.

-Oyuncak Sanayi

-Küçük ev aletleri

-Saatler

-Medikal Sanayi

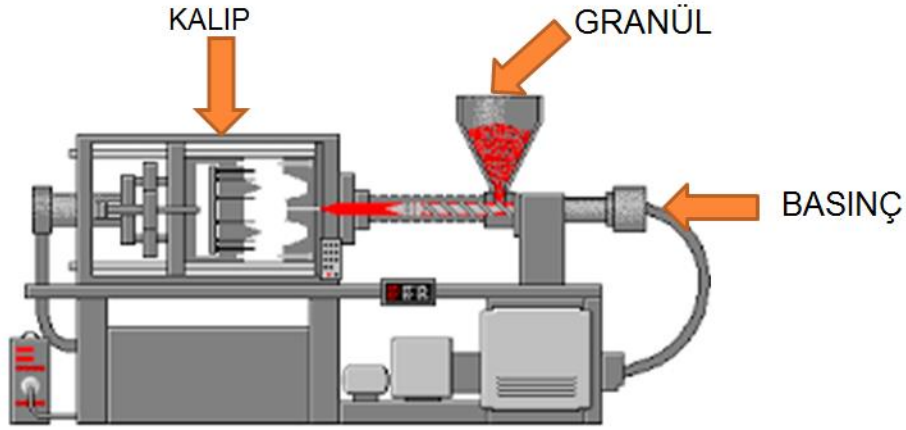
-Fotokopi makineleri

Plastik dişliler daha çok hareket iletimi için kullanılırlar ve genellikle yağlama gerektirmezler. Plastik dişlilerde öne çıkan en önemli engel sıcaklık faktörüdür. Bu nedenle plastik dişlilerde sıcaklık artışı ve sıcaklığın hangi noktalarda etkili olduğu hakkında birçok araştırma yapılmıştır.

Üç boyutlu yazıcı ile üretimde filament kullanımı ile birden fazla plastik çeşidinin karışımı kullanılabilmekte böylece kullanım talebine göre ergime sıcaklığı, dayanıklılık gibi faktörlere müdahale edilebilmektedir.

3.2.1. Kalıpla enjeksiyon yöntemi

Yazıcı teknolojisinden önce sıklıkla kullanılan enjeksiyon yönteminde granül formundaki plastik ergitilerek bir kalıp içerisine itilmektedir. Plastik malzemelerde önemli bir parametre olan sıcaklığın bu noktada iyi bir kontrolü gerekmektedir. Şöyle ki her bir plastik sınıfı farklı bir ergime noktası sahiptir ve en makul akışkanlığın sağlanarak sıvı plastiğin kalıba boşluk kalmayacak şekilde nüfus etmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1. Enjeksiyon kalıpla plastik şekillendirme (Anonim,2022)

Kalıpla Enjeksiyon Yönteminde ürünün yüzey kalitesinin yazıcı ile üretilenlere göre daha iyi olması ve üretimin daha kısa sürede tamamlanmasına rağmen kalıplama yönteminde kalıpta hapsolan hava kabarcıkların oluşturduğu boşluk hataları ve kalıp maliyeti az sayıda mamul için 3 boyutlu yazıcı ile üretimi cazip kılmaktadır.

3.2.2. Eriyik yığma modelleme (Fused Deposition Modelling)

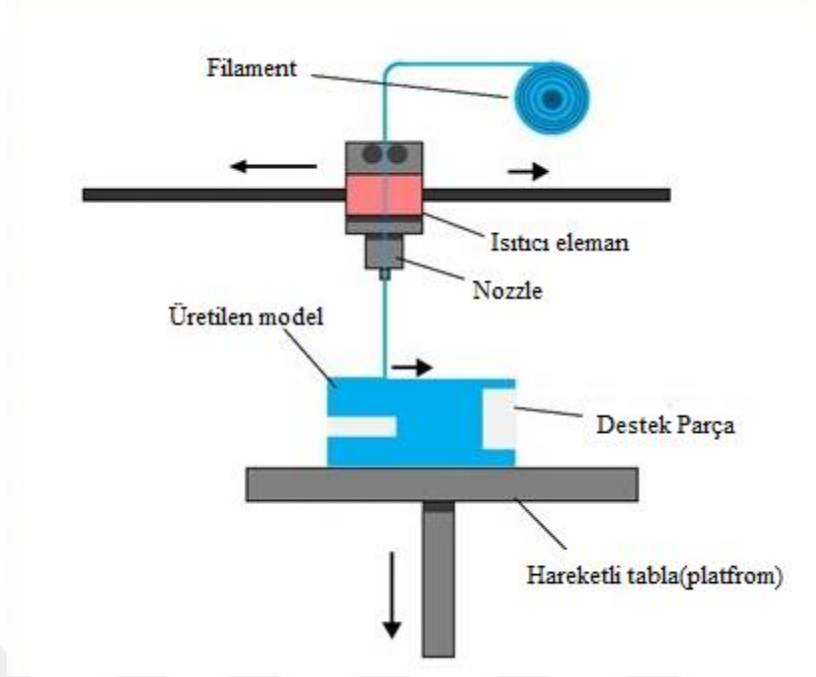
Dünyada en yaygın olarak kullanılan üç boyutlu yazıcı ile üretim tekniği olan Eriyik Yığma Modelleme Tekniği ilk defa 1989 yılında Scott Crump tarafından patenti alınmış daha sonra Stratasys şirketi tarafından ilk üretim çalışmaları yapılmıştır. Bu tip üretim yapan üç boyutlu yazıcılarda birçok renk seçeneği ile birlikte 1,75 ve 2,85 mm çaplarında PLA, PETG, Polyester, Nylon, ABS gibi termoplastik filamentleri kullanılmaktadır.

Temel olarak FDM yöntemi erimiş filament plastik malzemeyi önceden belirlenmiş ürün profili yolunda kontrollü olarak biriktirme metodudur. Bu yöntemde bir makaraya ipliğe benzer filament termoplastik malzeme sarılır. Nozul termoplastik malzemenin ergime sıcaklığına ulaşıldığında, malzeme ekstrüzyon kafasına itilir, Üç yönde hareket kabiliyetine sahip ekstrüzyon kafası önceden bilgisayar tarafından belirlenmiş profil yolunda ekstrüzyon yöntemi ile malzemeyi bırakır ve malzeme burada katılır ve soğumaya bırakılır. Bu katılma sırasında eriyik malzemenin mukavemetini kazanması için destek malzemesi de kullanılabilir.

Kimi farklı model makinelerde ekstrüzyon kafasının üzerindeki bir fan yardımıyla soğuma hızlandırılır. Bir katmanın tamamlanması sonrası, yapım platformu aşağı iner ve bu işlem ürün sonlanıncaya kadar devam eder.

Eriyik Yığma Modelleme yönteminde üretimde nozul sıcaklığı, hareketli platformun hızı, yüksekliği, hassasiyeti, tabaka kalınlığı, soğuma hızı gibi parametreler ürünün mekanik özelliklerini etkilemektedir.

FDM yönteminde katman kalınlığı ise 50-400 mikron arasında olmakla birlikte küçük katman ölçüsü keskin köşeleri ve kıvrımları yapmaya daha elverişli bir üretim imkânı sağlar.



Şekil 3.2. FDM yönteminin çalışma prensibi (Anonim,2022)

Filamentlerin farklı renklerde piyasada bulunabilmesi nihai ürünün daha sonra boyamaya gerek kalmadan üretilmesine imkân vermektedir. Öte yandan son zamanlarda bronz, gümüş özellikli filamentlerin plastik ile karıştırılarak piyasaya sürülmesiyle ürün görüntüsü ve fiziksel özellikleri değiştirilebilmektedir.

Örneğin oyuncak sanayinde, bir büst yapımında malzemeye bronz filament seçilerek bronz renkteki ürün elde edilebilir ve üç boyutlu yazıcı marifetiyle içi boşluklu bir yapı düşünülerek %80 lere varan malzeme tasarrufu elde edilebilmektedir. Günümüzde hava sanayi ve savunma sanayide de bu yöntemle drone parçaları, simülatörler, elektronik kutularının üretildiği görülmektedir.

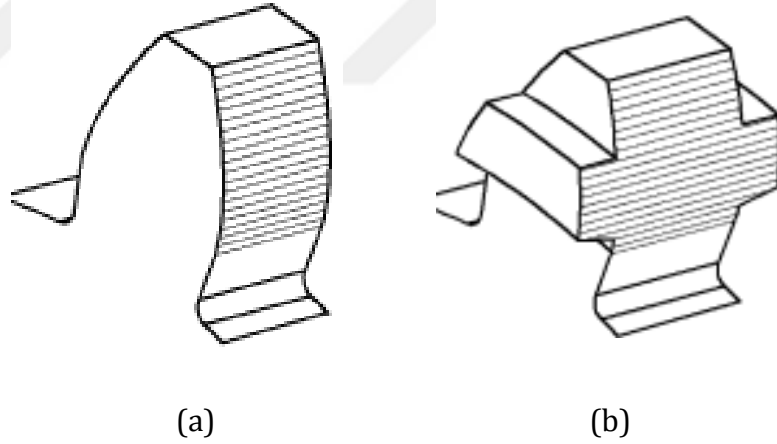
3.3 Plastik Dişlilerde Yorulma

Plastik dişliler metallere göre hafif ve korozyon dirençlerinin iyi olması gibi avantajlarının yanında, ısı iletkenliklerinin kötü olması servis ömürlerinin kısılmasında büyük rol oynamaktadır.

Plastik dişliler hareketi iletirlerken maruz kaldıkları kuvvetin tamamını iletemeden açığa çıkan ısı enerjisini bünyelerinde tutmaktadırlar. Isı iletkenliklerinin kötü olmasından dolayı bünyelerinde tuttıkları ısı, termal yumuşamalara neden olmaktadır. Bu durum plastiklerin hysteresis özelliğinden kaynaklanmaktadır.

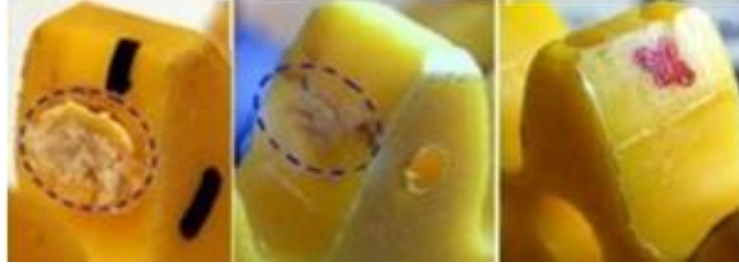
Plastik dişlilerde maruz kalınan kuvvet en çok; kuvvete en uzak nokta olan diş dibini etkidiğinden yorulma diş dibi çatlağı olarak karşımıza çıkabilmektedir. Yorulma; diş dibi çatlağının çalışma süresi arttıkça büyümesi ve sonrasında kırılma ile sonuçlanmasıdır.

Bu nedenle diş dibi mukavemetini artırmak için çeşitli diş geometrisi modifikasyonları ile birlikte gerilme yığılmalarını azaltmak maksadıyla diş diplerine radyus formu kazandırılmıştır. (Şekil 3.3.)



Şekil 3.3. a) değiştirilmemiş diş b) modifiye edilmiş diş örneği (İmrek, 2009)

Resim 3.3 deki çalışmada ısı birikimini engellemek, ısı dağıtımını sağlamak maksadıyla dış yüzeyine dik soğutma delikleri açılmıştır.

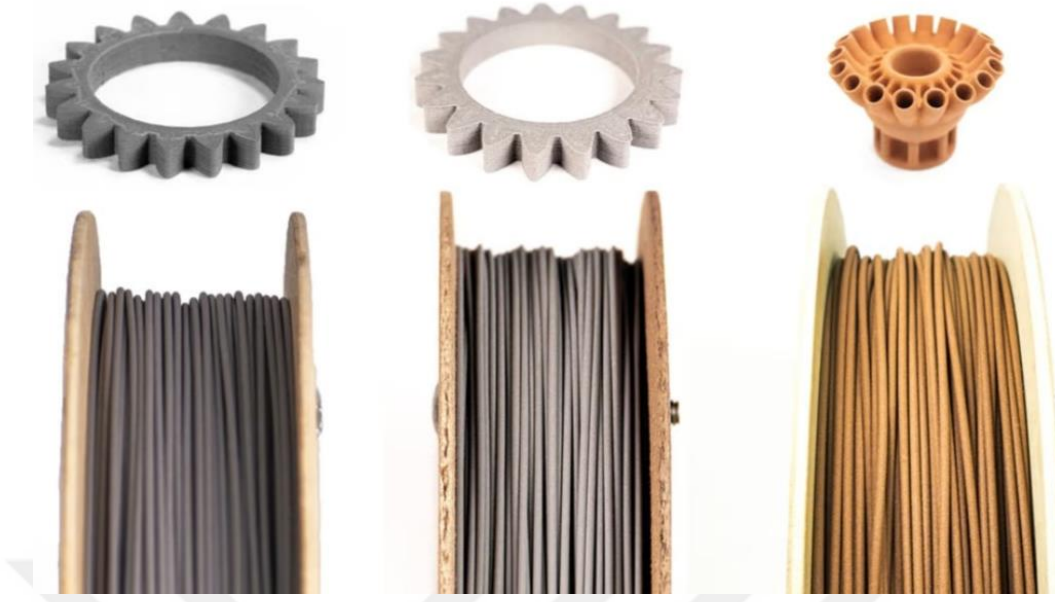


Resim 3.3. a) deliksiz b) yuvarlanma dairesi delikli c) dış dibi delikli (Düzçükoğlu, 2010)

Düzçükoğlu (2010) Resim 3.3 de görülen çalışmasında, yuvarlanma dairesi hizasında açılan deliğin soğutmada faydalı olduğunu ancak dış dibinde açılan soğutma kanalı ile 18.1 Nm gibi yüksek tork miktarlarında termal hasarın yeni başladığını ifade etmiştir. Bu çalışmadan da anlaşıldığı üzere sıcaklık dışın kök bölgesinde daha fazladır.

Öte yandan granül formundaki plastik hammadde kullanarak yapılan imalatlarda, meydana gelen aşınmayı azaltmak ve daha iyi bir servis ömrü elde etmek için plastik ihtiva içerisine cam, karbon, elyaf gibi çeşitli katkı malzemeleri eklenerek malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirmesi yoluna gidilmiştir.

Eriyik Yığılma Modelleme metodu ile birlikte hammadde olarak plastikler, filament formunda üretilip kullanılmaktadır. Bu nedenle filament üreticileri malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için alüminyum, titanyum, çelik, bronz gibi metal tozları ilave etmişlerdir. Böylece malzeme dayanıklılığının artırılmasının yanında nihai ürünün görünümünde de iyileşmeler elde etmişlerdir. (Resim 3.4)



Resim 3.4. Metal tozu katkılı plastik filamentler (The Virtual Foundry, 2022)

Genel olarak plastikler kendinden yağlamalı olarak tanımlanırken bazı uygulamalarda aşınma ve sürtünmenin azaltılması amacıyla grafit (PTFE) ve silikon ile bir film tabakası oluşturularak dış yüzeyinde yağlama yapılmaktadır. Oluşturulan bu film tabakası metallerdeki uygulamaya benzer şekilde kavrama esnasında oluşan sürtünmeyi azaltmaktadır. Film tabakasının oluşturduğu katmanlar sayesinde dişliler kayma hareketini daha kolay bir şekilde yapabilmektedir.

Yakut (2010) çalışmasında ısı oluşumunu ve aşınmayı azalmanın etkisini incelemek yaptığı çalışmasında borik asit katılı yağlama kullanmış, yağlamanın belirli bir yük rejimine kadar faydalı olduğunu daha yüksek tork miktarlarında katkı malzemesinin işlevini yerine getiremediğini ve numunelerin aniden kırıldığını belirtmiştir.

Plastik dişlilerde kopmalara neden olan faktörlerden; diş dibine etkiyen yük, plastiklerin dağıtamadıklarından içine hapsedtikleri ısı enerjisi, çalışma sıcaklığı, dönme hızı gibi unsurların yanında çalışma süresi de bu faktörler arasında sıralanabilmektedir. Diğer bir deyişle maruz kalınan yük şiddetinin yanında; maruz kalma süresi de önem arz etmektedir. Bu durum statik yorulma olarak tanımlanmakta ve malzemenin kopma dayanımına geldiğinde hasar gerçekleşmektedir.

Daha uzun servis ömrü elde etmek ve ısınmayı azaltmak için uygun yağlama ve soğutma teknikleri uygulanmış, gerilme yığılmalarını azaltmak için radyüs formu verme yapılmış ve malzemenin mekanik özelliklerini artırmak için katkı malzemeleri eklenmesi çalışmalarda görülmüştür.

3.4 Polimerlerin Termal Özellikleri

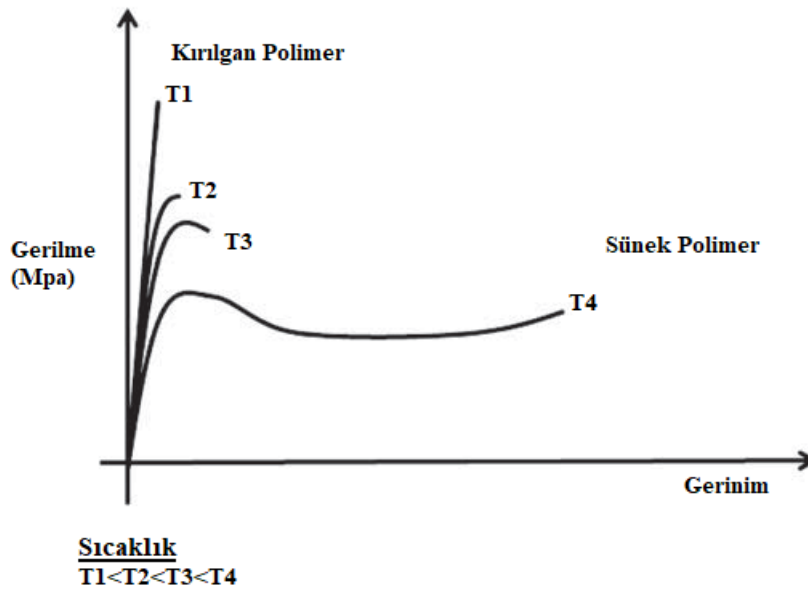
Amorf yapıdaki polimerlerin molekülleri düşük sıcaklıkta donuk bir durumda (frozen state) bulunurken, eser miktarda titreşimdedir. Bu faz durumuna camısı durum denmektedir. Bu fazda malzeme kırılğan, sert ve dayanıklı bir davranış göstermektedir. Bu nedenle camısı tanımını almıştır.

Polimer ısıtıldığında molekül zincirleri birbirleri etrafında kıpırdayarak hareketlenir ve yumuşayarak kauçumsu bir hal alır. İşte camısı geçiş sıcaklığı bu kauçumsu faza geçiş dönemi olup, T_g olarak sembolize edilmektedir. Eğer polimerik zincirlerin sıcaklık karşısındaki hareketi kolaysa, daha düşük sıcaklıklarda kauçumsu faza geçebilmektedir. Bu nedenle de camısı geçiş sıcaklığı düşük olmaktadır. Eğer zincirler arasındaki taşınma daha kısıtlıysa zincirlerin kırılıp, zincir hareketinin sağlanması için gerekli enerjinin daha çok olduğu söylenebilir. Bu nedenle de camısı geçiş sıcaklığı daha yüksektir.

Polimerlerin dayanımını etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir.

1. Moleküler Ağırlık
2. Çapraz bağlanma
3. Kristalleşme

Maksimum uzama ya da kopma uzaması malzemenin kopmadan önceki uzunluğundaki yüzde değişimi olup, sünekliğin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sıcaklığın polimerler üzerindeki etkisi Şekil 3.4 de gösterilmiştir. Grafiğin altındaki alan ise malzemenin ne kadar enerji absorbe edeceği yani tokluk değerini göstermektedir. (Balani ,2015)



Şekil 3.4 Sıcaklığın polimerler üzerindeki etkisi (Balani,2015)

4.BÖLÜM

DİŞLİ ÇARKLARDA AŞINMA

Aşınma birbiri üzerinde sürtünme halinde olan yüzeylerde elemanların mevcut geometrilerini kaybederek madde kaybına uğramasıdır. Yüzeyler madde kaybına uğrarken hacim kaybederler, yüzey alanları değişir, sürtünmeden dolayı sıcaklık artışı olur ve artan sıcaklık artışı oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonların oluşmasına imkân verir. Dolayısıyla sürtünmenin beraberinde gelen bu değişken parametreler birbiri ile çalışan eleman çiftlerinde farklı aşınma tiplerini beraberinde getirir.

4.1. Aşınma Türleri

4.1.1. Adheziv aşınma

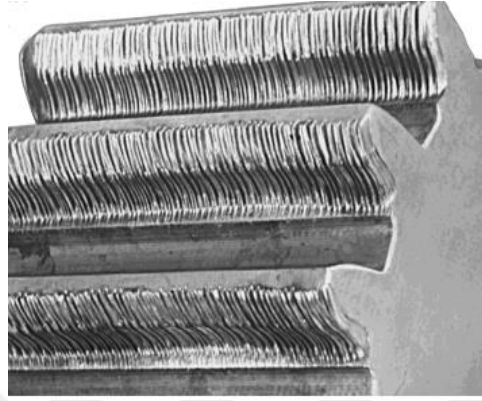
Birbiriyle kayma sürtünmesi yapan girintili çıkıntılı yüzeylerde kaynak ve yapışma sonucu oluşan malzeme transferi ve kayma hareketi ile meydana gelen malzeme kaybıdır. Pürüzlü yüzeylerde oluşan yüksek basıncın doğurduğu plastik deformasyon ve oluşan kopma olarak da tanımlanabilir.



Resim 4.1. Adhesiv aşınmanın gösterimi (Ercello,2002)

4.1.2. Abrasif aşınma

Malzemenin yüzeyinde kendisinden daha sert olan parçacıklarla etkileşmesi ve bu etkileşme sonunda sert parçacıkların yüzey üzerinden talaş kaldırılmasıdır. Bir dişli gurubunda sisteme giren talaş, çapak gibi yabancı aşındırıcı malzemelerin oluşturulduğu aşınma tipidir.



Resim4.2. Abresiv aşınmanın gösterimi (Errchello ,2002)

4.1.3. Yorulma aşınması

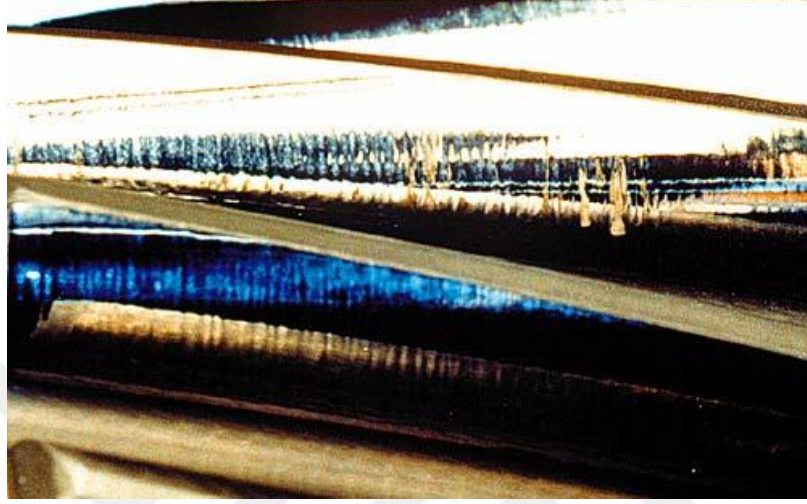
Pitting olarak da adlandırılan yorulma aşınması, dişli çarklar grubunda küçük yüzey alanına büyük yüklerin etki etmesiyle yüzeylerde zamanla meydana gelen küçük çukurlardır. Bu küçük yüzey alanlarında meydana gelen Hertz basınçları kayma gerilmeleri oluşturur. Yüzeyde meydana gelen çukurcuklar zaman geçtikçe büyür ve parçanın iç kısmına doğru ilerler.



Resim 4.3. Yorulma aşınmasını gösteren bir fotoğraf (Errchello ,2002)

4.1.4. Polisaj aşınması

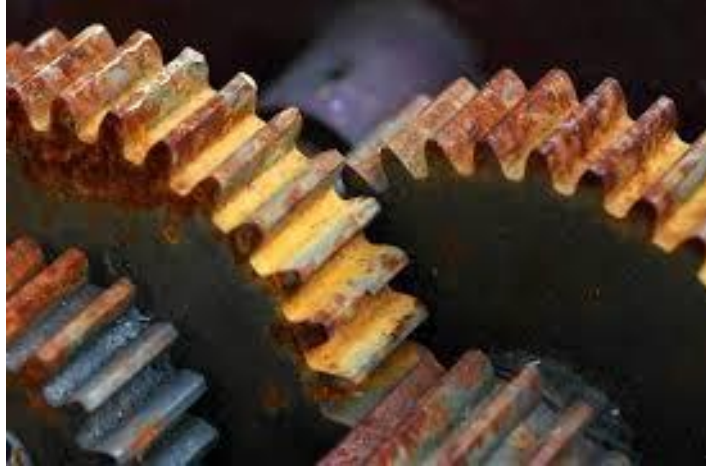
Polisaj (polish) ya da parlama aşınmasında yüzey üzerinde kayma yönünde ince sıyrılmalar oluşmaktadır. Az miktardaki bu sıyrılmalar diş üzerinde ayna görüntüsü verdiği için parlama aşınması olarak adlandırılmıştır.



Resim 4.4. Parlama aşınmasına örnek (Anonim,2022)

4.1.5. Koroziv aşınma

Dişli yüzeyinin kimyasal olarak bozunarak diğer bir ifade ile oksitlenmesiyle oluşan aşınma çeşididir. Bu tip aşınmada, oksijen ile kimyasal bir tepkime gerçekleştiği için, tepkimeye asit ve su içerisindeki atomların sebep olduğu ve yağlamanın yeterli olmadığı söylenebilir. Oksitlenmeye açık bölgenin ortamdan izolasyonu için daha iyi bir yağlama ya da kaplama tercih edilebilir.



Resim 4.5. Koroziv aşınmaya örnek (Anonim,2022)

4.1.6. Sürtünme aşınması (Scuffing)

Adhesyon aşınmasının yüksek şiddette olduğu durumlarda dişliler arasında malzeme transferi gerçekleşir. Bu tip aşınma tipinde diş başından diş tabanına doğru, kayma yönünde çizgiler gözlemlenir. Dişlilerin çalışma şartları değiştirilmediğinde aşınma artarak devam eder ve plastik deformasyon ile sonuçlanır.



Resim 4.6 Sürtünme aşınmasına örnek (Anonim,2022)

4.2. Dişli Çarklarda Aşınmanın Teorik İncelenmesi

Dişli çarkların aşınması konusunda yapılan bir çok araştırmada Archard denklemi kullanılmış olup en genel haliyle Eş 4.1 de gösterilmiştir.

$$\frac{V}{s} = K \frac{W}{H} \quad (4.1)$$

Burada V (mm^3) aşınan dişlinin hacmi, s kayma mesafesi (mm), W dişliye uygulanan yük (N), K malzemeye ait boyutsuz aşınma sabiti, H dişli yüzeyinin yüzey sertliği olmak üzere tanımlanmıştır.

Archard denkleminde aşınma derinliğini bulmak için denklemin her iki tarafı temas alanına bölünürse;

$$\frac{V/A}{s} = K \frac{W/A}{H} \quad (4.2)$$

$V/A = h$ aşınma derinliği, $W/A = p$ kısmi basınç olarak yeniden sembolize edilirse,

$$\frac{h}{s} = \frac{K}{H} \cdot p \quad \text{denklemi elde edilmektedir.} \quad (4.3)$$

K ve H sembolleri için $\frac{K}{H} = k$ boyutlu aşınma katsayısı olarak sadeleştirilirse,

$$\frac{h}{s} = k \cdot p \quad \text{olarak bulunmuştur.} \quad (4.4)$$

Anderson (1997) düz dişlilerin aşınması hakkındaki çalışmasında tek nokta gözlem yöntemi kullanarak Archard denklemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemde dişli yanağında bir nokta belirlenerek her bir çevrim sonrası, aşınan dişli üzerindeki gözlemlenen noktanın koordinatlarının değişimi hesaplanmıştır.

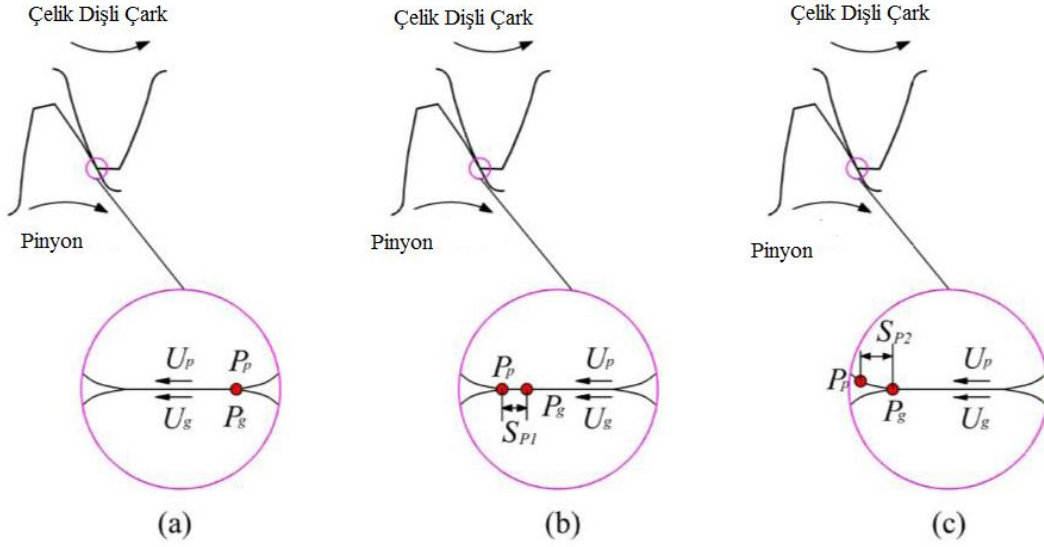
Anderson'un geliştirdiği denklemde; kavrama durumunda dişli çiftlerinin malzeme tiplerine bağlı olarak aşınma katsayıları, birbirleri üzerindeki basınç, kavrama mesafesinin uzunluğu da dikkate alınarak, h aşınma derinliği(mm), k boyutlu aşınma katsayısı(mm^2N^{-1}), p kavramanın gerçekleştiği noktadaki kısmi basınç (Nmm^{-2}) olmak üzere;

$$\frac{dh}{ds} = kp \quad (4.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Çalışmada aşınma katsayısı ve basınç sabit olarak varsayılmıştır. Aşınmanın zamanla artacağı, aşınma derinliğinde zamana bağlı olarak her bir çevrim boyunca ve kavrama esnasında değişeceği hesaba katıldığında Eş.4.4 in aşağıdaki gibi düzenlendiği görülmüştür.

$$h_{P(n)} = h_{P(n-1)} + kp_{P(n-1)} \cdot s_P \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.5 e bakıldığında aşınmanın araştırılması için gereken nihai aşınma derinliğinin; n adet tur sonunda ortaya çıkan aşınma derinliklerinin toplamı olduğu görülmektedir. Diğer bir ifade ile $h_{P(n)}$; n tur dönme tekrarından sonra p noktasındaki aşınma derinliği, $h_{P(n-1)}$ aynı noktanın bir önceki tur sonundaki aşınma derinliği, k aşınma katsayısı, $p_{P(n-1)}$ noktasındaki basınç, s_p p noktasındaki kayma mesafesi olarak sembolize edilmiştir. Aşağıdaki eşitlikler ile de kayma mesafesinin izafi kayma hızına bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Kavrama sırasındaki anlık P noktasının kayma hareketindeki gösterimi (Sun, 2019)

Kavrama esnasındaki izafi hareket gösteriminde; Şekil 4.1 (a) P noktası pinyon ve çelik dişli için aynı nokta olup, Şekil 4.1 (b) de pinyon dişli çark üzerindeki P noktası, pinyon dişlinin izafi kayma hızı daha çok olduğundan ve kavramayı daha çabuk terk edeceğinden S_{p1} lik bir yol alacaktır. Şekil 4.1 (c) de ise P_p noktası ile P_g arasındaki mesafe S_{p2} olarak adlandırılmış, kavramadan çıkış olarak gösterilmeye çalışılmıştır.

$$h_{P(n)} = h_{P(n-1)} + k p_{P(n-1)} \cdot 2a \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right) \quad (4.7)$$

$$h_{P(n)} = h_{P(n-1)} + k p_{P(n-1)} \cdot 2a \left(\frac{U_1}{U_2} - 1\right) \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.7 pinyon dişli, Eşitlik 4.8 karşılık çelik dişli çark için türetilmiş olup, çelik dişli çarkın plastik dişli çark karşısındaki aşınması çok az olacağından ihmal edilmiştir.

Öte yandan kayma hızlarının bulunabilmesi için Eşitlik 4.6 da yer alan U_1 pinyon çevresel kayma hızı, U_2 çelik dişli çark çevresel kayma hızı olmak üzere;

$$U_1 = \omega_1 \left(\frac{d_{o1}}{2} \sin \alpha_t + y \right) \quad (4.9)$$

$$U_2 = \omega_2 \left(\frac{d_{o2}}{2} \sin \alpha_t + y \right) \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.6 da yer alan d_{o1} pinyon taksimat dairesi, d_{o2} karşılık dişli çark taksimat dairesi, α_t basınç açısı ve y ise aşınmanın gerçekleştiği P noktasının taksimat dairesi üzerindeki noktaya olan uzaklığıdır. Aşınma derinliği eşitliğinde yer alan temas basıncı ise Hertz yüzey basıncı olarak kabul edilmiş, Tunalıoğlu ve Tuç (2014) çalışmasında Eşitlik 4.8 olarak kullanmışlardır.

$$P = \frac{2F_t(a^2 - y^2)}{\pi a^2} \quad (4.11)$$

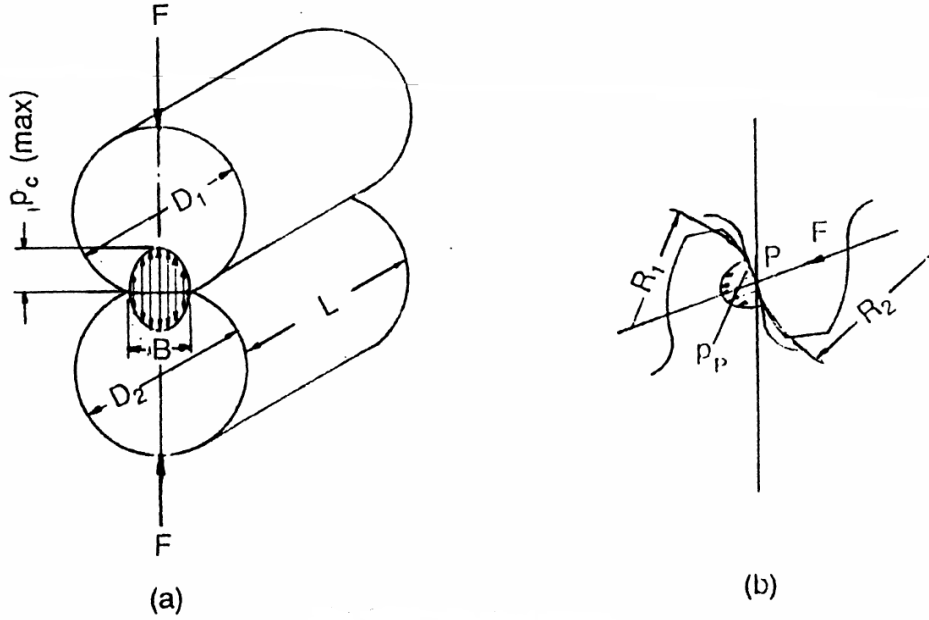
F_t kavrama esnasında pinyon dişli üzerindeki tekil kuvvet, a Hertz temas uzunluğu boyunca etki eder.

$$F_t = \frac{2T}{d_{o1} b} \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.9. de T , pinyon dişliye üzerindeki tork, b diş genişliği, a_H yarı temas uzunluğu olup Eşitlik 4. 10 da ayrıntılı olarak verilmiştir.

$$a_H = \frac{\sqrt{4F_t R}}{\pi E} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.11 de yer alan a_H Hertz temas uzunluğu olup, Şekil 4.2 de gösterilmiştir. İki dişli çarkın temas halinde iken oluşan basıncın bulunabilmesi için Hertz teorisine göre cisimler silindirik farz edilip; birbirlerine etkidiği kuvvet F , L uzunluğu boyunca uygulanmaktadır.



Şekil 4.2. a) Oluşan maksimum Hertz basıncı b) P noktasında oluşan basınç (Maitra,2001)

R temas halindeki dişlilerin eşdeğer yarıçapları, ν dişlilere ait Poisson oranları, E eşdeğer Elastik Modül olmak üzere

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4.14)$$

$$R_1 = \frac{d_{01}}{2} (\sin \alpha + y) \quad (4.15)$$

$$R_2 = \frac{d_{02}}{2} (\sin \alpha + y) \quad (4.16)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (4.17)$$

Aşınma katsayısının kütleli olarak hesaplanması için aşağıdaki denklem kullanılmıştır. (Matkovic, 2021).

$$k_W = \frac{M_w}{T_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_L \cdot \rho} \quad (4.18)$$

Burada M_w aşınan ve aşınmayan dişliler arasındaki ağırlık kaybı, T_d nominal tork, N_L toplam tur sayısı ve ρ aşınan dişlinin yoğunluğunu göstermektedir.

Çalışmada aşınmanın teorik yaklaşımının temelinde kullanılan Archard ve Flodin denklemleri Bölüm 4.2 de ayrıntılı olarak incelenirken, literatürde yer alan eklemeli imalat ile üretilen plastik dişlilerin aşınmaları hakkındaki farklı çalışmalara da aşağıda özetle yer verilmiştir.

Martin Spoerk ve ekibi (2018) çalışmasında üç boyutlu yazıcı ile üretilen numuneler üzerinde yatak sıcaklığının değişiminin adhezyona olan etkisini incelenmişlerdir. Çalışmada iki yatak yüzeyinde sürtünen numunelerin adhezyon ölçümü için house-in ölçü aleti kullanarak temas açısının değişimini de dikkate almışlardır. Camsı geçiş noktasının az üzerinde üretilen numunelerde adhezyon kuvvetinin artışının sıcaklık artışına sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Farklı eklemeli imalat yöntemleri ile aşınmanın incelenmesi hakkında Wiewen Zhanng ve ekibi (2019) Ti-6Al-4V alaşımını Selektif Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işınım Ergitme (EBM) ve geleneksel dövme yöntemleri ile üreterek sertlik ve aşınma gibi mekanik özellikleri deneysel olarak inceleyerek karşılaştırmışlardır.

Bu çalışmada sürtünme ve aşınma deneyleri MM-2000 adlı test cihazında yapılmış, deney düzeneğinde halka şeklinde GCr15 malzemesi aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Her malzeme tipi için 50 N yük altında, 25 C° de dört adet numune kullanılmıştır. Pin on disk test cihazında dönme hareketi yapan GCr15 malzemesine, farklı yöntemler ile üretilen numuneler belli bir yükte batırılarak numunelerdeki hacim kaybı ölçülmüştür.

Daha sonra mikroyapı ve aşınma izleri mikroskop altında incelenmiştir. Sertlik deneyinde 100 N luk yük ve 15s süre ile Vickers Sertlik Deneyi yapılmıştır. Bu deneyde dövme yöntemiyle üretilen numunede en derin iz gözlenirken, ölçülen en sığ aşınma derinliği ise Elektron Işınım Ergitme ile üretilen numunede gözlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada plastik deformasyon ve oksidasyon ile abrasif aşınma olduğu; SLM ve EBM yöntemi ile üretilen numunelerin dövme ile üretilenden daha sert olduğu görülmüş, EBM numunelerinin daha düşük sertlikleri olmasına rağmen daha düşük aşınma oranına sahip olduğu bilgisine varılmıştır. SEM incelemelerine dayandırılarak; bunun nedeninin, çatlak oluşumunun SLM numunesinde yatay, EBM numunesinde daha çok dikey olmasına dayandırılmıştır.

Wiewen Zhanng ve ekibi sonuç olarak SLM numunesinin martensitik faz ve ince taneli yapısından dolayı en çok sertliğe sahip olduğunu, SLM ve EBM ile üretilen numunelerin dövme yöntemi ile üretilene göre daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu ve EBM numunesinin yatay yapıdaki çatlak oluşumuna sahip olduğu için SLM numunesine göre daha düşük aşınma direncine sahip olduğu kanısına varmışlardır.

Adi Padnzic ve ekibi (2019) çalışmalarında FDM teknolojisi kullanarak ürettikleri PLA polimeri numunelerinde dolgu tipi ve dolgu yoğunluğunun çekme özelliğine olan etkisini araştırmışlardır. Yazma süresi ve dolgu yoğunluğunun araştırılması için %10-90 dolgu yoğunluklu 9 adet numune ,13 dolgu tipi ile üretilmişlerdir. Ultimaker marka yazıcı ile üretilen numuneler çekme testine tabii tutulmuşlardır.

Konsentrik dolgu tipi ile üretilmiş deney numunesinde, dolgu yoğunluğunun %100 den %90'a düşürüldüğünde, maksimum çekme mukavemetinde %15, akma mukavemetinde %20 ve yazma süresinde %30 azalma gerçekleşmiştir.

Tezel ve ekibi (2020) Metallerde eklemeli imalat yöntemlerin kullanılmasında ait bir çalışmada DMLS (Direct Metal Laser Sintering) yöntemi ile dişli üreterek geleneksel frezeleme yöntemi olan ürün arasında kıyaslama yapmışlardır.

Ayrıca DMLS yöntemi ile üretilen numunelerden bir gruba parlatarak yüzey iyileştirme uygulanmıştır. Daha sonra bu modellerin yanak bölgesi SMM yöntemi ile mikroskopik olarak gözlemlenerek aşınma ve etkinlik durumları karşılaştırılmıştır.

Aşınmanın araştırılması için bu çalışmadaki test düzeneğine benzer şekilde kapalı devre test düzeneği kullanılmış, 0, 25 ve 0, 5 Nm tork değerleri ve 250, 500, 1000 rpm dönme hızları ile dişlilerin çalışması sağlanmıştır. Yağlama işleminin uygulandığı çalışmada; geleneksel frezeleme yöntemi ile üretilen dişlide tork artışının aşınma miktarında etkili olmadığı, ancak eklemeli imalat yöntemi ile üretilen numenlerde tork artışı ile aşınmanın arttığı görülmüştür.

Diğer taraftan 0,25 tork değerinde dönme hızı 500 rpm den 1000 rpm ulaştığında aşınma miktarında tüm modeller için eser miktarda azalma saptanmıştır. Çalışmada sonuç olarak eklemeli imalat ile üretilen numunelerin yoğunluklarının düzensiz olması ile birlikte frezeleme yöntemi ile üretilen numunelere benzer sonuçlar verdiği görülmüştür

Hanon ve Marcazis (2020) çalışmasında PLA, HT-PLA ve PETG filamentlerini kullanarak Withbox marka yazıcı ile farklı oriyantasyonda silindirik numunler üretmişlerdir. Üretilen bu numuneler ile kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme kuvveti ve aşınmanın değişimini incelenmişlerdir.

Yazma oryantasyonunun malzemenin tribolojik davranışında önemli derecede etkili olduğunu belirlemişlerdir. X ve Z oryantasyonunda üretilen numunelerin dinamik sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Yüzey üzerindeki oluk gibi yüzey alanının azaldığı bölgelerde aşınma ve sürtünmenin arttığını ve Z oryantasyonu ile üretilen numunelerin test sonucundaki aşınma

değerlendirilmeleride malzeme tiplerinden PETG polimerinin en az eğilim gösterdiğini belirlemişlerdir.

Üç boyutlu yazıcı ile üretilen plastik dişlilerin aşınmasının araştırılması hakkındaki diğer bir makalede Tunalıoğlu ve Torun (2020); üç boyutlu yazıcı ile ürettikleri PLA dişlisini farklı dönme hızı ve tork değerlerinde çalıştırarak; çeşitli varyasyonlar ile aşınma sonuçlarını CMM (Koordinat Ölçüm Makinesi) yardımı ile incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda birim aşınma oranının torkun artışı ile arttığı; dönme hızı arttıkça tekil kavramanın etki ettiği şekil değiştirme oranının artışı neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Amiruddin ve ekibi (2021) üç boyutlu yazıcı ile üç farklı baskı açısı (0, 45 ve 90 derecelik açı) ve üç farklı katman kalınlığı (0,127mm; 0,254 mm ve 0,33 mm) parametrelerini kullanarak ABS ve PLA polimer pimleri üretmişlerdir. FDM metodu ile üretilen pimlerin Pin on disk test aparatı kullanılarak aşınma davranışları incelenmiştir.

10 N sabit yük ve 300 rpm sabit dönme hızında gerçekleştirilen deneyde, katman kalınlığının sürtünme kuvvetinde bir azalma sağladığı ve aşınma direnci için 45° baskı açısının en iyi değer olduğu sonucuna varılmıştır.

Xu ve ekibi (2021) çalışmasında ticari olarak kullanılan Polyoxymethylene Copolymer (POM-C) ve Homopolymer (POM-H) polimerlerinin kullanarak enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri dişlilerin aşınmasını incelemişlerdir. Mazlmenin termal ve mekanik karakteristiklerinin hasar mekanizmasında belirgin derecede etkili olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma performansı deneylerinde tüm testler 1000 d/d dönme hızı ve 9Nm tork yükü altında kırılma gerçekleşene kadar devam ettirilmiştir.

Deneyde iki aynı tip numune kullanılmış, genellikle önce pinyon dişlisinin kırıldığı gözlenmiştir. Elde edilen grfiklere dayanarak kırılmaya yaklaştıkça yani aşınmanın son evresinde, aşınmanın çok hızlı gerçekleştiği ve aşınma uygulamalarında elastic modülü yüksek olan polimer tiplerinin daha uygun olabileceği önerilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan servis ömrü deneylerinde tork miktarı 10 Nm ye artırılmış, POM-H polimerinin 2 milyon tur sonunda %35 daha uzun servis ömrü olduğu sonucuna varmışlardır

Ye Zang ve ekibi (2020) çalışmasında 3 boyutlu yazıcıda ürettikleri naylon düz dişlilerin aşınma ve termal karakterizasyonunu deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada beş tip plastik filament kullanılmış, aşınma performansları bir test düzeneği kullanılarak tecrübe edilmiş, ayrıca enjeksiyon kalıplama yöntemi ile de Naylon 66 tipi plastikte dişli üretilerek 3 boyutlu yazıcı ile üretilen Naylon 618 ile kıyaslanmıştır.

Çalışmada termal kamera kullanılarak plastik dişlilerde önemli bir yer tutan ısınma problemi gözlemlenmiş ve plastik tiplerinin termal performansları da analiz edilmiştir. Servis ömrü çalışmasında beklenenin aksine 3 boyutlu yazıcı ile üretilen numuneler 10 Nm yükün altında enjeksiyon ile üretilenden daha iyi bir performans göstererek ,500.000 fazla tur hasar görmeden çalışmıştır.

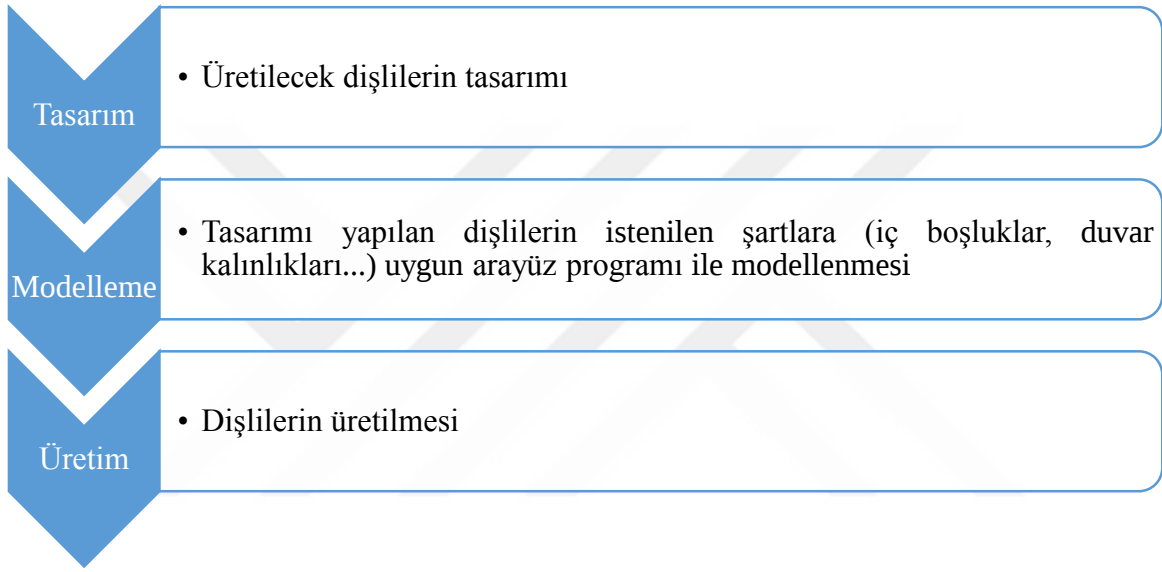
Halbuki kimi yaklaşımlar, üç boyutlu yazıcı ile üretilen ürünlerin yazma hızı yavaş olduğundan bağ kuvvetinin enjeksiyonla kalıpla olandan daha kötü olması idi. Bu sonuç düşük tork rejimlerinde bu yaklaşımın doğru olmadığını yansıtmaktadır. Çalışmanın sonunda Naylon 618 ve Naylon 66 numunelerinde aşınmanın sadece yuvarlanma çizgisi boyunca olduğu, bu iki naylon tipi için fazla aşınma olmadan malzemedede ergime olduğu, diğer dört tip plastik tipi için soyulma gerçekleştiği görülmüştür.

Hanon ve ekibi (2020) çalışmasında üç boyutlu yazıcı kullanarak ürettikleri PLA-bronze kompozit numuneleri çeşitli oryantasyonlar ile üreterek, üretimdeki bu oryantasyonun malzemenin çekme mukavemetine nasıl etkideğini incelemişlerdir. On-edge tipi üretim 28 Mpa ile diğerlerine göre yaklaşık iki kat çekme mukavemeti göstermiştir. Ayrıca yaklaşık %2 kopma uzaması ile daha plastic bir davranış göstermiştir. Kayma alanlarındaki temas alanı küçüldükçe, sürtünme katsayısı artmış ancak aşınma oranı azalmıştır.

5.BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında üç boyutlu yazıcılar ile farklı malzemeler kullanılarak üretilmiş plastik dişli çarkların aşınma davranışları incelenmiştir. Eklemeli imalat yöntemi ile malzeme üretimi, klasik üretim yöntemlerine göre farklılıklar içermektedir. Bu yöntemde malzemenin iç yapısı ve özellikleri değiştirilebildiğinden üretim öncesi tasarımın çok iyi yapılması gerekmektedir. (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Plastik dişlilerin üretim aşamaları

Üç boyutlu yazıcılar ile üretilen plastik dişli çarkların aşınma dayanımını incelemek için öncelikle deneylerde kullanılacak dişli çarkların tasarımı ve çizim işlemi yapılmıştır.

Tasarım çizimleri gerçekleştirilen dişlilerin üretim aşamasından önce modellenme işlemleri yapılmıştır. Dişli çarkların modellenmesi Simplify3D ® 4.1 ile yapılmıştır. Simplify3D dilimleme programı, katı modellenmesi yapılan iş parçasının işleme tezgahlarında kullanılan G kodlamasını otomatik yaparak nozulun gideceği yol tayinini yapar, üretimi optimum sayıda dilimlere ayırır ve geometriye bağlı olarak destek tasarımı yapar. Destek, üretilen parçanın üretim esnasında ve sonrasında çökmeye engel olmak maksadıyla oluşturulan, daha sonra kesip atılacak olan kısımdır. Dilimleme programının bir avantajı da üretim süresinin tahmini ile kontrolün sağlanması ve destek olarak harcanan atıl malzeme tasarrufudur.

Dilimleme programında üretimi yapılacak dişli çarkların katman kalınlıkları, üretim hızı, tabla ve nozul sıcaklıkları ve dış çeper kalınlıkları belirlenir. Modellemesi yapılan plastik dişlilerin G code'ları üç boyutlu yazıcıya yüklenerek üretim işlemleri gerçekleştirilmiştir.

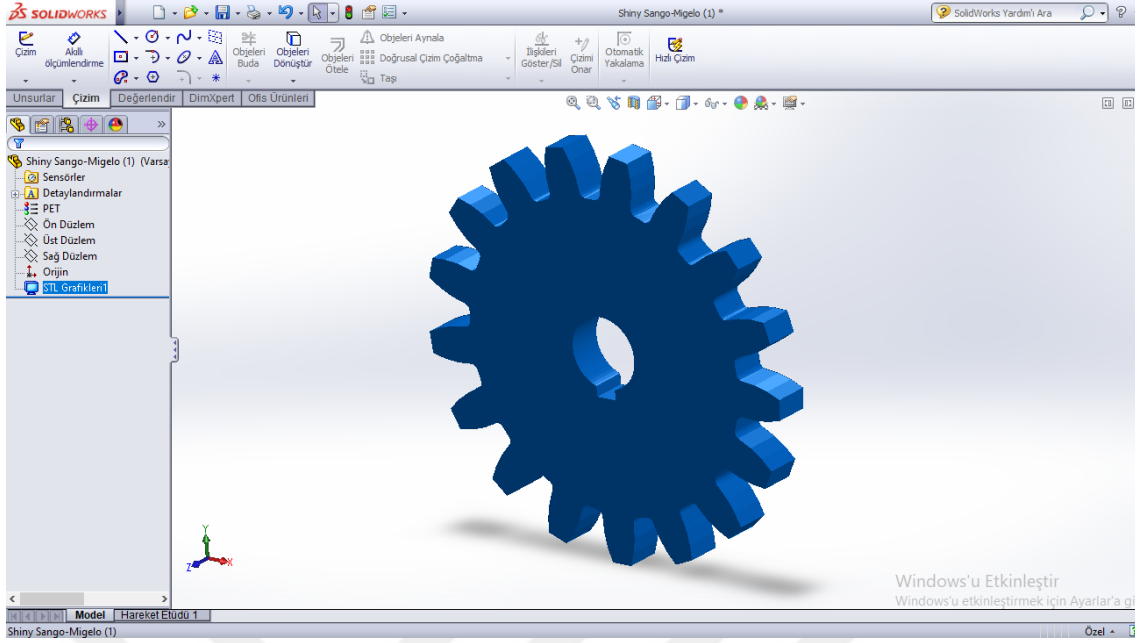
5.1. Test Malzemeleri

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcılarda sıklıkla kullanılan PLA, ABS ve PETG malzemeler kullanılarak plastik dişli çark üretimi yapılmıştır. Üretilen dişlilerin aşınma dayanımlarını incelemek için karşılık dişli olarak St 37-2 çelik dişli kullanılmıştır. Testlerde kullanılacak plastik pinyon dişli ve karşılık dişli ile ilgili boyut bilgileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

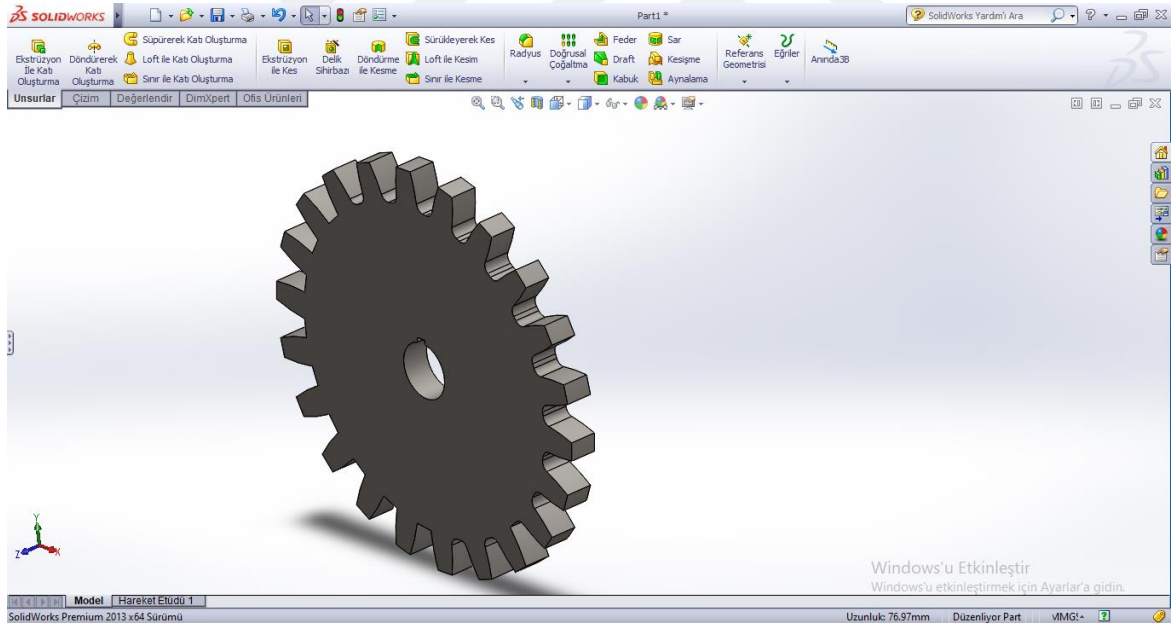
Tablo 5.1. Deneyde kullanılacak dişli numunelerin boyut değerleri

	Sembol	Birim	Pinyon dişli (plastik)	Çark dişli (çelik)
Diş Sayısı	z	-	17	22
Modül	m	(mm)	6	6
Bölüm dairesi	d_0	(mm)	102	132
Diş üstü çapı	d_b	(mm)	114	144
Diş dibi çapı	d_t	(mm)	87	117
Eksenler arası mesafe	a	(mm)	117	
Diş genişliği	b	(mm)	10	
Profil kaydırma	x	-	0	
Kavrama açısı	α	(°)	20	
Çevrim oranı	i	-	1,30	

Pinyon dişiler 17 ve çelik dişli çark ise 22 diş, diş genişlikleri 10 mm, dişli göbek çapları 20,65 mm, kama ölçüleri 6,5x6 mm ve modül-6 mm olarak seçilmiştir. Katı modelleme olarak Solidworks ® 2013 programı kullanılmıştır. Tasarımı ve çizimi yapılan dişliler Şekil 5.3 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılacak plastik dişli çarklar üç boyutlu yazıcıda, çelik dişli çarklar ise azdırma tezgahında üretilmiştir.



Şekil 5.2 Pinyon dişlinin katı model çizimi



Şekil 5.3 Çelik dişlinin katı model çizimi

Testlerde kullanılacak olan plastik dişli malzemeleri birbirlerinden farklılık göstermektedirler. PLA malzemesinin üretimi kolay fakat gevrek bir yapıya sahip olmasından dolayı kırılğan bir yapıya sahiptir. Sıcaklığa karşı fazla dayanıklı değildir.

ABS malzemesinin üretimi PLA malzemeye göre daha zordur fakat mukavemet ve sıcaklık dayanımları PLA'ya oranla daha yüksektir. PETG malzemenin üretimi kolaydır ve diğer malzemelere göre çok fazla uzama dayanımı göstermektedir. Çalışmada kullanılan malzemelerin teknik özellikleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Plastik dişli malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Birim	PLA	ABS	PETG
Yoğunluk	(g/cm ³)	1,2	1,06	1,27
Çekme gerilmesi	(MPa)	62	40	50
Sertlik	(Shore D)	71	82	79,2
Poisson oranı	-	0,35	0,35	0,43
Kopma uzaması	(%)	21,8	30	110
Yırtılma modülü	(GPa)	2,4	0,88	4,6
Isıl Çarpılma Sıcaklığı	(°C)	53	73	70
Birim Isıl Kapasitesi	(J/kg-K)	1800	2000	1500
Isıl İletkenlik	(W/m-K)	0,13	0,17	0,21
Camsı geçiş sıcaklığı	(°C)	60	105	80

5.2. Test Malzemelerinin Üretimi

Testlerde kullanılacak olan plastik dişliler FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojisi ve BCN3D Sigma R19 ® (Şekil 5.3) üç boyutlu yazıcı ile üretilmişlerdir. R17 modelinin yeni bir versiyonu olan bu yazıcının en büyük avantajı iki ekstrüzyon kafasına sahip olması ve baskı alanının paylaşılarak bu kafaların eş zamanlı çalışabilir olmasıdır.



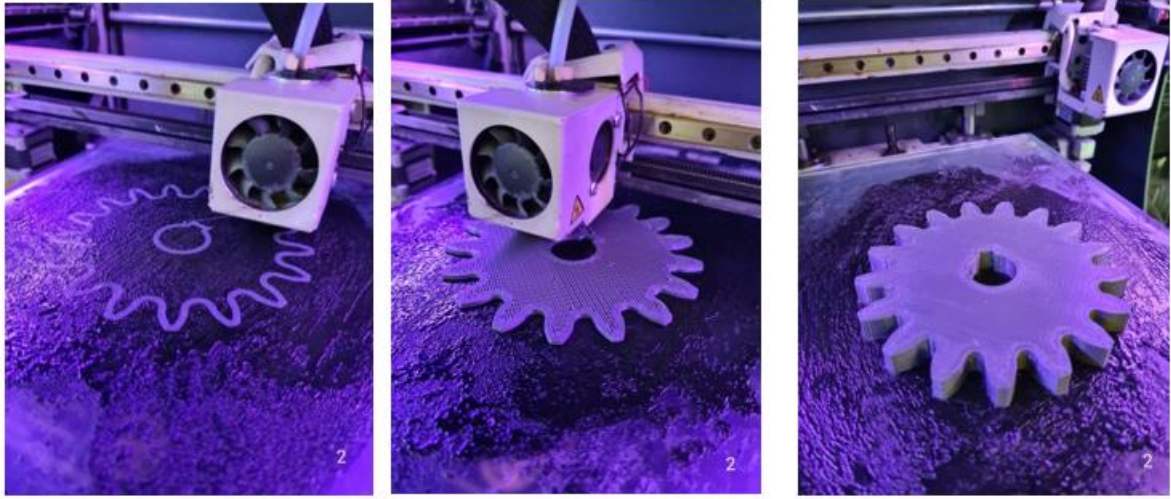
Resim 5.1. Üç boyutlu yazıcının görüntüsü

Şekil 5.3'te görüleceği üzere ergimiş plastiğin soğumasını kontrollü bir şekilde yapıp katmanlar arasındaki bağlanmanın daha iyi olabilmesi için yazıcı etrafı izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır. Bu durum daha çok kış aylarında sıcaklık farkının çok olacağı zamanda faydalı olmaktadır. Modelin diğer bir avantajı ekstruder üzerindeki sensör ve mikro switch sayesinde filament miktarı bitmeye yaklaştığında sistemi durdurarak yazıcının zarar görmesini engellemektedir. Plastik dişlilerin üretim parametreleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Plastik pinyon dişlilerin yazıcı baskı parametreleri

Malzeme	Birim	PLA	ABS	PETG
Nozul Çapı	(mm)	0,4	0,4	0,4
Filament Çapı	(mm)	2,85	2,85	2,85
Katman Yüksekliği	(mm)	0,2	0,2	0,2
Kabuk kalınlığı	(mm)	0.4,0.8	0.4,0.8	0.4,0.8
Doluluk oranı	(%)	100, 50, 100	100, 50, 100	100, 50, 100
Dolgu modeli	-	Düz çizgili	Düz çizgili	Düz Çizgili
Ekstruder sıcaklığı	(C°)	210	245	246
Yatak sıcaklığı	(C°)	60	85	70
Yazma hızı	(mm/s)	60	60,1	60,1

Tablo 5.3'te dikkat edilirse polimer dişlilerin yazma hızları benzerlik gösterirken Ekstruder ve yatak sıcaklıklarının farklı olması plastik sınıflarının farklı ısı davranışlar gösterdiğinin ve yazma sıcaklıklarının farklı olmasının bir sonucudur. Şöyle ki camsı geçiş sıcaklıkları karşılaştırıldığında PLA plastiği 60 C° altında kırılğan bir yapıya sahipken ABS için bu sıcaklık 105 C°'ye kadar ulaşmaktadır.



Resim 5.2. PETG pinyon dişlisinin üretim aşamaları a)7 dak b)1sa 36 dak c)3 sa 23 dak

Resim 5.2'te %100 iç doluluğa sahip PETG pinyon dişlisinin üretim anından kesitler gösterilmektedir. Şekil 5.4 (a)'da imalatın henüz başlangıç aşamasındaki ergiyen polimerin şerit halinde tablaya yapışması görülmektedir. Ayrıca ekstrüder kafasındaki soğutucu fan da göze çarpmaktadır. Şekil 5.4 (b) ve (c)'de dikkat çeken bir diğer husus tabla üzerindeki yapışkan malzemedir.

Soğuma ile düzensiz büzülmenin ve çarpılmanın önüne geçilebilmesi için tabla özel bir solüsyon ile kaplanmaktadır. Aksi takdirde soğuma ile diş profilinde dikey doğrultuda kalkma ve çarpılma yaşanabilmektedir. Üretim sonrası plastik dişliler Resim 5.3'de gösterilmiştir.



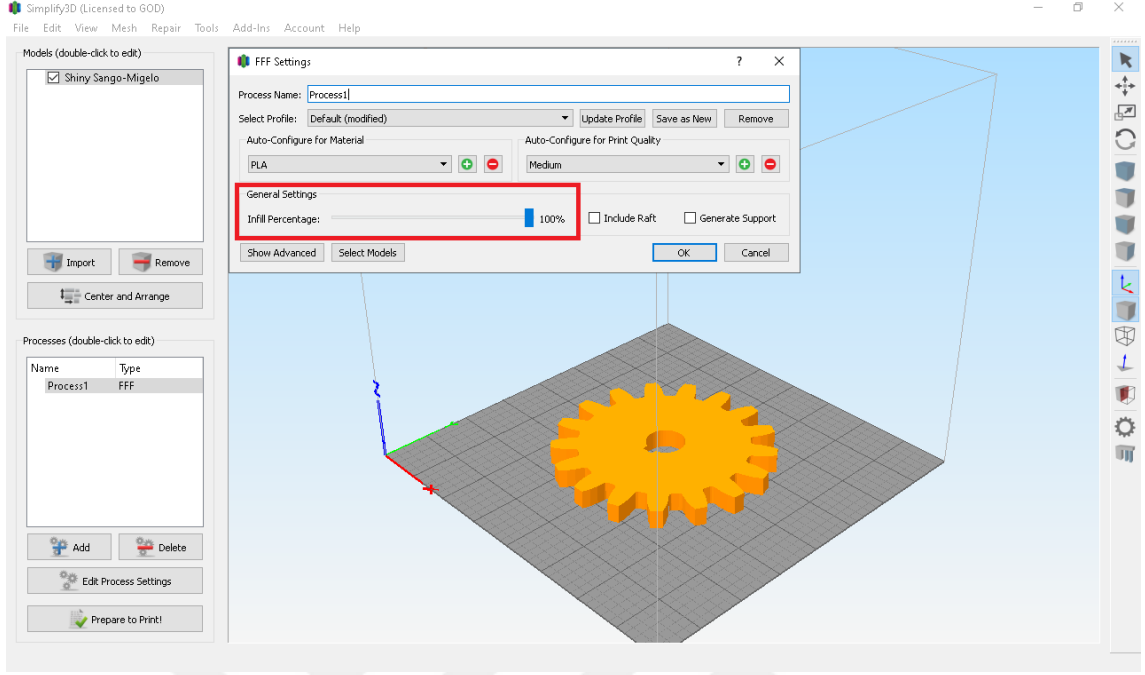
Resim 5.3. Test dişlileri a) PLA b) ABS c) PETG

5.3. Test Yöntemi

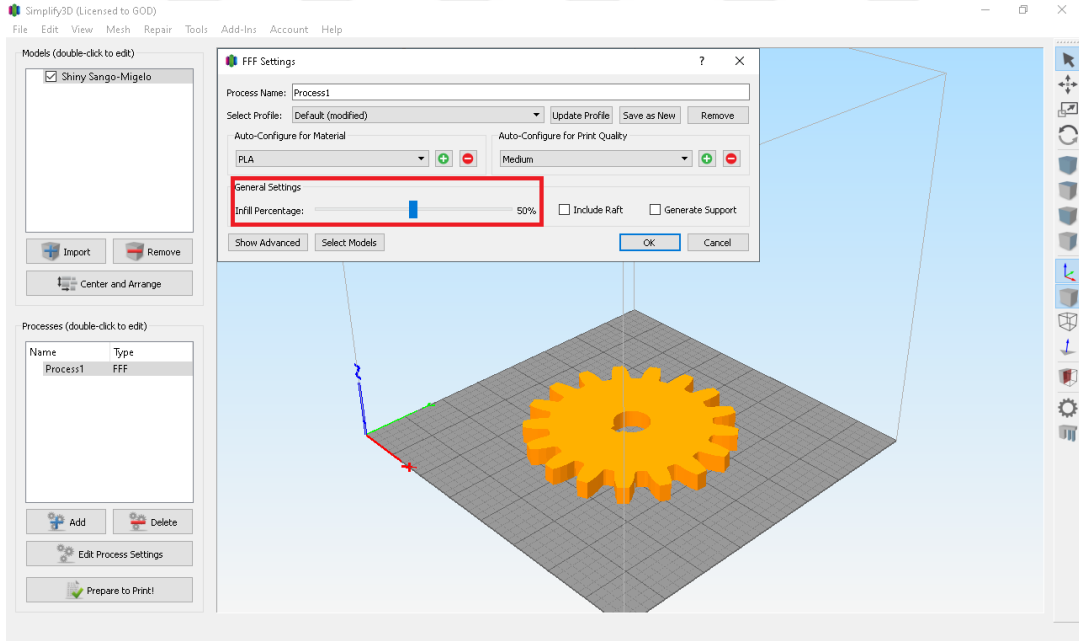
Plastik dişli çarklarda oluşan aşınmanın gözlenmesi için test yöntemi 2 ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada üç farklı plastik dişlilerin (PLA, ABS ve PETG), Bölüm 4'te verilmiş aşınma denklemine uygun olarak teorik aşınma derinlikleri belirlenmiştir. Denklemin çözümü için test dişlileri 900 d/d hız ve 1,5 Nm sabit yüküyle yüklenmiştir. Plastik dişlinin her 10.000 dönme tekrarında testler durdurulmuş ve plastik dişlilerin tartımı yapılarak teorik denklemde kullanılacak aşınma katsayıları hesaplanmıştır.

Testler toplam 100.000 dönme tekrarına kadar devam edilmiştir. Aşınma katsayısı hesaplandıktan sonra dişliler hasara uğrayana kadar çalıştırılmıştır. Hasar oluşumu için belli periyotlarda sistem durdurularak kontrol edilmiştir. Daha sonra plastik dişlilerin farklı yük tekrarlarında aşınma dayanımlarını incelemek için dişliler farklı yüklerle (1,5; 3 ve 5 Nm) yüklenerek aşınma davranışları incelenmiştir.

İkinci aşamada ise üç boyutlu yazıcıların klasik üretim yöntemlerinden avantajlı olduğu üretim yönleri incelenmiştir. İlk olarak modelleme aşamasında %100 dolu dişliler ile %50 iç boşluk verilmiş dişlilerin aşınma dayanımları kıyaslanmıştır. (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5)

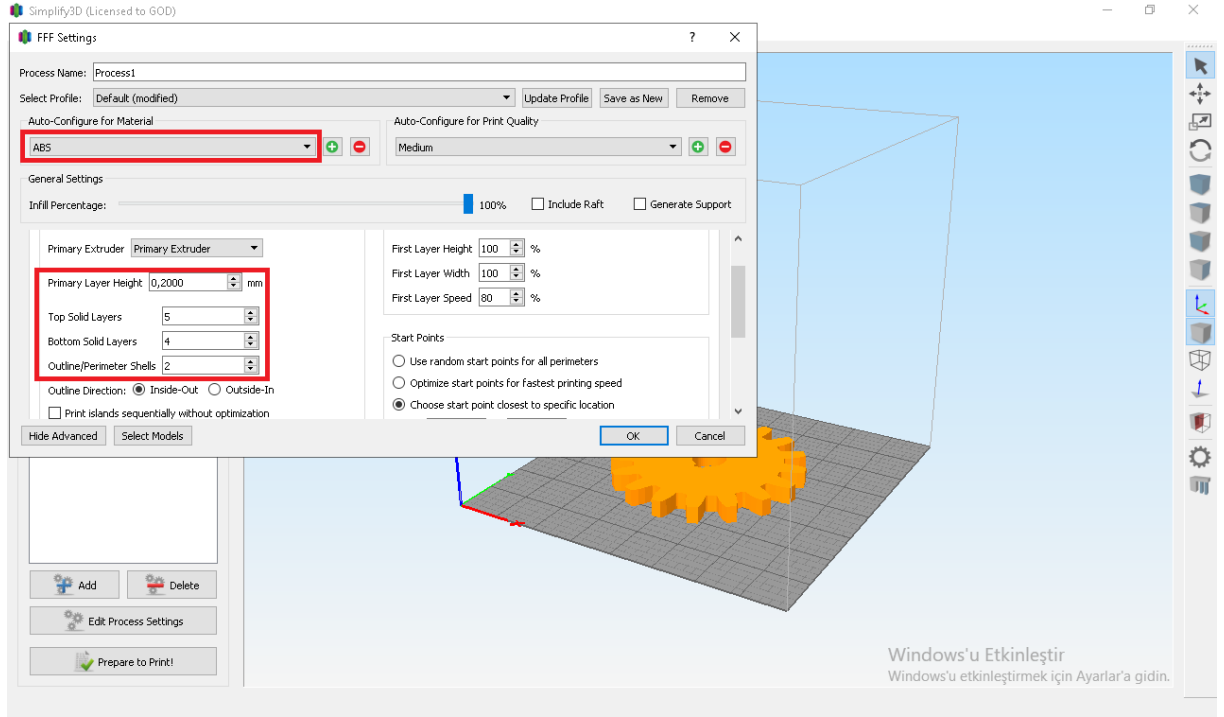


Şekil 5.4. Dolgu miktarının ara yüz programında %100 olarak ayarlanması

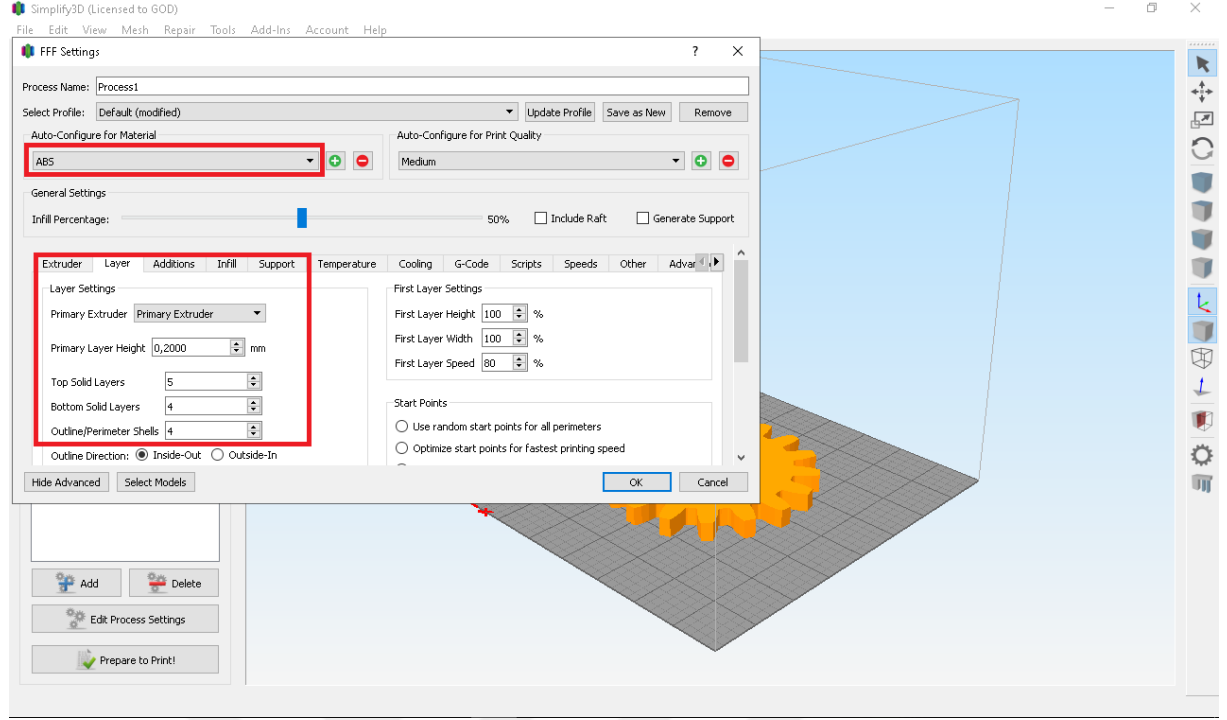


Şekil 5.5. Dolgu miktarının ara yüz programında %50 olarak ayarlanması

Testlerde yük 1.5 Nm ve dönme hızı 900 d/d olarak alınmıştır. Dış çeper kalınlığı değışimleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Dış çeper kalınlığının ara yüz programında 0,4mm olarak ayarlanması



Şekil 5.7 Dış çeper kalınlığının ara yüz programında 0,8mm olarak ayarlanması

5.4. Deney Cihazı

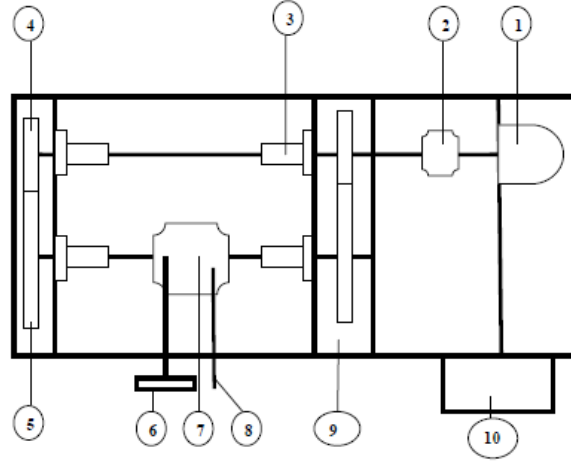
Bu çalışmada aşınma ve ömür testleri için Literatüre uygun olarak FZG (Forschungsstelle für Zahnrad und Getriebbau) kapalı devre test düzeneği kullanılmıştır. Bu düzenekler ile birçok çalışmada aşınma ve yorulma gibi çalışmaların yanında sıcaklık kontrolü yapılarak dişli aşınması, korozyon, yağlama etkinliği, yağ sınıflarının kıyaslanması gibi araştırmalar için de sıklıkla kullanılmışlardır (Lacey, 1997).

Test düzeneğinde 0,75 kW güce sahip elektrik motoru kaplin bağlantısı ile pinyon dişlisine ilk hareketi vermektedir. Elektrik motoru 300, 600 ve 900 d/d hızlarını sağlayabilmektedir. Test düzeneğinde kapalı devre güç aktarımı olduğundan miller vasıtasıyla dişli kutusundaki çelik dişlilerin hareketi test dişlilerine aktarılmaktadır. Dişli kutusundaki çelik dişliler test öncesi yağlanmışlardır (Resim 5.4).

Elektrik motoru kontrol panosundan dönme hızını kontrol edebilirken, ağırlık asma kolunun altındaki hazneye çeşitli ağırlıklar koyularak burulma momentin değişimi sağlanabilmektedir. Test dişlileri ile dişli kutusu içerisindeki dişliler arasında 4 adet M10 cıvatalı kaplin aldığı döne hareketi millere iletmektedir (Şekil 5.8).



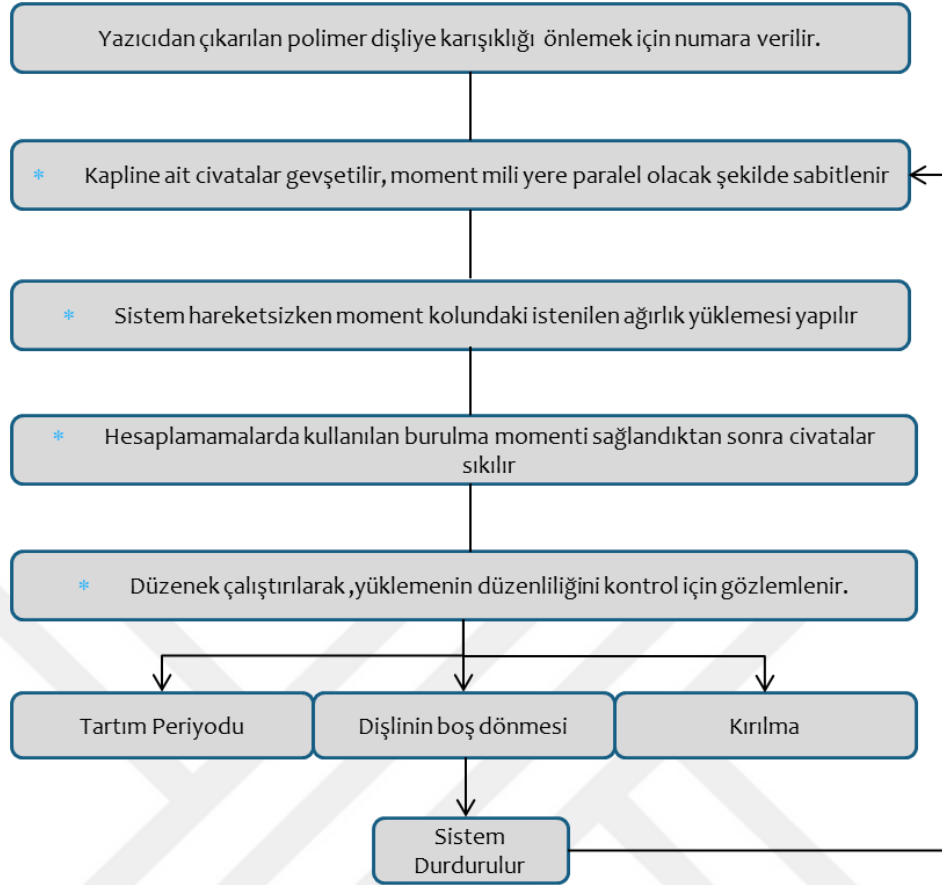
Resim 5.4. Kullanılan deney düzeneğinin görüntüsü



Şekil 5.8. Test düzeneğinin şematik gösterimi (Torun,2019)

- 1.Motor 2. Güç Aktarma Kaplini 3. Sabit Rulmanlı Yataklar 4. Test Pinyon Dişlisi 5. Test Dişli Çark 6. Ağırlık Asma Tork kolu ve aparatı 7. Tork Kaplini 8. Tork Kaplini Sabitleme Kolu 9. Dişli Kutusu 10. Kontrol Panosu

Aşınma testlerinde cihazın çalıştırılması ve her test sonrası yapılması gerekenler Şekil 5.9’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Deneyde izlenen metodun akış şeması

Şekil 5.9'daki akış şemasındaki döngü her 10^5 turda tüm polimer dişli çarklar için yapılmıştır. Sistem durdurularak elektronik tartı ile ölçümler yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Şemada yer alan işlemler üretim parametreleri farklı her bir pinyon dişli için kontrollü bir şekilde tekrarlanmıştır. Servis ömrünün araştırılması için ise 10^5 tur sonrası sistem sürekli çalıştırılarak kırılmanın gerçekleşmesi beklenmiştir.

5.5. Elektronik Tartım Cihazı

Aşınma çoğu zaman malzemelerin birbiri ile sürtünmesi sonucu, aşınan malzemenin kütle kaybı olarak tanımlanır. Çalışmada dişlilerin aşınma miktarlarının belirlenmesi için belirli tur sayıları sonrası sistem durdurulup, polimerik dişlilerin kütle ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler için Resim 5.5’de görülen RADWAG marka elektronik hassas tartım cihazı kullanılmıştır. Testlerde kullanılan analitik terazinin teknik özellikleri Tablo 5.4’te verilmiştir.



Resim 5.5. Pinyon dişlilerin tartımı için kullanılan analitik terazi

Tablo 5.4. Tartımda kullanılan analitik terazinin teknik özellikleri

Kapasite	220gr-10mg	Çalışma Sıcaklığı	10Co-40Co
Hassasiyet	0.1mg	Güç Kaynağı	12/16V DC
Dara alanı	220gr	Kalibrasyon Tipi	Otomatik
Tekrarlanabilirlik	0.1mg	Ekran Tipi	LCD Aydınlatmalı

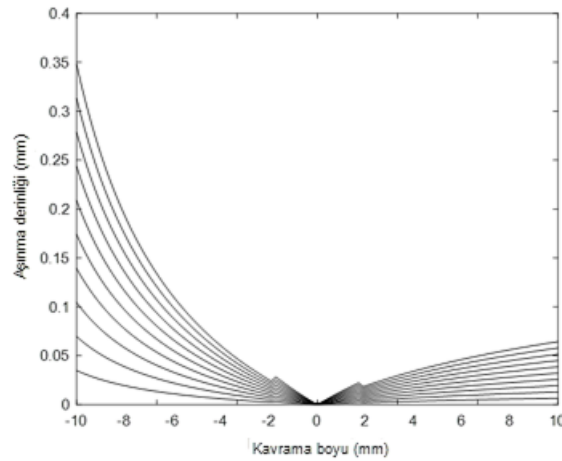
6.BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

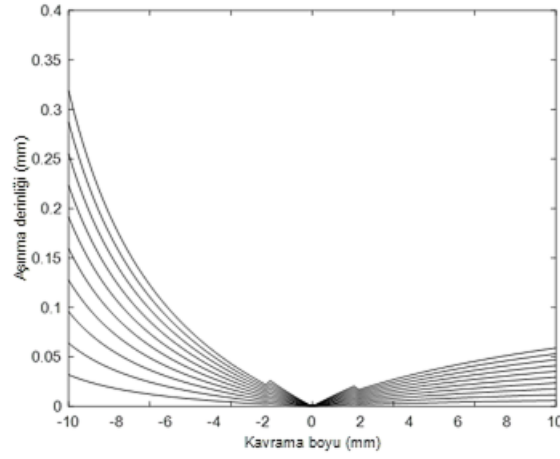
Son yıllarda kullanım özellikleri artan üç boyutlu yazıcılar sayesinde dişli çark üretimi kolaylıkla yapılmaktadır. İstenilen boyutlarda dişli çarklar ek kalıp maliyeti olmaksızın üretilebilmektedir. Plastik dişli çarklar hafiflikleri, sessiz çalışmaları ve ucuz olmaları nedeniyle dişli çarklara alternatif olarak kullanılmaktadır. Plastik dişli çarkların kullanım avantajlarının yanı sıra aşırı yüklerle dayanıksız olduklarından dolayı aşınma değerlerinin bilinmesi ve dişlilerin bu değerlerde kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında farklı koşullarda plastik dişli çarkların aşınma dayanımları incelenmiştir.

6.1. Plastik Dişli Çarkların Teorik Aşınma Derinliklerinin Belirlenmesi

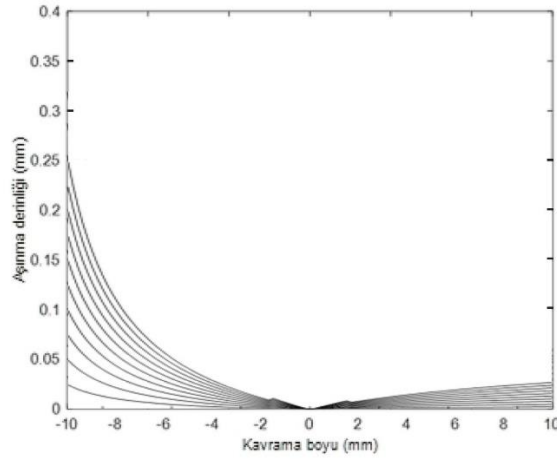
Plastik dişli çarklar aşırı yük ve ısıya karşı düşük dirence sahiptir. Plastik dişli çarkların aşınma davranışların bilinmesi ve ona göre çalıştırılması önemlidir. Bu nedenle çalışmanın bu aşamasında Bölüm 4'te belirtilen Archard aşınma denklemi plastik dişlilere uyarlanmış ve aşınmanın tüm kavrama boyunca gözlenmesi için MATLAB programına aktarılmıştır. Teorik denklem için dişliler 900 d/d dönme hızı ve 1,5 Nm tork değerlerinde 10^5 tur döndürülmüşlerdir. Pinyon dişlilerin aşınma derinliklerinin saptanması amacıyla kapalı devre (FZG) deney düzeneği kullanılmıştır. Aşınma testlerinde uygulanan metot Bölüm 5 Şekil 5.9'da verilmiştir. Plastik dişli çarklarda kavrama boyunca oluşan teorik aşınma derinlikleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.1. Plastik dişli çarkların kavrama boyu boyunca aşınma derinlikleri (a)-ABS, (b)-PLA ve (c)-PETG

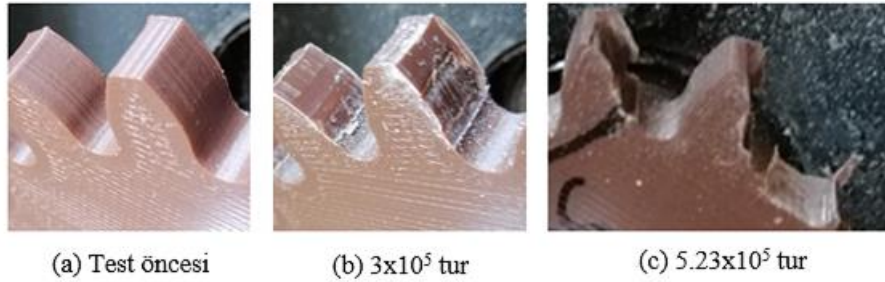
Şekil 6.1.'de MATLAB programı ile teorik olarak elde edilen grafikler gösterilmektedir. Grafik genel itibariyle incelendiğinde aşınma derinliği kavramaya girişte (plastik dişlinin diş dibinde) en yüksek değerinde, kavrama noktasında sıfır ve diş başına doğru yaklaştıkça yani kavramanın bitişine doğru artmaktadır. Kavrama noktasında aşınmanın olmamasının nedeni bu noktada kayma hareketinin olmadığı, dişlilerin izafi kayma hızlarının şiddet olarak aynı ancak yönlerinin birbirine zıt olmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Aşınmanın taban bölgesinde daha çok olmasının nedeni ise pinyon dişlinin kavramaya ilk bu bölgede başlaması ve sürtünme ile diş yüzeyinde sıcaklık artışının ortaya çıkmasıdır.

Şekil 6.1 her bir polimer sınıfı için ayrı ayrı ele alınırsa, (a)'da ABS polimeri 1×10^4 turu sonrası en fazla aşınma derinliği yaklaşık 0,03 mm'den başlayarak, 1×10^5 tur sonrası yaklaşık 0,35 mm; (b)'de PLA polimeri için en fazla aşınma derinliği 1×10^4 turu sonrası 0,03 mm'den başlayarak 1×10^5 tur sonrası yaklaşık 0,32 mm; (c) de PETG polimeri 1×10^4 turu sonrası aşınma derinliği

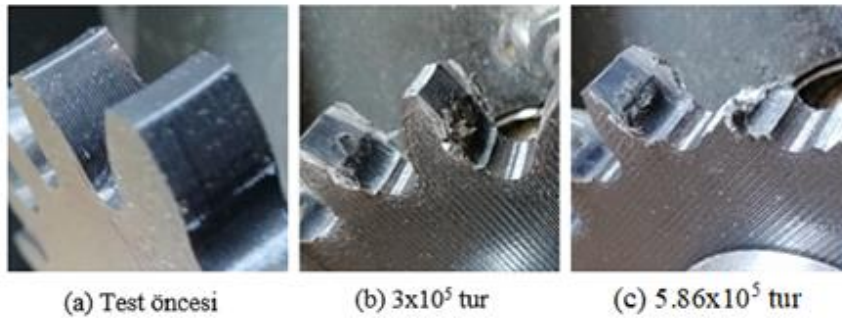
yaklaşık 0,025 mm'den başlayarak, 1×10^5 sonrası 0,25 mm hesaplanmıştır. Sonuç olarak en fazla aşınma sırasıyla ABS, PLA ve PETG plastik dişlilerde gözlemlenmiştir. ABS ve PLA plastik dişlilerinin aşınmalarının birbirine yakın, PETG malzeme dişlilerin aşınma derinlikleri ABS ve PLA malzemeye göre sırasıyla %30 ve %40 daha az olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında PETG plastik dişlisinin aşınmaya karşı en dayanıklı malzeme olduğu saptanmıştır.

Torun ve Tunalıoğlu (2021) çalışmasında 1,75mm çaplı PLA polimeri kullanarak üç boyutlu yazıcıda ürettikleri düz dişlilerde, etkiyen tork miktarının ve dönme hızının değişiminin aşınmaya etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde PLA polimerinin aşınma derinliklerini; 0,5 Nm moment ve 900 d/d dönme hızında kavramaya giriş boyunca kök bölgesinde yaklaşık 0,1 mm, yük miktarı 2 katına çıktığında yani 1Nm yük altında yaklaşık 0,2 mm; yük miktarı 3 katına çıktığında aynı koşullar altında 0,30-0,35 mm bulmuşlardır. Deneyler neticesinde aşınma derinliğinin kök bölgesinden yuvarlanma dairesine yaklaştıkça azaldığı, tork miktarındaki artışın aşınma derinliğinde artışa neden olduğunu, dönme hızı arttıkça aşınmanın azaldığını tespit etmişlerdir. Dönme hızı ile aşınmanın ters orantılı olmasının nedeninin, tekil kavrama bölgesinde temas süresi için geçen zamanın azalarak şekil değiştirme oranının artışı olarak yorumlamışlardır. Daha önce elde edilen bu sonuçlar ve tecrübeler, yapılan bu çalışmayı desteklemiştir.

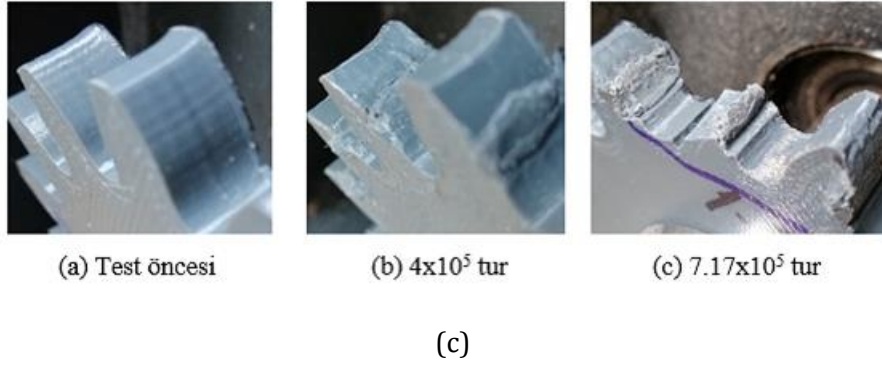
Plastik dişli çarkların servis ömürlerini belirlemek için aşınma testleri devam ettirilmiş ve sonuçları Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

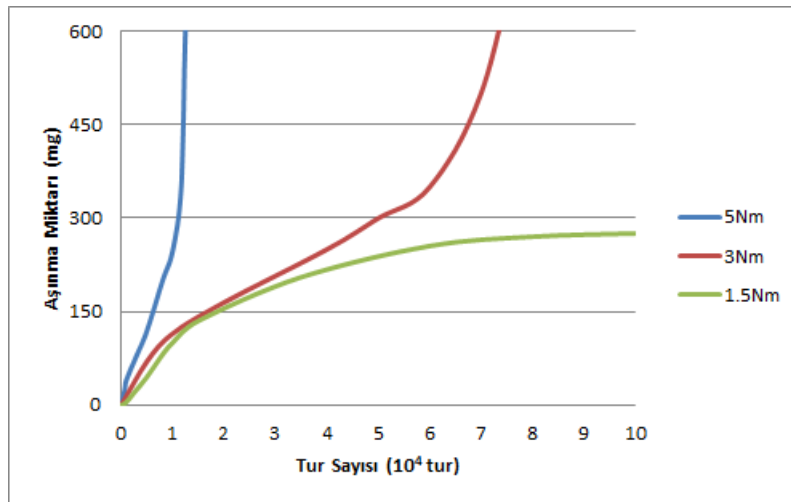


Şekil 6.2. Plastik dişli çarkların servis ömürleri (a)-ABS, (b)-PLA ve (c)-PETG

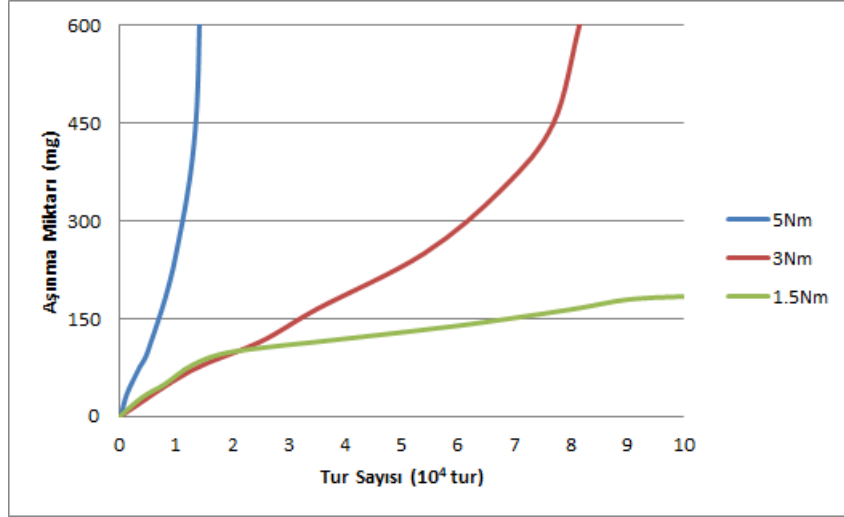
Şekil 6.2’de plastik dişlilerin servis ömürleri kıyaslandığında PETG’nin ABS’ye göre çelik dişli karşısında %37 oranında daha uzun süre dayandığı, PLA dişlisine göre ise %22,3 oranında daha dayanıklı olduğu saptanmıştır. PLA dişlisi ise ABS dişlisine göre %12 daha uzun süre tur yaparak daha uzun süre servis ömrü olduğunu kanıtlamıştır. ABS dişlisinin aşınmadan en çok etkilenmesinin sebebinin camsı geçiş sıcaklığının en yüksek olması ve malzemenin bu sıcaklıktan önce sert ve gevrek bir davranış gösterdiği düşünülmektedir.

6.2. Farklı Yüklemelerde Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri

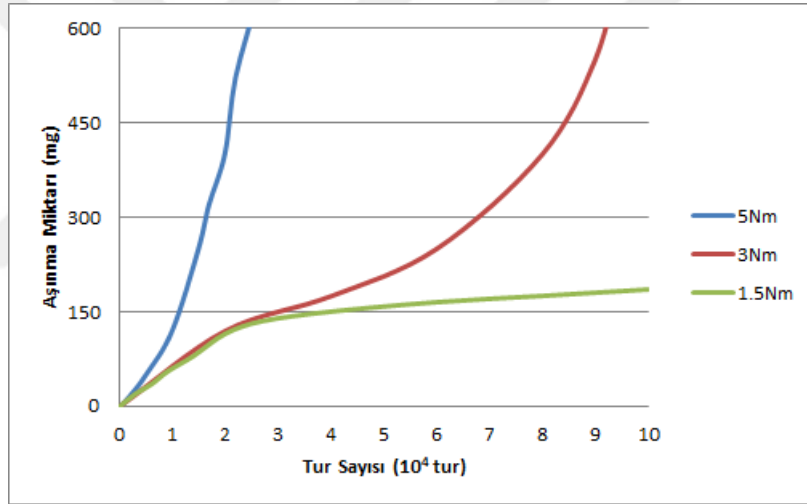
Plastik dişli çarklar büyük yük ve ani sıcaklık artışlarında düşük aşınma davranışları göstermektedir. Yük miktarı belli değerlerin üzerine çıktığı zaman aşınma aniden gerçekleşmekte ve dişlinin servis ömrü kısalmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde üç farklı (ABS, PLA ve PETG) polimerik dişlinin farklı yüklerdeki (1,5; 3 ve 5 Nm) aşınma dayanımları incelenmiştir. Test aşamasında dönme devri 900 d/d sabit alınmıştır. Plastik dişli çarkların aşınma miktarları belli tur sayılarından sonra hassas terazide tartılarak tur sayısına göre aşınma miktarları belirlenmiştir (Şekil 6.3-5).



Şekil 6.3. Farklı yükler altında ABS plastik dişlisinin aşınma dayanımı



Şekil 6.4. Farklı yükler altında PLA plastik dişlisinin aşınma dayanımı



Şekil 6.5. Farklı yükler altında PETG plastik dişlisinin aşınma dayanımı

Şekil 6.3'e göre ABS malzemeden üretilen plastik dişli çarklara uygulanan yük arttırıldığında aşınma miktarının da arttığı gözlenmiştir. 1,5 Nm yük miktarında dişlilerin ilk temasları esnasında aşınma miktarı hızlı bir şekilde artmış daha sonra kademeli bir şekilde devam etmiştir. Bölüm 6.1'de gösterildiği üzere plastik dişlide kırılma $5,23 \times 10^5$ tur sonra gözlenmiştir. Yük miktarı 3 Nm olduğunda plastik dişlilerin hasara uğraması $7,86 \times 10^4$; 5 Nm olduğunda $1,16 \times 10^4$ tur sonra gözlenmiştir.

ABS malzemeden üretilen plastik dişli çarklara uygulanan yük miktarı 2 kat arttığında dişli çarkın hasara uğramadan çalışma süresi 6,65 kat azalmıştır. Başka bir deyişle 1,5 Nm yükü yüklenen ABS plastik dişlileri 900 d/d hızla yaklaşık 581,11 dakika hasara uğramadan

çalışabilirken, 3 Nm yüklendiğinde 87, 33 dakika hasara uğramadan çalışabilmektedir. Aynı şekilde 5 Nm ile yüklenen ABS plastik dişli 12,24 dakika hasara uğramadan çalışmakta, 1,5 Nm yük ile kıyaslandığında yaklaşık 45,1 kat daha az çalışmaktadır.

Şekil 6.4'e göre PLA plastik dişlileri 1,5 Nm yük ile yüklendiğinde yaklaşık $5,86 \times 10^5$ tur sonra, 651,11 dakika çalışarak hasara uğramıştır. Yük miktarı 3 ve 5 Nm arttığında hasara uğrama süreleri sırasıyla 90,67 ve 15,33 dakika olmuştur. Hasara uğrama süreleri sırasıyla 7,18 ve 42,47 kat azalmıştır.

Şekil 6.5'e göre PETG plastik dişlileri 1,5 Nm yük ile yüklendiğinde yaklaşık $7,17 \times 10^5$ tur sonra, 796,67 dakika çalışarak hasara uğramıştır. Yük miktarı 3 ve 5 Nm arttığında hasara uğrama süreleri sırasıyla 106,88 ve 24,56 dakika olmuştur. Hasara uğrama süreleri sırasıyla 7,45 ve 32,43 kat azalmıştır.

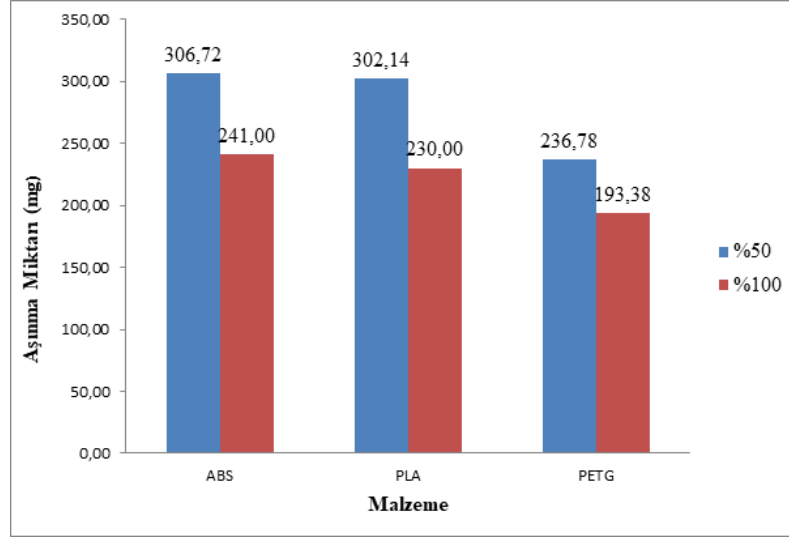
Şekil 6.3-5 toplu olarak incelendiğinde her üç plastik dişlide de yük miktarı arttığı zaman dişli aşınma miktarları artmıştır. Her üç dişli içinde yük miktarı 2 kat arttığı zaman aşınmaya uğrama süreleri yaklaşık 6.5-7.5 kat, 3,33 kat arttığı zaman yaklaşık 35-45 kat daha hızlı şekilde aşınmaya uğramışlardır. Buradan da gözüktüğü üzere plastik dişli çarklar ile çalışırken dişli çiftine etkiyen yük miktarı çok önemlidir. Aşırı yüklemelerde plastik dişli çarklar hızlı bir şekilde aşınarak çalışamama durumuna gelebilmektedir.

6.3. Farklı Dolgu Yoğunluklarında Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri

Eklemeli imalat tekniğinde üç boyutlu yazıcı kullanılarak yapılan üretimin geleneksel üretim yöntemlerine oranla en büyük avantajlarından bir tanesi üretim esnasında parçalara iç boşluk (dolgu yoğunluğu) verilebilmektedir. Parçalara iç boşluk verilmesi ile üretim süresi kısaltmakta ve parçaların ağırlığı azalmaktadır. Bu çalışmada Bölüm 5.3'te üretimi yapılan %100 doluluğa sahip plastik dişli çarkların üretim süresi yaklaşık 3 saat 23 dakika, kullanılan filament uzunluğu 12807 mm ve dişli çarkın ağırlığı 106,22 gr'dır.

Parçalara üretim esnasında %50 iç boşluk verildiğinde üretim süresi yaklaşık 2 saat 26 dakika, kullanılan filament uzunluğu 8815,1 mm ve dişli çarkın ağırlığı 73,11 gr olmaktadır. Parçalara üretim esnasında %50 iç boşluk verilerek kullanılan filament uzunluğu ve parça ağırlığı yaklaşık %31, üretim süresi ise yaklaşık %28 oranında azalmıştır. Bu değerler mukavemetin önemsiz, hafifliğin ön planda olduğu durumlarda oldukça önemlidir.

Bu çalışmada %100 ve %50 doluluklara sahip plastik dişli çarkların aşınma davranışları incelenmiştir. Testlerde uygulanan yük 1,5 Nm, çalışma hızı 900 d/d ve sistem 10^5 tur döndürülmüştür. Testlerin sonucunda oluşan aşınma kaybı grafiği Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

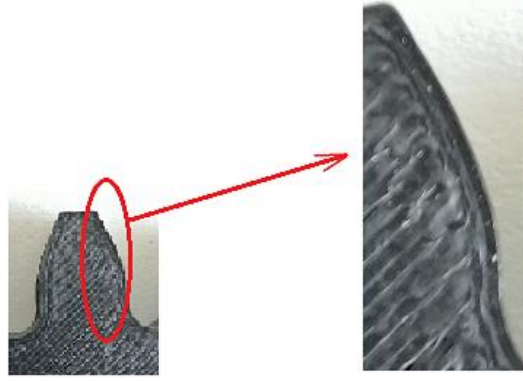


Şekil 6.6. Doluluk oranlarına göre plastik dişli çarkların aşınma davranışları

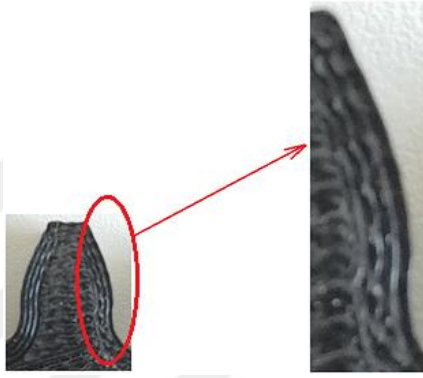
Şekil 6.6 incelendiğinde her üç polimerik malzeme (ABS, PLA ve PETG) ile üretilen dişli çarklarda iç doluluk oranı düşürüldüğünde aşınma miktarları artmaktadır. Aşınma miktarlarının artışı ABS plastik dişlilerinde %27,2 ; PLA plastik dişlilerde %31,4 ve PETG plastik dişlilerde %22,4 şeklindedir. Plastik dişlilerin üretim hızları, kullanılan malzeme ve hafiflik avantajları düşünüldüğünde %50 dolulukta dişliler kullanılabilir.

6.4. Farklı Çember Kalınlıklarında Polimerik Dişlilerin Servis Ömürleri

Üç boyutlu yazıcı ile üretim tekniğinin klasik üretim yöntemlerine oranla avantajlarından bir tanesi de içi boşluklu malzemelerin dayanımını arttırmak için dış çeper kalınlığının artırılmasıdır. Özellikle iç boşluk oranı %10-20 seviyelerine düştüğünde parçaların dayanımları azalmaktadır. (Muminovich, 2022). Tez çalışmasının bu bölümünde %50 iç boşluklu plastik dişli çarkların dış çeper kalınlıkları değiştirilerek aşınma davranışları incelenmiştir. Test koşulları olarak; %50 iç boşluklu, 3 farklı polimerik dişli (ABS, PLA ve PETG), 2 farklı çeper kalınlığında (0,4 mm; 0,8 mm), 1.5 Nm yük, 900 d/d çalışma hızında 10^5 tur döndürülmüştür (Şekil 6.7). Testlerin sonucunda oluşan aşınma kaybı grafiği Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

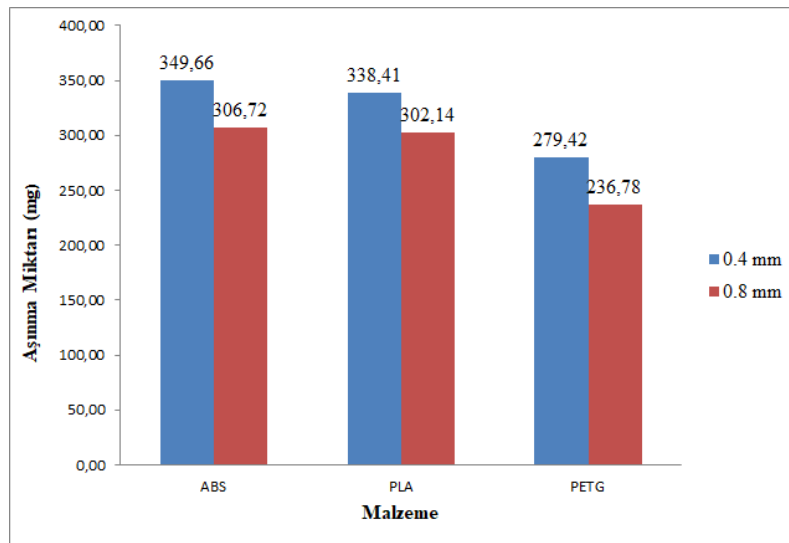


(a)



(b)

Şekil 6.7. Plastik dişli çarkların dış çeper kalınlıkları değişimi (a) 0,4 mm, (b) 0,8 mm



Şekil 6.8. Çeper kalınlıklarına göre plastik dişli çarkların aşınma davranışları

Şekil 6.8 incelendiğinde her üç polimerik malzeme (ABS, PLA ve PETG) ile üretilen dişli çarklarda çeper kalınlık miktarları arttırıldığında aşınma miktarları azalmaktadır. Aşınma miktarları azalma oranı ABS plastik dişlilerinde %12,28 ; PLA plastik dişlilerde %10,71 ve PETG plastik dişlilerde %15,6 şeklindedir. Plastik polimerik dişlilerde iç doluluk oranları %10-20 seviyelerine düşürüldüğü zaman çeper kalınlıklarının öneminin artması beklenmektedir.



SONUÇ /SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eklemeli imalat tekniği ile üç boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilen polimerik dişli çarkların farklı koşullarda aşınma dayanımları incelenmiştir. Çalışma iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda üç farklı malzeme (ABS, PLA ve PETG) ile üretilen plastik dişli çarkların aşınma davranışları incelenmiştir. İkinci kısımda eklemeli imalat tekniğinin klasik üretim yöntemlerine göre avantajlı yönleri (dolgu yoğunluğu, dış çeper kalınlığı) kullanılarak üretilen plastik dişlilerin aşınma dayanımları belirlenerek sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Tez çalışmasında eklemeli imalat tekniklerinden bir tanesi olan üç boyutlu yazıcı ile üretim yöntemi ile üretilmiş plastik dişli çarkların teorik olarak aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışmada üç farklı (ABS, PLA ve PETG) polimerik dişlinin kavrama boyunca aşınma değişimi incelenmiş ve dişliler hasara uğrayana kadarki servis ömürleri belirlenerek en uygun plastik dişli belirlenmiştir. Plastik dişlilerin yükler karşısında çok çabuk bozulmaları, testlerde aşınmaya birçok parametrenin etki etmesi, test sürelerinin uzunluğu gibi nedenlerden dolayı teorik olarak aşınmanın belirlenmesi ve ona uygun dişlinin seçilmesi önemlidir. Bu çalışmada 1,5 Nm yük, 900 d/d hızda toplam 10^5 tur süre çalıştırılması sonucunda plastik dişli çarklarda teorik aşınma derinlikleri sırasıyla ABS polimeri için yaklaşık 0,35 mm, PLA polimeri için yaklaşık 0,32 mm, PETG polimeri için yaklaşık 0,25 mm olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak en fazla aşınma sırasıyla ABS, PLA ve PETG plastik dişlilerde gözlemlenmiştir. ABS ve PLA plastik dişlilerinin aşınmalarının birbirine yakın, PETG malzeme dişlilerin aşınma derinlikleri ABS ve PLA malzemeye göre sırasıyla %30 ve %40 daha az olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında PETG plastik dişlisinin aşınmaya karşı en dayanıklı malzeme olduğu saptanmıştır. PETG polimerik dişlilerinin aşınmaya dayanıklı olmasının en önemli nedenlerinin üretim esnasında katmanlarının birbirine daha iyi yapışarak tutunması ve esnek yapıya sahip olması söylenebilir. Dişlilerin servis ömürlerinin kıyaslanması için yapılan devam testleri sonucu PETG'nin ABS'ye göre çelik dişli karşısında %37, PLA dişlisine göre ise %22, 3 oranında daha dayanıklı olduğu saptanmıştır.

2. Plastik dişli çarklar aşırı yük ve ani sıcaklıklara karşı düşük aşınma dayanımı göstermektedir. Bu çalışmada üç farklı polimerik (ABS, PLA ve PETG) dişli çarkların farklı yüklerde aşınma dayanımları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan üç polimerik dişli malzemesinde de yük arttıkça zaman aşınma dayanımı ve çalışma süresi azalmıştır. ABS, PLA ve PETG polimerik dişlide uygulanan yük 2 kat arttığı zaman çalışma süresi sırasıyla 6,65; 7,18; ve 7,45 kat azalmıştır ve dişliler bu sürelerde hasara uğramıştır. Uygulanan yük miktarı 3,33 kat arttığı zaman çalışma süreleri 45,1; 42,5 ve 32,4 kat azalmıştır. Test sonuçlarından görüldüğü üzere uygulanan yük miktarı belli değerlerin üzerin çıktığı zaman aşınma süresi aniden azalmaktadır. Bu değerlerin yüksek çıkmasının nedeni plastik dişlisinin karşılık dişlisi olarak çelik dişli kullanılmıştır. Plastik-plastik dişlilerde aşınma süresinin dahada azalacağı varsayılmaktadır.

3. Eklemeli imalat tekniği ile parça üretiminin, klasik üretim yöntemlerine oranla belki de en büyük avantajı üretim esnasında dolgu yoğunluklarının değiştirilmesi (parçalara iç boşluk verilmesi) ile daha hafif parça imal edilebilmesidir. Bu çalışmada %100 ve %50 dolgu yoğunluklarına sahip plastik dişli çarkların aşınma dayanımları kıyaslanmıştır. Her üç polimerik dişli çarkın 10^5 tur gibi bir süre çalıştırılması sonucunda %50 dolgu yoğunluklarına sahip plastik dişli çarkların aşınma dayanımları ABS plastik dişlilerinde %27,2; PLA plastik dişlilerde %31,4 ve PETG plastik dişlilerde %22,4 artma göstermiştir. Eklemeli imalat yönteminin en büyük dezavantajlarından birisi üretim süresinin yavaş olmasıdır. %50 dolgu yoğunluğuna sahip plastik dişlilerin %100 dolgu yoğunluğuna oranla yaklaşık %28 üretim süresinin kısalması ve parça ağırlığının yaklaşık %31 oranında azalması düşünüldüğünde düşük yüklerde dolgu yoğunluğunu azaltmak alternatif olarak kullanılabilir.

4. PLA polimerinin camsı geçiş sıcaklığı ABS ve PETG plimerlerine göre daha düşük olduğu için daha düşük enerji ile kolay şekil alması, piyasada yaygın bir şekilde kullanumına neden olmuştur. Pratikte ortama açık bir şekilde çalışan yazıcılarda yatak bölgesini ısıtmadan PLA ile üretim yapılabilir. Ancak bu çalışmada PLA polimeri içinde yatak sıcaklığı $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ de ısıtılmış, tabakalar arasında daha iyi bir bağ oluşması hedeflenmiştir. ABS polimerinin PLA'ye göre yüksek ekstüder sıcaklığı olması ve yatak sıcaklığının yine $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile en çok olması ABS polimerinin, şekil alabilmesi için gerekli enerjiye daha çok ihtiyacı olduğunu, PLA'nın da diğerlerine göre en düşük camsı geçiş ve yatak sıcaklıkları olması ile yazdırılabilme kabiliyetinin diğer polimelere göre iyi olduğu sonucuna varılabilmektedir.

5. Öte yandan PLA polimeri $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile en düşük ısıl çarpılma sıcaklığına ve $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile en düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip polimer olduğundan, sıcaklıktan en çok etkilenen polimer tipi olarak karşımıza çıkmaktadır. Şöyle ki çalışma koşulları $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerinde olan bir uygulamada PLA polimeri oldukça sünek bir davranış gösterirken, ABS polimerinin yeni yumuşamaya başlaması beklenmektedir. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda PLA polimeri daha çok deforme olacağından ABS polimerinin seçilmesi daha uygun olacaktır.

6. Plastik dişlilerde yorulma, dişlilerin birbirlerine ilettikleri yük ile birlikte meydana gelen ısı ve bu ısının neden olduğu yumuşuma ile termal hasarlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada seçilen polimerlerin mekanik özelliklerine baktığımızda PETG polimeri için ısı iletkenliğinin $0,21\text{ W/m-K}$ ile diğerlerine göre en çok olduğu görülmektedir. Bu nedenle PETG'nin PLA ve ABS ye göre ısıyı iletme kabiliyetinin diğerlerine göre daha olduğu iyi olduğu söylenebilir. Bu çalışma da PETG polimerinin servis ömrünün diğerlerine göre çok çıkmasının nedeninin, yazdırılma esnasında katmanlar arasında oluşan bağ kuvvetinin daha iyi olmasının yanında oluşan ısıyı diğerlerine göre daha iyi dağıtabildiği yorumu yapılabilir.

7.Çalışma öncesi açık ortamda konumlanmış yazıcı ile kış şartlarında yapılan başlangıç denemelerinde üretilen dişli çarklarda diş uçlarında soğuma ile birlikte kalkma ve deformasyon görülmüştür.Bunun nedeninin üretim esnasında , yazdırma sıcaklığı ile ortam sıcaklığındaki farktan olduğu düşünülmüş ve daha sonra izolasyonlu bir ortamda konumlandırılmış farklı bir yazıcıda üretim tercih edilmiştir.Ayrıca üretim öncesi yazıcıya ait cam tabla üzerine bağlayıcı bir solüsyon uygulanarak dişlinin yatak zemine sabitlenmesi ve izolasyonlu ortamda sıcaklık farkının azalması amaçlanmıştır.

8. Eklemeli imalat tekniği ile parça üretiminin, klasik üretim yöntemlerine oranla diğer bir avantajı özellikle dolgu yoğunluğu düşük olan malzemelere dış çerper ekleyerek aşınma mukavemetini arttırmaktır. Bu çalışmada çerper kalınlığının plastik dişli çarklarda aşınma dayanımına etkisini incelemek için 0,4 ve 0,8 mm kalınlığa sahip %50 dolgu yoğunluğuna sahip plastik dişliler kullanılmıştır. Bölüm 7.1’de teorik aşınma derinliğine göre en fazla aşınmanın 0,35 mm olduğu bilindiğinden, 0,4 mm’den daha düşük bir çerper kalınlığı ile testler yapılmamıştır. Çerper kalınlığı 0,4 mm’den 0,8 mm’ye çıkarıldığında aşınma ABS plastik dişlilerinde %12,28, PLA plastik dişlilerde %10,7 ve PETG plastik dişlilerde %15,26 değerlerinde azalma göstermiştir. Bu değerler özellikle daha düşük dolgu yoğunluklarında artması varsayılmaktadır.

9.Üç boyutlu yazıcı ile imalatla, nihai ürünün hangi amaçla kullanılacağı, nerede çalışacağı, hangi gerilmelere maruz kalacağı düşünülerek yazdırma parametreleri seçilmelidir. Örneğin, baskı deseni (bal peteği, kare, üçgen ya da zigzag gibi) seçilirken nihai ürünün maruz kalacağı gerilmelerin yönüne göre seçilmesi, kabuk kalınlığı seçiminde ise aşınma derinliğinde olduğu gibi nihai ürünün üzerinde civata, somun gibi bağlantı elemanı kullanılması ya da zımpara ve parlatma işlemleri gibi sonlama işlemleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Dişli çarklar makine endüstrisinde oldukça sık kullanılan güç ve hareket iletim elemanlarındandır. Plastik dişli çarklar özellikle sessiz çalışması, hafif ve korozyona dayanıklı olması yönlerinden elektrik motorları ve gıda sektörlerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilen plastik dişli çarkların farklı çalışma koşullarda aşınma dayanımları ve servis süreleri incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda plastik-plastik dişli çarkların yük altında çalışması esnasında oluşan ısının aşınma dayanımına etkisi incelenebilir. Ayrıca aşınmayı önlemek için çeşitli polimerik malzemelerle plastik dişli çarkların kaplanması deneysel olarak incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Anonim, 2022. Redüktör- Hidrolik Kaplin ve Dişli Ürün Kataloğu, <https://ermaksandisli.com.tr/katalog/ermaksan.pdf> (16.10.2022).
- Anonim, 2022. Planet Dişli Ürün Görseli, <https://www.onaydisli.com/detay.php?id=1607423036> (16.10.2022).
- Anonim, 2022. Zincir Dişli Ürün Görseli, <https://www.yavuzlardisli.com/?s=page&id=19> (16.10.2022)
- Anonim, 2022. Antik Yunan Odemeter Görseli, <https://www.hellenicaworld.com/Greece/Technology/en/AncientGreekTechnology014.html> (10.10.2022).
- Anonim, 2022. ABS polimerinin bazı özellikleri ve kullanım geçmişi, <https://pagev.org/abs> (16.10.2022)
- Anonim, 2022. Üç boyutlu yazıcıda kullanılan malzeme örnekleri, <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used3dprinting110420174/> (16.10.2022).
- Anonim, 2022. PLA ve ABS polimerlerinin karşılaştırmalı örnekleri, <https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/#section-pla-vs-abs-filaments-compared> (22.03.2023)
- Anonim, 2022. Filatech marka PETG mazlemesine ait ürün kataloğu, <https://filatech.store/product/petg-filament/> (22.03.2022).
- Anonim, 2022. Plastik Enjeksiyon Üretimi Görseli, <https://www.aldemirltd.com/injection-process> (22.03.2022)
- Anonim, 2022. FDM yönteminin çalışma prensibi, <https://www.3dpartsunlimited.com/blog-post/fdm-fused-deposition-modeling/> (22.02.2023)
- Anonim, 2022. Parlama Aşınmasının Görseli, <https://www.machinerylubrication.com/Read/29642/understanding-polishing-wear> (22.03.2023).
- Anonim, 2022. Korozyon Aşınmasının Görseli, <https://rewardprice.com/business/how-corrosion-and-abrasion-can-wear-down-machinery/> (22.03.2023)
- Anonim, 2022. Sürtünme aşınması görseli , <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter-scuffing/#:~:text=Scuffing%20is%20the%20sudden%20failure,separate%20the%20two%20mating%20components.> (22.02.2023)
- Anonim, 2022. FDM teknolojisinde kullanılan metal katkılı filament örnekleri, <https://all3dp.com/2/3d-printer-metal-filament-for-real-metal-parts/> (22.02.2023)
- Amarnath, M. ve Chandromohan, S. (2011). Experimental investigations of surface wear assessment of spur gear teeth. *Journal of Vibration and Control* ,18(7), 1009–1024: SAGE Journal.
- Ayrılmış, N. (2018). Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament. *Polymer Testing*, 71,163-166: Elsevier Journal.
- Balani, K. ve Vivek, V. (2015). Biosurfaces: A Materials Science and Engineering Perspective, First Edition, *The American Ceramic Society: John Wiley & Sons, Inc.*
- Boncina, T. ve Polonec, B. (2022). Wear Behaviour of Multilayer Al-PVD-Coated Polymer Gears. *Polymers: MDPI Journals*.
- Cervero, E. , Melia, F. ve Ferrer, P. (2020). Leonardo da Vinci's Contributions from a Design Perspective: *MDPI Journals*, (ss.16).

Dihge, A. ve Misra, K. (2014). Investigation of Wear Resistance and Torque Transmission Capacity of Glass Filled Polyamide and PEEK Composite Spur Gears. ISSN: 2249 – 8958, Volume-3: International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) .

Dişli Teknolojisi Dergisi (Haziran,1999).

Düzçükoğlu, H., Yakut, R. ve Uysal, E. (2010). The Use of Cooling Holes to Decrease the Amount of Thermal Damage on a Plastic Gear Tooth. Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 10, (ss. 545-555).

Erichello, R. (2002). Journal of Failure Analysis and Prevention 2(6), (ss. 8-16).

Errichello R. Dişli Yüzeyindeki Yorulma Hasarı ve Yorulma Ömrü Analizi, Triboloji Ansiklopedisi: Springer Link dergisi.

Flodin, A. ve Andersson, S. (1997). Simulation of mild wear in spur gears. Wear ,207: (ss.16–23): Elsevier Journals.

Hanon, M. ve Alshamma Y. (2020). Effect of print orientation and bronze existence on tribological and mechanical properties of 3D-printed bronze/PLA composite. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (108) ,553–570.

Hijazi, A., Ders Notları, Jordan&German Üniversitesi.

İmrek, H. ve Düzçükoğlu, H. (2007). Relation between wear and tooth width modification in spur gears. Wear, (262),390–394.

İmrek, H. (2009). Performance improvement method for Nylon 6 spur gears. Tribology International, Vol. 42, 3 (ss. 503-510).

Kim, Y. (2006). Durability improvement method for plastic spur gears. Tribology International 39.(1454–1461): Elsevier Journal.

Kurukowa, M. ve Uchiyama, Y. (2003). Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced polyamide 12. Wear, 254 (468–473): Elsevier Journal.

Lacey, P. (1997). A laboratory test to predict lubricant quality as measured by the FZG Load Stage Test. Journal of Fuels and Lubricants, Vol (106) Section 4.(ss. 1431-1444).

Maitra, G. (2001). *Dişli Tasarımı El Kitabı*: Mc Graw Hill Yayınevi.

Mao, K. ve Li, W. (2008). Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears. Wear: Elsevier Journal.

Marczis, R. ve Zsidai, L. (2020). Impact of 3D-printing structure on the tribological properties of polymers, *Industrial Lubrication and Tribology*: Emerald Publishing Limited [ISSN 0036-8792]72/6 (ss. 811–818).

Matkovic, S. ve Pogacnik, A. (2021). Wear -coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: A critical appraisal of methodologies, *Wear* (480-481): Elsevier Journal.

Muminovic, J. ve Pervan, N. (2022). Failure analysis of nylon gears made by additive manufacturing, *Engineering Failure Analysis*: Elsevier Journal.

Radzevic, D. (2012). Handbook of Practical Gear Design and Manufacture.

Radzevich, P. (2016). Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture.

Pandsic, A. and Milovanovich, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for FDM process. *30th Daaam International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Viyana: Avusturya.

Smithers. R., Plastiklerin Fiziksel Testi, İngiliz Plastik Federasyonu.

Shigley. (2004). Standart Handbook of Machine Design: Mc GrawHill Yayınevi.

- Spoerk, M. ve Gonzelez, J. (2018). Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication. *Plastics, Rubber and Composites*, 47:1, (17-24) Limited: Taylor & Francis Group, UK.
- Sun, X. (2019). A Model for Mesh Stiffness Evaluation of Spur Gear with Tooth Surface Wear, *Hal Open Science*: Fransa.
- Talat, T. (2015). Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Cilt 3: Çağlayan Kitabevi.
- Tavcar, J. ve Gasper, G. (2018). Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears, *Systems and Manufacturing*, Vol.12, No.1: Journal of Advanced Mechanical Design.
- Tunalioglu, M.Ş. ve Tuç, B. (2014). Theoretical and experimental investigation of wear in internal gears. *Wear*, (309),208–215.
- Tunalioglu, M.Ş. ve Torun, T. (2021). The investigation of wear on three-dimensional printed spur gears. *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol.235(6),2027-2034: SAGE Journal.
- Xu, X. ve Gao, F. (2021). Wear performance of commercial Polyoxymethylene Copolymer and Homopolymer Injection Moulded Gears. *Tribology Industry*, (Vol. 43 No 4),561-573: Warwick University, UK.
- Varol, K. (2005). Dişli Çarkların Teknik Çizimi, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Yakut, R. (2008). *Bazı termoplastik dişli çarkların yük taşıma kapasitesi ve hasar oluşumunun deneysel olarak incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yuan, Z. (2018). Wear reliability of spur gear based on the cross-analysis method of a non-stationary random process. SAGE Journals.
- Zhang, J. ve Xianzeng, L. (2015). Effects of misalignment on surface wear of spur gears. *Engineering Tribology*, SAGE Journals.
- Zhang, Y. ve Pursell, C. (2020). A physical investigation of wear and thermal characteristic of 3D printed nylon spur gears. *Tribology International*: UK

EKLER

EK-1 Düz Dişli Çarkların Ana Boyutlarının Hesaplanması (DIN 867'e göre)

1-Standart Kavrama Açısı (α)

DIN 867 ye göre standart kavrama açısı 20° dir.

2-Taksimat Dairesi Çapı

$$d_t = z \cdot m$$

$$d_{tp} = 17 \cdot 6 = 102 \text{ mm (pinyon)}$$

Yarı çapı, $r=51 \text{ mm}$

$$d_{t\checkmark} = 22 \cdot 6 = 132 \text{ mm (çelik dişli çark)}$$

Yarı çapı, $r = 66 \text{ mm}$

3-Temel Dairesi Çapı

$$d_b = d_t \cos \alpha$$

$$d_{bp} = 102 \cdot \cos 20$$

$$d_{bp} = 102 \cdot (0,94) = 95,849 \text{ mm}$$

Yarı çapı, $r = 47,924 \text{ mm}$

$$d_{b\checkmark} = 132 \cdot (0,94) = 124,04 \text{ mm}$$

Yarı çapı, $r = 62,02 \text{ mm}$

4-Diş Üstü Dairesi Çapı

$$d_{\ddot{u}} = d_t + 2m = m (z+2)$$

$$d_{\ddot{u}p} = 102 + 2 \cdot 6 = 114 \text{ mm ya da } d_{\ddot{u}p} = 6 \cdot (17 + 2) = 114 \text{ mm}$$

Yarı çapı, $r=57 \text{ mm}$

$$d_{\ddot{u}\checkmark} = 132 + 2 \cdot 6 = 144 \text{ mm ya da } d_{\ddot{u}\checkmark} = 6 \cdot (22 + 2) = 144 \text{ mm}$$

Yarı çapı, $r = 72 \text{ mm}$

5- Taksimat (hatve, adım)

$$t = m \cdot \pi$$

$$t = 6 \cdot \pi = 18,849 \text{ mm}$$

6-Dış Tabanı Çapı

$$d_{tb} = m \cdot (z - 2,5) = d_t - 2h_{tp}$$

$$d_{tb} = 6 \cdot (17 - 2,5) = 6 \cdot (14,5) = 87 \text{ mm ya da } d_{tb} = 102 - 15 = 87 \text{ mm (pinyon)}$$

$$\text{Yarı çapı, } r = 87/2 = 43,5 \text{ mm}$$

$$d_{tb} = 6 \cdot (22 - 2,5) = 117 \text{ mm ya da } d_{tb} = 132 - 15 = 117 \text{ mm (çelik çark)}$$

$$\text{Yarı çapı, } r = 117/2 = 58,5 \text{ mm}$$

7- Dış Başı Yüksekliği

$$h_{tp} = r_{tp} - r_{bp} = 57 - 51 = 6 \text{ mm (pinyon)}$$

$$h_{tç} = r_{tç} - r_{bç} = 72 - 66 = 6 \text{ mm (çelik çark)}$$

8-Dış Tabanı Yüksekliği

$$h_{tp} = r_{tp} - r_{tb} = 51 - 43,5 = 7,5 \text{ mm (pinyon)}$$

$$h_{tp} = r_{tp} - r_{tb} = 66 - 58,5 = 7,5 \text{ mm (çelik çark)}$$

9-İletim Oranı

$$i = \frac{d_g}{d_p} = \frac{Z_g}{Z_p}$$

$$i = \frac{132}{102} = \frac{22}{17} = 1,294$$

10-Eksenler Arası Uzaklık

$$a = \frac{d_{tp}}{2} + \frac{d_{tç}}{2} = 51 + 66 = 117 \text{ mm}$$

EK-2 Aşınma derinliğinin teorik hesabında kullanılan Matlab yazılımının görüntüsü

```
Editor - D:\yedek 27.11.20\A yedekler\okuldaki-PC-YEDEK\doktoraek060811\songra\50noktagrafik\2\pinyon\normal21p.m
normal21p.m x ahfun.m x akfun.m x Ftfun.m x Pfun.m x radyan.m x normal31p.m x normal11p.m x +
1 - clc
2 - m=3;
3 - z1=17;
4 - z2=41;
5 - alpha0=20;
6 - devir=900;
7 - T1=1.5*10^3;
8 - b=10;
9 - v1=0.3;
10 - v2=0.3;
11 - E1=2.1*10^3;
12 - E2=206*10^3;
13 - E=inv((1-v1^2)/E1)+(1-v2^2)/E2);
14
15 - k=2.70e-5;
16 - dd=[10;20;30;40;50;60;70;80;90;100];
17
18 - y=linspace(-10,10,100);
19
20
```

```
Editor - D:\yedek 27.11.20\A yedekler\okuldaki-PC-YEDEK\doktoraek060811\songra\50noktagrafik\2\pinyon\normal21p.m
normal21p.m x ahfun.m x akfun.m x Ftfun.m x Pfun.m x radyan.m x normal31p.m x normal11p.m x +
21 - d01=m*z1;
22 - d02=m*z2;
23 - w1=pi*devir/30;
24 - w2=w1*(z1/z2);
25
26 - tur=1:1e2:1.1e3;
27 - hp=zeros(1,length(y));
28
29
30 - for ind3=1:length(tur)-1
31 - for ind2=1:length(y)
32 - for ind=tur(ind3)+1:tur(ind3+1)
33
34
35 - R1=(d01/2)*sin(radyan(20))+y(ind2);
36 - R2=(d02/2)*sin(radyan(20))+y(ind2);
37
38 - R=inv(inv(R1)-inv(R2));
39
40
```

```
Editor - D:\yedek 27.11.20\A yedekler\okuldaki-PC-YEDEK\doktoraek060811\songra\50noktagrafik\2\pinyon\normal21p.m*
normal21p.m* x ahfun.m x akfun.m x Ftfun.m x Pfun.m x radyan.m x normal31p.m x normal11p.m x +
40
41 - u1=w1*R1;
42 - u2=w2*R2;
43 - Ft=Ftfun(T1,d01,b,y(ind2),-10,-1.14,1.14,10);
44 - ah=ahfun(Ft,R,E);
45 - P=Pfun(Ft,ah);
46 - ak=akfun(u1,u2);
47 - if ak<0
48 - ak=ak*(-1);
49 - else
50 - ak=ak;
51 - end
52
53 - hp(ind,ind2)=hp(ind-1,ind2)+k*P*2*ah*ak;
54 - end
55 - hptot(ind2,ind3)=hp(end,ind2);
56
57 - end
58 - end
59
```

