

**SİLİNDİRİK DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAYICI VİSKOZİTESİNİN
AŞINMAYA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mustafa Selçuk KESKİN

125830

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
(MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

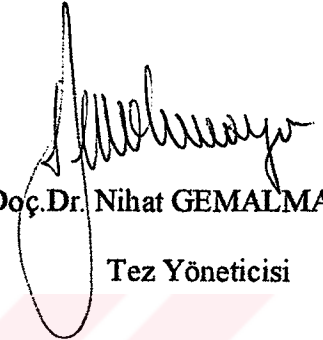
**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2002

ANKARA

125830

Mustafa Selçuk KESKİN tarafından hazırlanan SİLİNDİRİK DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAYICI VİSKOZİTESİNİN AŞINMAYA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Yard. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Tez Yöneticisi

Bu çalışmada, Jürimiz tarafından Makine Mühendisi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bedri TUÇ

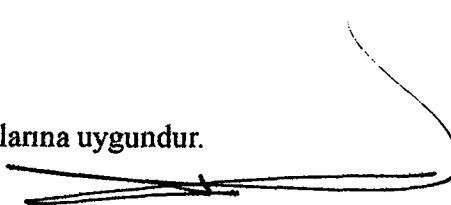
Üye : Prof. Dr. Faruk MENDİ

Üye : Yard. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Üye :

Üye :

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAMAYA ETKİ EDEN ÖNEMLİ FAKTÖRLER	27
2.1 Hız Faktörü (Çevresel Hız)	27
2.2 Yağ Viskozitesi Faktörü	28
2.3 Malzeme Faktörü ve Dişlerin Yüzey Sertliği	29
2.4 Pürüzlülük Faktörü	30
2.5 Yük Faktörü	31
2.6 Yağ Sıcaklığı Faktörü	32
2.7 Yağ Miktarı Faktörü	33
2.8 Profil Kaydırma Faktörü	34
2.9 Diş Başı Daralması Faktörü	34
2.10 Yağ Cinsi Faktörü	35
2.11 Diş Genişliği Faktörü	35
2.12 Dişli Yağlama Yöntemi Faktörü	36
3. DİŞLİ ÇARKLARDA OLUŞAN HASARLAR.....	38
3.1 Dişli Çarklarda Yağlamayla İlgili Bozukluk Modları.....	39
4. DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAMA TEORİSİ	47

4.1.	Yağın Fiziko-Kimyasal Etkisi	51
4.2.	Diş Yüzeylerinde Yağlama ve Sürtünme Koşulları	52
4.2.1.	Ortalama sürtünme katsayısı.....	53
4.3.	Elasto-hidrokinamik Yağlama Teorisi	54
4.4.	Film Kalınlığının Hesaplanması İçin Prosedür	59
4.5.	Film Kalınlığı ve Hasar Kriteri	60
4.6.	Yüzey Basıncının Aşınmaya Olan Etkilerinin İncelenmesi	62
4.7.	Yük Taşıma Kapasitesi ve Hesaplanması	62
4.8.	Dişli Yağ Viskozitesi Seçimi	66
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
5.1.	Mekanik Dinamik Testler.....	68
5.2.	Deney Düzenegi	70
5.3.	Deneyde Kullanılan Yağ Çeşitleri.....	72
5.4.	Teste Tabi Tutulan Dişli Çarklar.....	72
5.5.	Deneylerin Hazırlık ve Gerçekleştirme Yöntemi.....	73
5.6.	Deneyin Yapılması ve Ölçümler	75
5.6.1.	Makro fotoğraf çekimleri	75
5.6.2.	Dijital mikro fotoğraf çekimleri	76
5.6.3.	Yüzey pürüzlülüğü ve aşınma derinliği tespiti	77
6.	DENEYSEL SONUÇLAR	79
6.1.	Oluşan Aşınma Değerinin ve Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerinin Tespiti	79
6.2.	Oluşan Aşınma Değerinin Hassas Terazile Ağırlıkça Tespit	79
6.3.	Oluşan Aşınma ve yağ karakteristiği Değerinin Spectrometrik Analiziyle İrdelenmesi.....	80
6.4.	Oluşan Aşınma Değerinin Görüntü İşleme Metoduyla Belirlenmesi.....	82
7.	SONUÇLAR	90

KAYNAKLAR	91
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ	117



SİLİNDİRİK DÜZ DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAYICI VİSKOZİTESİNİN AŞINMAYA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa Selçuk KESKİN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2002**

ÖZET

Tüm dişli çarklarda çok sıkça rastlanan aşınma türleri günümüzde hala kesin olarak açıklanabilmiş değildir. Dişli çarklarda yağlayıcı viskozitenin aşınmaya olan etkisi de bunların en önemlilerinden biridir. Deneyler, Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Fakültesi, Makina Elemanları biriminde bulunan, kapalı devre güç dolaştıran dişli yorulma test düzeneği üzerinde, özel olarak imal ettirilen silindir düz dişli çarklarda kapsamlı yorulma deneyleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde: sanayide kullanılan kapalı sistem dişli yağlarındaki değişik viskoziteli yağların yük taşıma kabiliyeti, aktif profilin maruz kaldığı hertz basıncının değişiminin nasıl olduğu ve bu değişen basınç ile yüzey hasarı derecesinin ne şekilde farklılık gösterdiği sorularına cevap aranmıştır. Farklı yağ viskozitelerinin etkilerini inceleyebilmek için; profil öteleme faktörü, eğim açısı, yük faktörü, malzeme ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri sabit tutulmuştur. Yapılan hesaplamalar ve deney sonuçları ışığında, incelenen parametrelerin aşınma hasarı oluşumuna etkileri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Bilim Kodu : 625.02.01

Anahtar Kelime : Lubrication of wear, lubrication of gearing, Scuffing, lubrication, pitting, dişli yağlama, yüzey yorulması.

Sayfa Adedi : 130

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç.Dr.Nihat GEMALMAYAN

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LUBRICANT
VISCOSITY ON THE WEAR CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL SPUR
GEARS**

(M.Sc. Thesis)

Mustafa Selçuk KESKİN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2002

ABSTRACT

Generating Mechanism of the most frequently observed failure modes in all gears are still not explained clearly. One of these important modes is the effect of lubricant viscosity. On the wear characteristics. Experiments have been conducted on the experimental set up which was built to make fatigue tests on the cylindrical spur gears. Project was founded by research projects formation of Gazi University. In Experiments, lubricants with different viscosities which are used in closed circuit lubrication oils have been tested for their load carrying capacity, Hertzian contact pressure change and for the relation between pressure change and surface damage. In order to investigate the effect of lubricant viscosity; profile correction factor, helix angles, load factor, material and surface roughness parameters fixed constant.

In the light of the calculations and experimental results, the effects of investigated parameters wear damage are presented.

Science Code : 656.02.01

**Key Words : Lubrication of wear, lubrication of gearing, lubrication of
Scuffing, lubrication, pitting, Scuffing**

Number of Pages : 130

Advisor : Yard. Doç.Dr. Nihat GEMALMAYAN

TEŞEKKÜR

Tez konumu belirleyerek, çalışmalarım süresince değerli desteğini esirgemeyen danışmanım Yard.Doç.Dr. Sayın Nihat GEMALMAYAN'a derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda tez konumla ilgili çalışmalarımda tecrübeleriyle yol gösterdiği için, kıymetli hocam Prof. Dr. Sayın Bedri TUÇ'a ve yüzey pürüzlülüğü ölçümünde sağladığı teknik olanaklardan dolayı çok kıymetli hocam Prof. Dr. Sayın Can ÇOĞUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımda daima yol gösterici olan çok kıymetli hocam Prof. Dr. Sayın Faruk MENDİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek Lisansa başlamamda ve çalışmalarımda manevi desteğini hiç esirgemeyen çok değerli ağabeyim Dr. Sayın Halim KARAŞIN'e ve çok kıymetli arkadaşlarım Ali ARSELİM, Sedat BİNGÖL, Fevzi KÖSEOĞLU ve Enver GÜNSEL'e manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda ve yağ spectrometrik analizlerinin gerçekleştirilmesinde engin teknik ve tecrübelerini esirgemeyen TOTALFINAELF madeni yağlar teknik servisler teknik müdürü Sayın Asım AKAN ve iç Anadolu satış müdürü Makina Mühendisi Sayın Murat GÜR'e gösterdikleri anlayış, samimi ilgi, bilgi paylaşımı ve titiz çalışmaları için teşekkürlerimi sunarım.

En son olarak da, kazandığım her başarıda en az benim kadar, hatta benden daha fazla hak sahibi olan Sevgili annem, babam ve kardeşlerime gösterdikleri sevgi, sabır ve anlayıştan ve sağladıkları destekten ötürü teşekkürü borç bilirim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1 Dişlilerin yük taşıma kapasitesi üzerine malzeme,yağlayıcı, tasarım ve çalışma şartlarının etkisi.....	63
Çizelge 5.1 Deneyde kullanılan yağ çeşitleri ve özellikleri	72
Çizelge 5. 2 Deneyde kullanılan dişlilerin özellikleri	73
Çizelge 6.1 Pinyon dişlilerin aşınma miktarının ağırlıkça tespiti.....	80
Çizelge 6.2 Deneylerde kullanılan yağların deney sonrası yağ analiz değerleri.....	81
Çizelge 6.3 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.....	85
Çizelge 6.4 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.....	86
Çizelge 6.5 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 8 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.....	87
Çizelge 6.6 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 11 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.....	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1	Evolvent dişli çarkın boyutları..... 4
Şekil 1.2	Kavrama faktörleri ve mekanizmanın temel boyutları..... 6
Şekil 1.3	Profil kaydırmanın izahı ve ortaya çıkan mekanizma tipleri.....8
Şekil 1.4	Dişli Çarklara etki eden kuvvetlerden ötürü dişlilerde meydana gelen eğilme, basma ve kayma gerilmeleri oluşumu.....10
Şekil 1.5	Polariskopla çekilmiş dişlilerdeki zorlamanın kavrama doğrusu yönünde olduğu görülür.....10
Şekil 1.6	Eş çalışan diş yüzeylerinde oluşan gerilmelerin değişimi..... 11
Şekil 1.7	Eş çalışan dişlilerin kinematik durumu..... 12
Şekil 1.8	Profillerin temas noktalarında kinematik değerler.....15
Şekil 1.9	Profiller arası teğetsel hızlar, sürtünme kuvveti ve özgül kayma hızı....16
Şekil 1.10	Dişli çarklarda Hertz yüzey basıncı..... 17
Şekil.1.11	Temas değişimi boyunca eğrilik yarı çapı ve hertz gerilmelerinin değişimi a) Tekil B noktasında eğrilik yarıçapları, b) Eşdeğer eğrilik yarıçapı, c)Hertz basıncı..... 19
Şekil 1.12	a.b.Profil üzerinde yükleme durumu c. A tipi profile ait kinematik ve yüzey basınç değerleri.....20
Şekil 2.1	Sürtünme güç kaybı ile çevresel hız arasındaki ilişki.....28
Şekil 2.2	Diş başı daralması..... 34
Şekil 2.3	Kavrama sonunda küçük temas yüzeyi.....34
Şekil 2.4	Dişlilerin elastik eğilmesi sebebiyle kavramaya girişteki darbe etkisi....34
Şekil 2.5	a,b. Daldırma ve püskürtme yağlama yöntemleri.....36

Şekil 2.6.	Açık dişliler için yağlama metotları.....	37
Şekil 3.1	Dişli çarklarda meydana gelen hasarların oluştuğu bölgeler.....	38
Şekil 4.1.	Bir biri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşan sıvı sürtünme....	47
Şekil 4.2	Metalsel yüzeyler üzerinde yağın fiziksel etkisi.....	51
Şekil 4.3	Sürtünme ve yağlama koşulları.....	52
Şekil 4.4	a – Paralel eksenli silindirler b – Yağsız temasta basınç dağılımı (hertz tipi) c – Yağlı temasta basınç dağılımı.....	55
Şekil 4.5	95 viskozite indeksli tipik mineral dişli yağları için viskozite sıcaklık diyagramı.....	57
Şekil 4.6	Mineral dişli yağlar için basınç - viskozite katsayısına karşılık gelen sıcaklık.....	58
Şekil 4.7	Yağ tabakasının kalınlığının hesaplanması için akış diyagramı.....	61
Şekil 4.8	Alın ve konik dişliler için kuvvet - hız faktörüne göre viskozite seçimi.....	67
Şekil 5.1	a,b,c,d. Deney model ve soyut model deney yöntemleri.....	68
Şekil 5.2	Deney düzeneği.....	71
Şekil 5.3	Dijital mikro fotoğraf çekim alanı.....	76
Şekil 5.4	Yüzey pürüzlülüğün ölçüm doğrultusu.....	78
Şekil 5.5	Taylor hupson sutronic 3+yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	78
Şekil 6.1	Viskoziteyle – Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değişim diyagramı.....	79
Şekil 6.2	68 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı.....	81
Şekil 6.3	150 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı.	81
Şekil 6.4	320 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılım.	82
Şekil 6.5	680 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılım.	82

Şekil 6.6	İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali.....	82
Şekil 6.7	Aşınma oranı analizi için incelenecek sarı renkli işaretlenmiş görüntü bölgesi.....	83
Şekil 6.8	Aşınma oranı analizi için incelenecek gri-seviye görüntü.....	83
Şekil 6.9	Aşınma oranı analizi için incelenecek gri-seviye görüntünün çeşitli görüntü güçlendirme (Image Enhancement) metodları ile güçlendirilmiş hali.....	83
Şekil 6.10	[29-36] gri ton değeri arası tresholding (Eşikleme) işlemi uygulanmış gri-düzey görüntü.....	83
Şekil 6.11	[29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali.....	84
Şekil 6.12	İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması.....	84
Şekil 6.13	Aşınma oranının 9 eş bölgeye ayrılması.....	85
Şekil 6.14	İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali.....	85
Şekil 6.15	[29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali.....	86
Şekil 6.16	Aşınma oranının 9 eş bölgeye ayrılması.....	86
Şekil 6.17	İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali.....	87
Şekil 6.18	[29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali.....	87
Şekil 6.19	Aşınma oranının 8 eş bölgeye ayrılması.....	88
Şekil 6.20	İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali.....	88
Şekil 6.21	[29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali.....	88
Şekil 6.22	Aşınma oranının 11 eş bölgeye ayrılması.....	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Çalışma sırasında eksenler arası mesafe (mm)
a_0	Eksenler arası mesafe (mm)
a_k	Özgül hız (İzafi kayma hızı)
b	Diş genişliği(mm)
b_H	Hertz temas bandının yarı kalınlığı
B_m	Termal temas katsayısı
c	Özgül ısı (J/KgK)
C	Yuvarlanma Noktası
C_m	Birim kütle başına spesifik sıcaklık ($^{\circ}C$)
C_{ZL}	Yağlama sabiti
C_{ZV}	Hız sabiti
C_{ZR}	Pürüzlülük sabiti
d	Yuvarlanma dairesi çapı
d_1	Çalışma taksimat çapı (mm)
d_0	Taksimat dairesi çapı (mm)
d_b	Dişli başı dairesi çapı (mm)
d_g	Temel dairesi çapı (mm)
d_t	Diş dibi dairesi çapı (mm)

e	Kavrama uzunluğu (mm)
e_{1,2}	Kavramaya giriş-çıkış uzunlukları (mm)
E	Elastisite modülü (N / mm^2)
F_n	Normal kuvveti (N)
F_t	Normal kuvvetin teğetsel bileşeni (N)
F_r	Normal kuvvetin radyal bileşeni (N)
F_{bt}/b	Diş genişliğine bağlı çevresel kuvvet (N/mm)
K_A	DIN3990 Normuna göre yük faktörü
h₀	Yağ tabakası kalınlığı (μm)
h_{min}	Minimum yağ tabakası kalınlığı (μm)
h_{kr}	Kritik yağ tabakasının kalınlığı (μm)
i	Çevrim oranı
m	Modül (mm)
m_{1,2}	Malzeme faktörü
M_b	Burulma momenti (Nmm)
n	Devir sayısı (dev/dak)
P	Dişli çarkın ilettiği güç (kw)
P_H	Hertz basıncı (N / mm^2)
P_{vz}	Dişli çarktaki kayıp güç (kw)
P_R	Pürüzlülük parametresi
R	Temas Noktası yarı çapı (mm)
R_a	Yüzey pürüzlüğü aritmetik ortalama (μm)
rms	Yüzey pürüzlüğü karelerinin ortalamasının karekökü (μm)

R_t	Pürüz yüksekliği (μm)
R_{Top}	Birleşik yüzey pürüzlülüğü (μm)
R_{Z100}	Ortalaması alınmış relatif tepe çukur yüksekliği (μm)
R_{Z1}	Pinyon yüzey pürüzlülüğü (μm)
R_{Z2}	Çarkın yüzey pürüzlülüğü (μm)
S	Emniyet katsayısı
S_{Hmin}	Yüzey gerilmesi için DIN 3990 göre belirlenmiş güvenirlilik faktörü
t	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t_b	Blok sıcaklığı ($^{\circ}C$)
t_c	Ani temas sıcaklığı ($^{\circ}C$)
t_f	Kritik sıcaklık, flaş sıcaklık ($^{\circ}C$)
t_m	Diş kütle sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{cmax}	Maksimum temas sıcaklığı (K)
q	Yüzeyler arasında oluşan ısı (w)
G	Birimsiz malzeme faktörü
U	Birimsiz hız faktörü
V_{40}	40 $^{\circ}C$ deki nominal kinematik viskozite (mm ² /s)
V_{50}	50 $^{\circ}C$ deki nominal kinematik viskozite (mm ² /s)
w	Açısal hız (rad / s)
W	Birimsiz yük faktörü
v	Hız (m/s)
V_k	Kayma hızı (m/s)
V_t	Yuvarlanma hızı (m/s)

Z	Diş sayısı
Z_n	Yüzey gerilmesi için ömür faktörü
Z_w	Malzeme çifti faktörü
Z_x	Yüzey gerilmesi için büyüklük faktörü
Z_e	Bindirme faktörü
Z_H	Yüzey faktörü (Alın faktörü)
α_ϕ	Çalışma kavrama açısı
α_0	Kavrama açısı
α	Basınç – viskozite katsayısı (in^2 / lb)
η_{oil}	Yağın işletme sıcaklığındaki dinamik viskozitesi (MPa s)
η_o	Atmosferik basınçtaki çalışma viskozitesi (mm^2/s)
γ	Özgül ağırlık (kg / m^3)
ρ	Eğrilik yarı çapı (mm)
σ_{Hlim}	Yorulma dayanımı (N/mm^2)
ε	Kavrama oranı
μ	Sürtünme katsayısı
μ_m	Ortalama sürtünme katsayısı
X_R	Pürüzlülük katsayısı
ν	Poisson oranı
ζ	Dişli çarkın temas yüzeyinin uzunluğu (mm)

Özel Simgeler

A, B, C, D, E Kavrama boyutu üzerindeki özel noktalar

Kısaltmalar

AGMA American Gear Manufacturers Association

EHD Elasto-hidrodinamik

TAN Toplam asit sayısı

FZG Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau Technische
Hochschule München GERMANY

SSU Saybolt Universal Viskozite

PPm Particule per million

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte artan güç ihtiyacı, dişlilerin gittikçe daha büyük boyutlarda ve miktarlarda imal edilmesini gerektirmektedir. Teknolojik ekonomik sebepler ise boyutların küçük tutulması yönünde zorlayıcı olmaktadır. Bu noktada dişli çarklarda sürtünme ve aşınma kayıpları önemli bir problem olup ciddi şekilde maddi kayıplara sebep olmaktadır. Dişlilerin pek az kırıldığını, genellikle aşınarak eskidiklerini görmekteyiz, hatta bu aşınma son derece kısa bir zamanda meydana gelebilmektedir. Dişli çark kullanımındaki esas kısımlardan birini oluşturan yağlayıcı, genellikle çok zor durumlarda görev yapmaktadır. Günümüze kadar birçok araştırma yapılmasına rağmen yeterli bir açıklama geliştirilmemiş olan yağlayıcı viskozitelerinin aşınma türleri oluşumuna etkileri gözardı edilmeyecek kadar önemlidir.

Dişli yağlarının amacı; sistem elemanlarının korunması (aşınma, pas, vb.), enerji dağıtılması, gürültü ve vibrasyonun azaltılması ve ayrıca sürtünme sonucunda ortaya çıkan ısıyı dışarıya atmaktır. Kullanılan yağ aynı zamanda dişlere zarar vermemeli ve yeteri kadar uzun ömürlü olmalıdır.

Dişlilerden istenen performansı alabilmek için değişik viskoziteli mineral yağlar kullanarak, sistemin hız ve yükü sabit tutulup ve çevre şartlarını da dikkate alınmasıyla; deneyden önce ve sonra yüzey pürüzlülüğü ölçümü, yağ spektrometrik analizi, hassas teraziyle ölçümler yapıp, mikro filmler ve makro filmler vasıtasıyla görüntü işleme metoduyla yüzeylerde oluşan aşınma şekli ve yüzdeleri hesaplanmasıyla geniş kapsamlı bir çalışma planlanmıştır.

Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi araştırma fonu desteğiyle imal ettirilen kapalı devre güç dolaştıran dişli yorulma test düzeneği vasıtasıyla dökme demirden yapılmış düz dişli çarklarda değişik viskoziteli mineral yağlar kullanılarak aşınmaya olan etkileri incelenmiştir.

Aşınma Olayına Etki Eden Bazı Faktörler

Dişli çarklarda aşınma olayına etki eden faktörlerden bazıları şöyle sıralanabilir:

- Temas yüzeylerindeki kayma hızı
- Temas yüzeylerindeki hertz basıncı
- Yağ viskozitesi
- Yağ cinsi
- Yağlama şekli
- Yağın kimyasal etkisi
- Dişli çarkın geometrisi
- Dişli çarkın profil kaydırma durumu
- Dişli çarkın baş düzeltmeleri
- Yüzey pürüzlülüğü
- Dişli dişlerinin yüzey sertliği
- Yağ sıcaklığı
- Isı transferi

Bütün bu faktörlerin aşınma olayına etkileri üzerinde araştırmalar yapılmış ve yapılan bu çalışmalara dayanılarak aşınma olayı ile ilgili üç ana teori ortaya konulmuştur. Bunlar:

1. Elasto – hidrodinamik teorisi
2. Aşınma yükü teorisi
3. Sıcaklık teorisi

Yağ tabakası yöntemine dayanan elasto-hidrodinamik teorisine göre, dişler arası oluşan minimum yağ tabakası kalınlığı (h_o) kritik adını taşıyan belirli bir yağ tabakası kalınlığından (h_{kr}) daha küçük olduğu durumda yüzeyler (direkt) metal-metal temasa geçerler ve aşınma olayı meydana gelir. Yani bu teoriye göre aşınma olayı meydana gelmemesi için;

$$(h_o) > (h)_{kr} \text{ veya } (h_o) \geq Sh_{kr} \quad (1.1)$$

şartının yerine getirilmesi gereklidir. Burada S, emniyet katsayısıdır. Kritik yağ tabakası kalınlığı ise her iki yüzeyin, yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

Aşınma yükü teorisinde dişlilerin taşıdığı (F_n) veya (F_n / b)_{kr} aşınma yükü ile karşılaştırılmalıdır. Yani bu teoriye göre aşınma olayının meydana gelmemesi için :

$$F_n < (F_n)_{kr} \quad ; \quad F_n/b < (F_n/b)_{kr} \quad (1.2)$$

$$F_n < (F_n)_{kr}/S \quad ; \quad F_n/b < (F_n/b)_{kr}/S \quad (1.3)$$

olması gerekmektedir.

Sıcaklık teorisinde hesap ile tespit edilen bir (t) sıcaklığı deneyle tespit edilen bir kritik sıcaklık (t)_{kr} ile mukayese edilmektedir. Yani;

$$(t) < (t)_{kr} \quad (1.4)$$

olduğu durumda aşınma olayı meydana gelmemektedir. Üç çeşit sıcaklık teorisi mevcuttur. Bunlar temas sıcaklığı, ortalama sıcaklık ve integral sıcaklık teorileridir. Blok, (Errichello, 1990) aşınma olayını, ortaya koyduğu temas sıcaklığı teorisiyle açıklamıştır. Yaptığı çalışmalarda profil temas noktalarındaki lokal ve âni sıcaklıkları tespit ederek yağ-malzeme çiftine bağlı kritik sıcaklık değerleriyle mukayese etmiştir. Blok, katıksız mineral yağlarla yağlanan silindirik düz dişli ve helisel dişli çarklar üzerinde çalışmış ve kavrama esnasında en yüksek sıcaklığın dış tekil noktada meydana geldiğini göstermiştir. Bu metotta Blok'un ortaya koymuş olduğu âni temas sıcaklığı esas alınmış olup gerçekleştirilecek olan mekanizmanın hesaplanan ortalama profil sıcaklığı ile bir aşınma testinden aynı şekilde hesaplanan kritik ortalama profil sıcaklığı karşılaştırılmıştır.

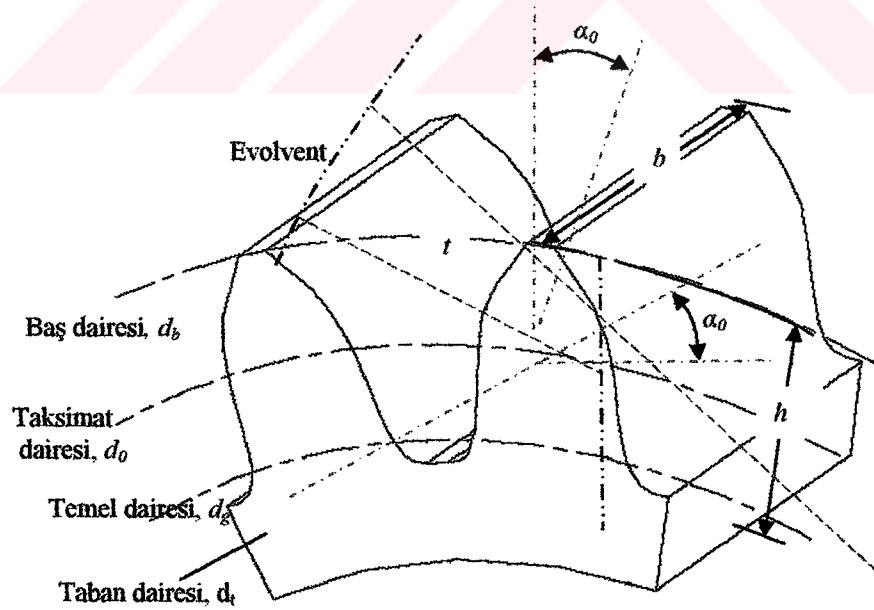
Teorik ve deneysel özellik taşıyan bu çalışmada esasen, dişli çarklarda meydana gelen aşınma olayı ile ilgili Elasto-hidrokinamik teorisindeki yağ viskozitesinin aşınmaya olan etkileri araştırılmıştır. Aynı zamanda aşınma olayını etkileyen diğer olaylarda incelenmiştir.

Silindir Düz Dişli Çark Mekanizmasının Temel Boyutları

Silindir Düz Dişli çarklar için ifade edilen temel kavramlar genel bir anlam taşımaktadır. Bu nedenle diğer dişli çarklar içinde geçerlidir ve elde edilen denklemler az bir değişiklik ile değişik tipteki dişli çarklara uygulanabilir.

Bir dişli çark mekanizması biri döndüren (pinyon) diğeri döndürülen (çark) olmak üzere en az iki dişli çarktan oluşur. Döndüren dişli çarka ait boyutlar ve faktörler 1 indisi ile, döndürülen dişli çarka ait boyutlar ve faktörler 2 indisi ile belirtilmiştir. İki dişli çarkın eş çalışabilmesi için, ikisinin birbirine uyumlu olarak yapılması, yani aynı referans profilini kavraması gerekir. Bu da evolvent dişli çarklarda her iki dişin aynı modüle sahip olması demektir.

Birbiriyle eş çalışan ve sabit oranda hız ileten profillere eş çalışan profiller ve dişli çarklara eş çalışan dişli çarklar denir. Sabit oranda hız iletmeye eş çalışma hareketi denir. Şekil 1.1’de dişli çark mekanizmasının temel boyutları ve kavramları açıklanmıştır.



Şekil 1.1 Evolvent dişli çarkın boyutları (Oktay, 1972).

Taksimat dairesi: Üzerinde dişlerin taksimatı yapılan ve esas dişli çarkın büyüklüğünü belirleyen dairedir. Bu daire üzerinde ölçülen ve bir dişli kalınlığı ile bir diş arası boşluğu kapsayan uzunluğa diş taksimatı (t) veya hatve denir. (z) ile dişli çarkın diş sayısı gösterilirse, taksimat dairesinin çapı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

$$d_o = \frac{t}{\pi} \times z \quad (1.5)$$

Buradan modül aşağıdaki ifadelerle bulunur.

$$m = \frac{t}{\pi} \text{ veya } d_o = mz \quad (1.6)$$

şeklinde yazılır.

Yuvarlanma daireleri, çalışma sırasında birbirleri üzerinde kaymadan yuvarlanan dairelerdir. Yuvarlanma dairesi, yalnız çalışma sırasında meydana gelen bir daire olması nedeniyle, dişli çarka değil, dişli çark mekanizmasına ait bir dairedir.

Yuvarlama dairesi ile taksimat dairesi arasında

$$d_g = d_o \cos \alpha_o = d \cos \alpha \text{ ve } d = d_o \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha} = mz \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha} \quad (1.7)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada α yuvarlanma dairesine karşılık gelen basınç açısıdır.

Diş profilinin eş çalıştığı profil ile temasta bulunduğu kısmının yüksekliğine h_c çalışma yüksekliği denir. Operasyon sırasında pinyonun diş başlarının, dişli çarkın diş tabanları ile eş çalıştığı göz önünde tutulursa;

$$h_c = h_b + h_b = 2m \quad (1.8)$$

olarak bulunur. Böylece diş yüksekliği ile çalışma yüksekliği arasındaki

$$S_B = h - h_c \quad (1.9)$$

farkı, diş başı boşluğunu meydana getirmektedir.

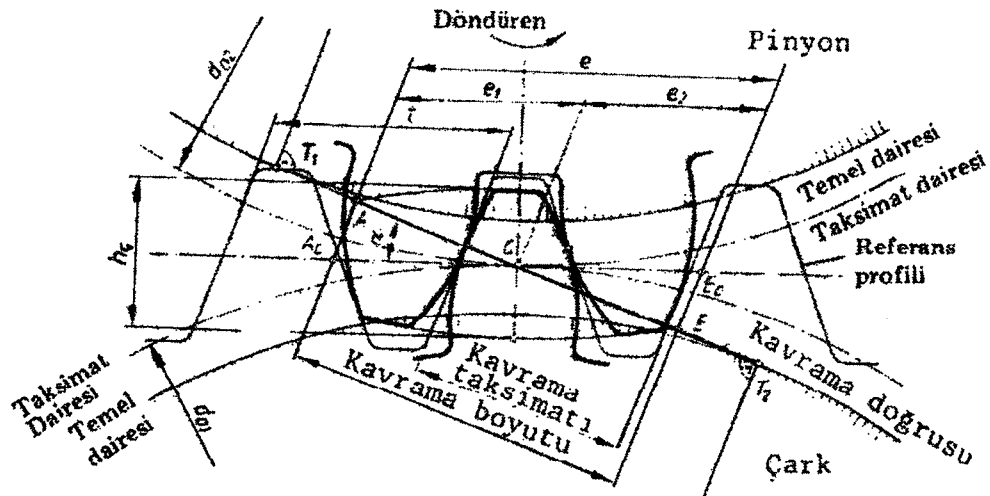
Eksenler arası mesafe; dişli çarkların merkezleri arasındaki uzaklıktan ibarettir, d_1 ile döndürülen dişli çarkın yuvarlanma dairesi ve d_2 ile döndürülen dişli çarkın yuvarlanma dairesi gösterilirse, eksenler arası mesafe;

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1.10)$$

olur.

Kavrama faktörleri ve dişli çark mekanizmalarının çeşitleri;

Eş çalışan profillerin kavraması, pinyonun diş yüzeyinin A noktası, çarka ait dişin en baş noktası ile temasa seçtiği anda başlar ve pinyonun diş başının E noktası çarka ait diş tabanını terk ettiğinde sona erer. Böylece eş çalışan profillerin temas yerleri, kavrama eğrisi denilen bir eğri meydana getirirler. Evolvent dişli çarklarda bu eğri bir doğru olarak ortaya çıkar ve kavrama doğrusu adını alır. Bu doğru, evolventi meydana getiren ana doğrunun aynı zamanda kendisi olduğundan her iki çarkın temel dairelerine teğettir (Şekil 1.2'deki T_1 ve T_2 noktaları).



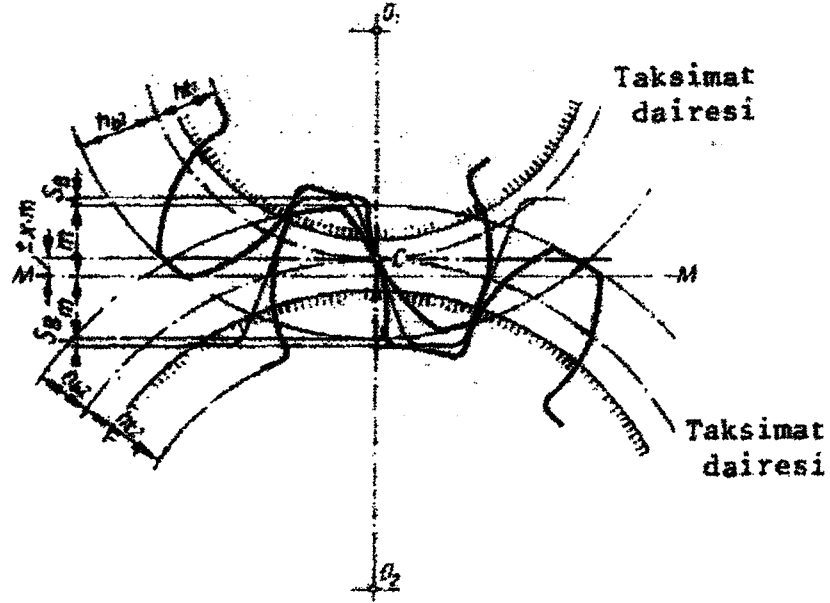
Şekil 1.2 Kavrama faktörleri ve mekanizmanın temel boyutları (Rao, 1990.)

Kavrama doğrusunun her iki baş dairesi arasında kalan ve asıl kullanılan AE uzunluğuna kavrama boyu adı verilir. Merkezler doğrusu ile yuvarlanma dairelerinin ortak teğetinin kesiştiği C noktasına yuvarlanma noktası denir. Kavrama boyutunun AC kısmına giriş, CE kısmına çıkış kısmı ve bu kısımlara karşılık gelen açılara giriş çıkış açıları denir.

Geometrik olarak kavramanın başlangıcını gösteren A noktası, çarka ait baş dairesinin kavrama doğrusu ile kesiştiği noktadır. Kavramanın sona erdiğini belirten E noktası ise, pinyonun (Şekil 1.2) baş dairesinin kavrama doğrusu ile kesiştiği noktadır.

Kavrama doğrusu ile yuvarlanma dairelerinin ortak teğeti arasındaki α açısına kavrama açısı denir (Şekil 1.2). Kavrama açısı, evolvent profilinin yuvarlanma dairelerine karşılık gelen basınç açısına eşittir. Referans profilinin MM orta doğrusu dişli çarkın taksimat dairesine teğet olabilir veya olmayabilir. Referans, profilin orta doğrusu dişli çarkın taksimat dairesine teğet olduğu durumda (Şekil 1.2), kavrama açısı referans profilinin yan yüzeylerinin α_o açısı eşittir. Bu durum sıfır veya standart yani, $h_b = m$ ve $h_t = 1,25 m$ değerlerine sahip olan bir dişli için geçerlidir. Referans profilinin MM orta doğrusu, mekanizmayı oluşturan her iki dişli çarkın taksimat derecelerine teğet olduğu durumda, dişli çarkların yuvarlanma daireleri, taksimat daireleri ile çakışacaktır. Yani kavrama sırasında dişli çarkların birbiri üzerinde yuvarlanması taksimat daireleri üzerinde gerçekleşecektir. Bu durumda sıfır veya standart dişli çark mekanizması elde edilir (Şekil 1.2).

Referans profilinin MM orta doğrusunun mekanizmayı oluşturan her iki dişli çarkın taksimat dairelerine teğet olmadığı durum, profilleri kaydırılmış dişli çarklar için geçerlidir (Şekil 1.3). MM orta doğrusu, taksimat dairesinin dışında (Şekil 1.3 de O_1 dişlisinde olduğu gibi) veya iç kısmında (Şekil 1.3 de O_2 dişlisinde olduğu gibi) bulunabilir. Birinci durum, profil pozitif (+) kaydırılmış, ikincisi ise profili negatif (-) kaydırılmış dişli çarklar için geçerlidir.



Şekil 1.3 Profil kaydırmanın izahı ve ortaya çıkan mekanizma tipleri (Rao, 1990.)

Mekanizmanın kavrama açısına gelince, burada iki durum ortaya çıkabilir: Birinci durumda, mekanizmayı oluşturan dişli çarkların birisi pozitif (+) diğeri negatif (-) dişli olmakla beraber, her iki dişlinin profil kaydırma faktörlerinin mutlak değerleri eşittir, yani

$$|x_1| = |x_2| \text{ veya } x_1 + x_2 = 0 \quad (1.11)$$

dır.

Bu durumda mekanizmanın kavrama açısı referans profilinin α_0 açısı ile eşittir; aynı zamanda dişli çarkların yuvarlanma daireleri, taksimat daireleri ile çakışmaktadır (Şekil 1.3). Bu mekanizmaya sıfır kaydırmalı (K-0) mekanizma denir.

İkinci durumda, mekanizmayı oluşturan dişli çarkların birisi sıfır diğeri artı veya eksi kaydırmalı veya her ikisi de kaydırmalı olup, profil kaydırma faktörlerinin değerleri farklıdır, yani;

$$x_1 \neq x_2 \text{ veya } x_1 + x_2 \neq 0 \quad (1.12)$$

Bu durumda mekanizmanın α kavrama açısı, referans profilinin α_0 açısından ve dişli çarkların taksimat daireleri, yuvarlanma dairelerinden farklı, yani

$$\alpha \neq \alpha_0 \quad d_0 \neq d_1 \quad d_{02} \neq d_2 \quad (1.13)$$

Bu mekanizmaya kaydırmalı (K) mekanizma denir.

Kavrama oranı, aşağıda verilen;

$$\epsilon = \frac{\text{Kavrama Uzunluğu}}{\text{Taksimat}} = \frac{e}{t} \quad (1.14)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Dişli çarklarda hareketin sürekli olması için

$$\epsilon \geq 1 \quad (1.15)$$

olmalıdır, yani eş çalışan bir diş kavramadan çıkmadan önce takip eden dişin kavramaya girmesi gerekir. Kavrama oranı ne kadar büyük olursa, dişli çark o derece sessiz (darbesiz) çalışır (Akkurt, 1990).

Dişli Çarklara Etkiyen Kuvvetler ve Yüzey Yorulmasının Oluşum Mekanizması ;

Kavrama sırasında diş üzerine gelen diş kuvveti veya normal kuvvet adını taşıyan kuvvet (F_n) kavrama doğrultusu boyunca etkimektedir. Dişliyi döndüren (F_u) kuvveti Şekil 1.4'de görüldüğü gibi dişli yüzeyine dik bir (F_n) kuvveti ve dişliye radyal etki eden bir (F_r) kuvveti meydana getirir.

Eş çalışan dişlilerin temas yerinin taksimat dairesi üzerinde bulunduğu durumda bu kuvvetin teğetsel bileşenleri;

$$F_u = F_n \cdot \cos \alpha_0 \quad (1.16)$$

$$F_r = F_n \cdot \sin \alpha_0 \quad (1.17)$$

$$F_r = F_u \cdot \tan \alpha_0 \quad (1.18)$$

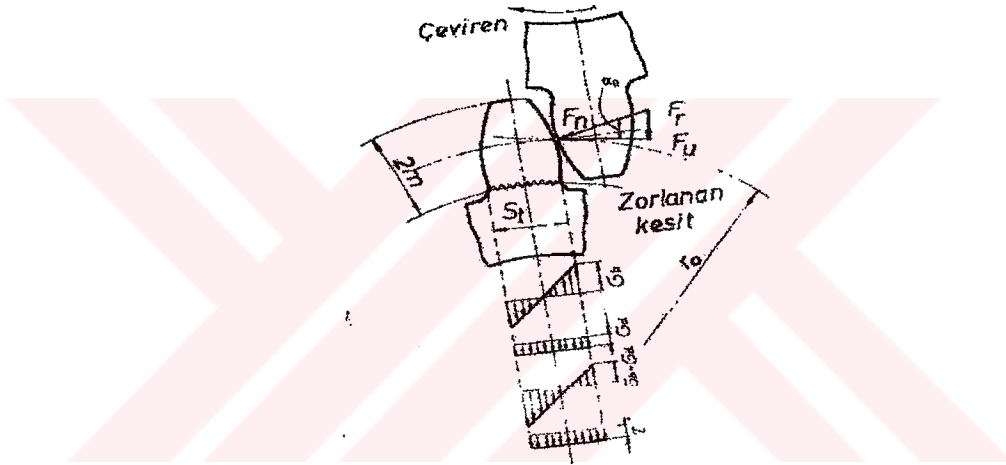
Diğer taraftan, iletilen burulma momenti dişliyi çeviren çevresel kuvvet şu formülle hesaplanır. M_t göz önüne alınırsa teğetsel kuvvet şeklinde ifade edilir (Oktay, 1972).

$$F_u = \frac{M_t}{r_o} = \frac{2M_t}{d_o} \quad (1.19)$$

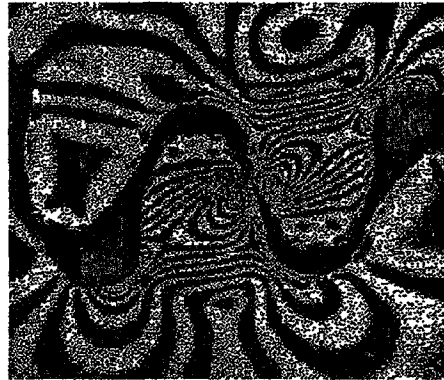
d_{o1} = Bölüm dairesi çapı

M_t = Çevirme momenti

α_o =Kavrama açısı

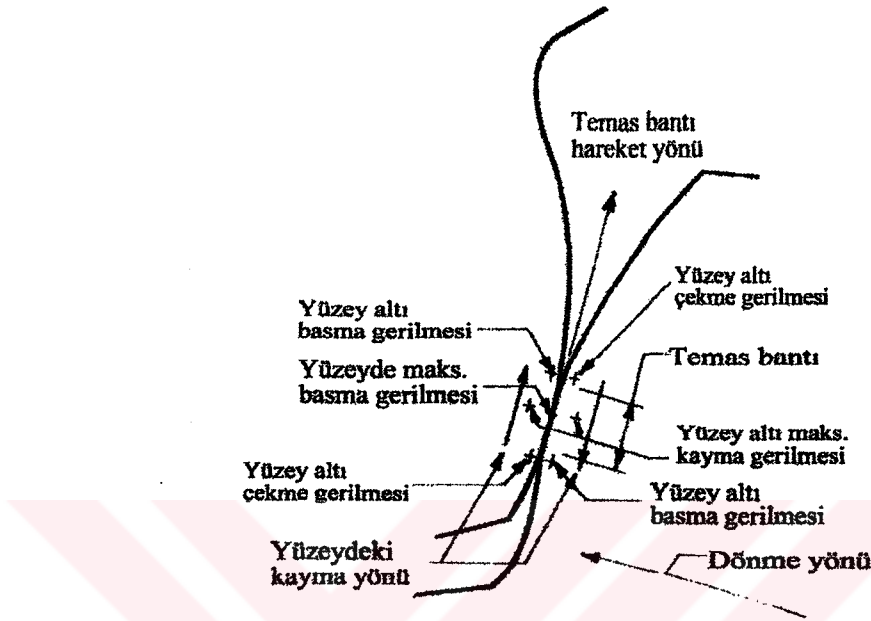


Şekil 1.4 Dişli çarklara etki eden kuvvetlerden ötürü dişlilerde meydana gelen eğilme, basma ve kayma gerilmeleri oluşumu (Oktay, 1972.)



Şekil 1.5 Polariskopla çekilmiş dişlilerdeki zorlamanın kavrama doğrusu yönünde olduğu görülür (Oktay, 1972.)

Dişlerin gerçekten (F_n) kuvvetiyle yani kavrama doğrusu yönünde zorlandıklarını polariskopla çekilmiş (Şekil 1.5)'de detaylı olarak görülebilir.



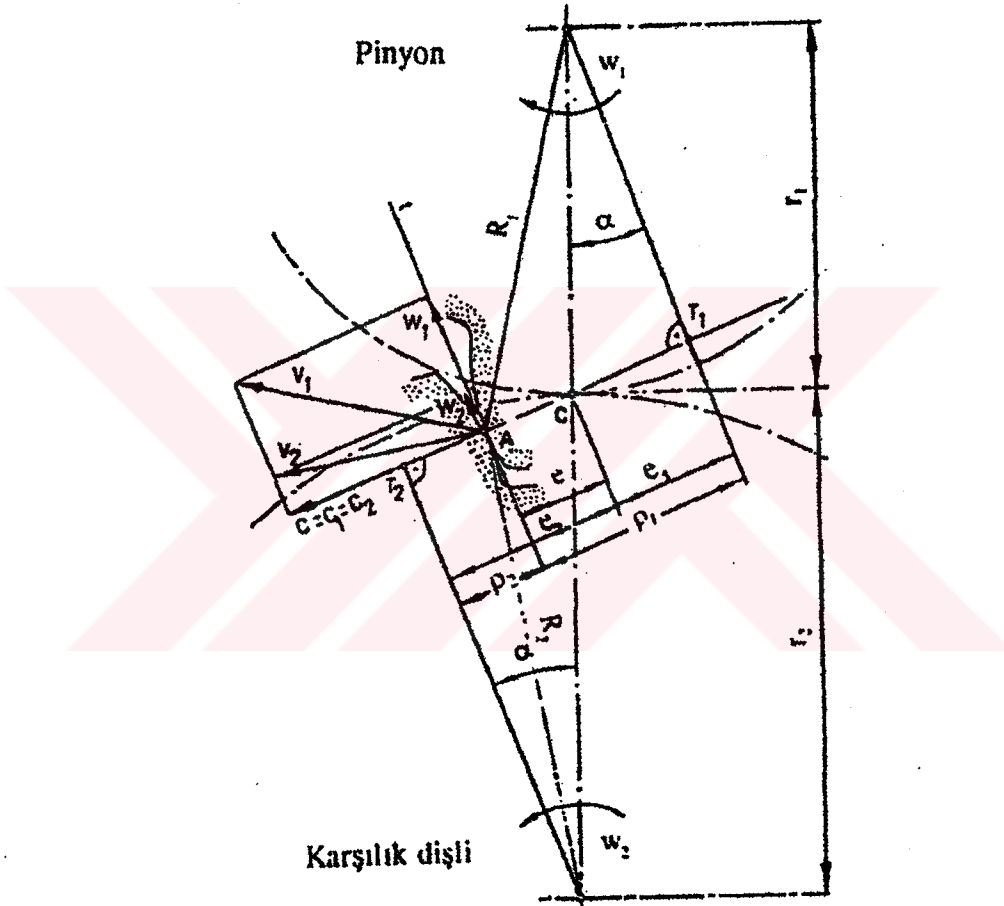
Şekil 1.6 Eş çalışan diş yüzeylerinde oluşan gerilmelerin değişimi (Wilfried, 1993.)

Diş profilinin büyük kısmı üzerinde, bazen tüm profil boyunca yuvarlanmaya eşlik eden kayma olayı, kayma temasından önce ve sonra ortaya çıkan basma gerilmeleri şeklinde ilave gerilmelere sebep olur. Şekil 1.6 da bu gerilmeler ve bunlara etki eden faktörler gösterilmiştir.

Bir başka gerilme etkeni de, başlangıçta temas alanına öncülük eden ve daha sonra temas alanını takip eden elastik dalgadır. Bu dalga, yüzeylerin kendilerine bitişik basınç altındaki bölgeden etkilenerek kabarmasına sebep olur. Söz konusu kabarmalar yüzeyi, temas alanı yüzey üzerine ilerledikçe yönü aksi istikamete değişen tekrarlı eğilme gerilmelerine maruz bırakılır. Yüzey malzemesine etkileyen tüm bu faktörlerin göreceli etkileri dişli tasarımına (geometrisine), yağlama rejimine, devir sayısına, yüke, yüzey pürüzlülük durumuna ve diğer parametrelere göre farklılık gösterirler.

Diş Profilleri Arasındaki İzafi Hareket ;

Şekil 1.7'de görüldüğü gibi eş çalışan iki evolvent profilin, kavrama doğrusu üzerinde A gibi herhangi bir noktada temas halinde olduğu düşünülürse, şekildeki T_1T_2 noktaları kavrama doğrusunun dişlilere ait temel dairelerine teğet olduğu noktalardır.



Şekil .1.7 Eş çalışan dişlilerin kinematik durumu (Oktay, 1972.)

Döndüren dişlinin açısal hızı w_1 ve döndürülen dişlinin açısal hızı w_2 olduğu takdirde 1 ve 2 dişlisine ait profilin temas noktalarındaki çevre hızları sırayla;

$$V_1 = R_1 \cdot \omega_1 \quad (1.20)$$

$$V_2 = R_2 \cdot \omega_2 \quad (1.21)$$

olur. Her iki hızın doğrultuları temas noktasındaki R_1 ve R_2 yarıçaplarının doğrultularına diktir. Profillere ait çevre hızları T_1T_2 kavrama doğrusu ile buna dik ve profillere teğet olan t doğrusu yönünde olmak üzere bileşenlere ayrılırsa V_1 için W_1 ve C_1 aynı zamanda V_2 için W_2 ve C_2 bileşenleri elde edilir. Dişli ana kanununa göre profillerin kavrama doğrusu yönündeki hız bileşenlerine göre $C_1 = C_2$ olmalıdır.

Şekil 1.7'den anlaşılacağı gibi, profillere teğet olan t doğrusu yönündeki hızların W_1 ve W_2 bileşenleri birbirine eşit değildir. Bu sebeple her iki profil teğet doğrultuda birbirini üzerinden kayar. Ancak C yuvarlanma noktasında kayma yoktur. Bu noktada;

$$V_1 = V_2 \quad \text{veya} \quad \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \quad (1.22)$$

dır.

Profillerin temas noktalarının ani dönme merkezleri olan T_1 ve T_2 noktalarına göre;

$$W_1 = \omega_1 \rho_1 \quad \text{ve} \quad W_2 = \omega_2 \rho_2 \quad (1.23)$$

şeklinde ifade edilebilir. Çünkü profiller arasında meydana gelen kayma hızları, 1. profile göre;

$$V_{k1} = W_1 - W_2 = \rho_1 \omega_1 - \rho_2 \omega_2 \quad (1.24)$$

ve 2. profile göre;

$$V_{k2} = W_2 - W_1 = \rho_2 \omega_2 - \rho_1 \omega_1 \quad (1.25)$$

şeklinde yazılır. $\overline{CA} = e$, $\overline{CT_1} = r_1 \sin \alpha$, $\overline{CT_2} = r_2 \sin \alpha$ değerleri ile;

$$\rho_1 = \overline{CT_1} + \overline{CA} = r_1 \sin \alpha \pm e$$

$$\rho_2 = \overline{CT_2} + \overline{CA} = r_2 \sin \alpha \pm e \quad \text{değerleri ile;}$$

$$W_1 = \omega_1 (r_1 \sin \alpha \pm e) = V_1 (\sin \alpha \pm e/r_1) \quad (1.26)$$

$$W_2 = \omega_2 (r_2 \sin \alpha \pm e) = V_2 (\sin \alpha \pm e/r_2) \quad (1.27)$$

olarak bulunur. Bu ifadelerdeki + ve - işaretleri kavrama doğrusunun giriş kısmı (1. dişlinin taban kısmı, 2. dişlinin baş kısmı) ile kavrama doğrusunun çıkış kısmı

(1. dişlinin baş kısmı, 2. dişlinin taban kısmı) için geçerlidir. (+) işareti baş (1. veya 2. dişli), (-) işareti taban (1. veya 2. dişli) içindir.

Teğetsel hızlara bağlı olarak toplam hız;

$$\begin{aligned} V_{top} &= W_1 + W_2 = (\omega_1 r_1 + \omega_2 r_2) \sin \alpha \pm e (\omega_1 \pm \omega_2) = 2 \omega_1 r_1 \sin \alpha \pm e (\omega_1 \pm \omega_2) \\ &= V [2 \sin \alpha \pm e(1/r_1 \pm 1/r_2)] \end{aligned} \quad (1.28)$$

ρ_1 ve ρ_2 değerleri (1.24) denkleminde yerine yazılırsa kayma hızları;

$$\begin{aligned} V_{k1} &= (r_1 \sin \alpha + e) \omega_1 - (r_2 \sin \alpha - e) \omega_2 = \\ &= e (\omega_1 + \omega_2) \pm (r_1 \omega_1 - r_2 \omega_2) \sin \alpha = \pm V \cdot e (1/r_1 + 1/r_2) \end{aligned} \quad (1.29)$$

veya $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$ olduğundan;

$$V_{k1} = e (\omega_1 + \omega_2) \quad (1.30)$$

bulunur. Aynı işlem (1.25) denklemine uygulanırsa;

$$V_{k2} = -e (\omega_1 + \omega_2) \quad (1.31)$$

ifadesi elde edilir.

Bu denklemlere göre kavrama boyu üzerindeki kayma hızlarının yayılışı şekil 1.8.'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum kayma hızları A ve E noktalarında olup, C noktasında $e = 0$ olduğundan $V_{k1} = V_{k2} = 0$ dır. Bununla beraber C noktasında kayma hareketi yön değiştirir.

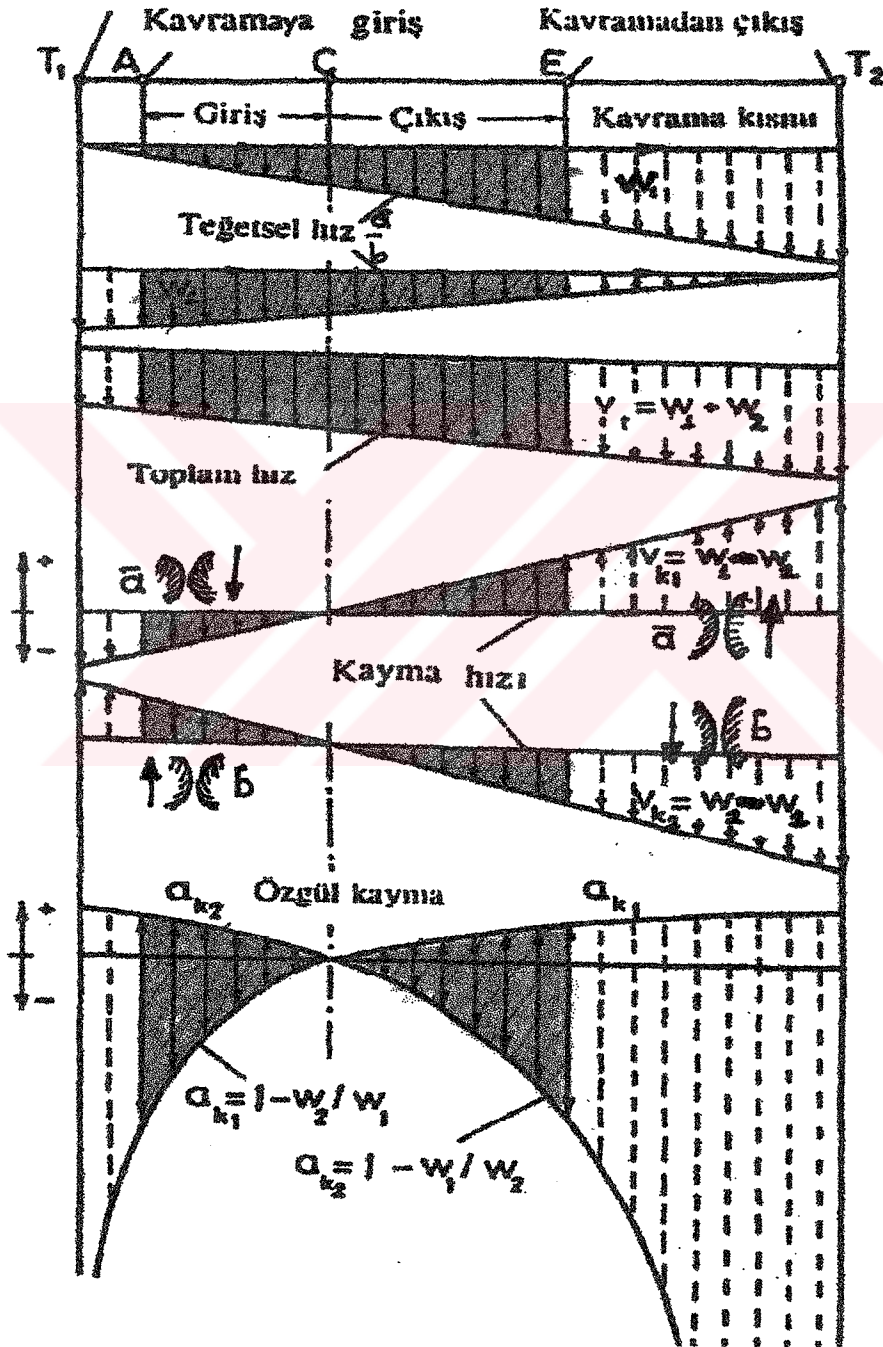
Bilindiği gibi profillerde meydana gelen kayma hareketi adezyon aşınmasına yol açar. Bunun profiller üzerine etkisini daha iyi bir şekilde ifade etmek için zgl kayma hızı denilen bir hız tanımlanmıştır.

$$a_{k1} = \frac{V_{k1}}{W_1} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \frac{\pm e(\omega_1 + \omega_2)}{\rho_1 \omega_1} = \frac{\pm e(\omega_1 + \omega_2)}{(r_1 \sin \alpha \pm e) \omega_2} = 1 - \frac{\sin \alpha \pm e/r_2}{\sin \alpha \pm e/r_1} \quad (1.32)$$

$$a_{k2} = \frac{V_{k2}}{W_2} = \frac{W_2 - W_1}{W_2} = \frac{\pm e(\omega_1 + \omega_2)}{\rho_2 \omega_2} = \frac{\pm e(\omega_1 + \omega_2)}{(r_1 \sin \alpha \pm e) \omega_2} = 1 - \frac{\sin \alpha \pm e/r_1}{\sin \alpha \pm e/r_2} \quad (1.33)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu hızlar Temas yörüngelerinin diğer noktalarında aynı zamanda farklı oranlarda yuvarlanmalar ve kaymalar mevcuttur. Bu durum Şekil 1.8' de gösterilmektedir.

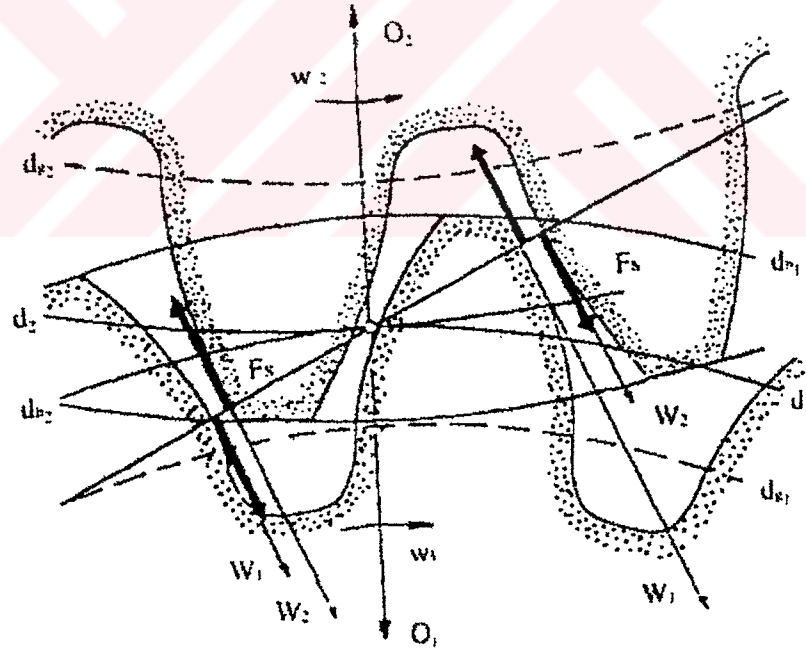


Şekil 1.8 Diş yüzeyinin temas noktalarındaki hızlarının kavrama doğrusu üzerindeki yayılımı (Hoehn, Michaelis, Doleschel, 2001.)

Kavrama hareketine devam ettikçe her iki çift üzerindeki temas noktaları birleşme bölgesinin dışına doğru hareket eder. Yuvarlanma hızı V_k pinyon ve dişlinin her temas noktasındaki yüzey hızlarının toplamı olarak tanımlanır ve giriş hızının iki katına eşittir. Yuvarlanma hızı yağlama filmi oluşumunu kontrol eden parametredir. İki yüzey hızının farkı olan kayma hızı V_k yerel kayma kuvvetlerinden, güç kaybından ve flaş sıcaklığından sorumludur.

Şekil 1.8'de görüldüğü gibi kayma hızları ve izafi kayma hızları C yuvarlanma noktasında sıfır olup, kavramaya giriş (A) ve çıkış (E) noktalarına, yani diş başı ve diş dibine doğru büyümektedir; C noktasında $V_1 = V_2$ veya $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$ dir.

Şekil 1.9'da ise kayma hızlarının profil üzerindeki yönleri gösterilmiştir. Bir profil için bu hızlar C yuvarlanma noktasında yön değiştirmektedir. Bu durum daha açık bir şekilde Şekil 1.9'de gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Profiller arası teğetsel hızlar, sürtünme kuvveti ve özgül kayma hızı (Akkurt, 1990)

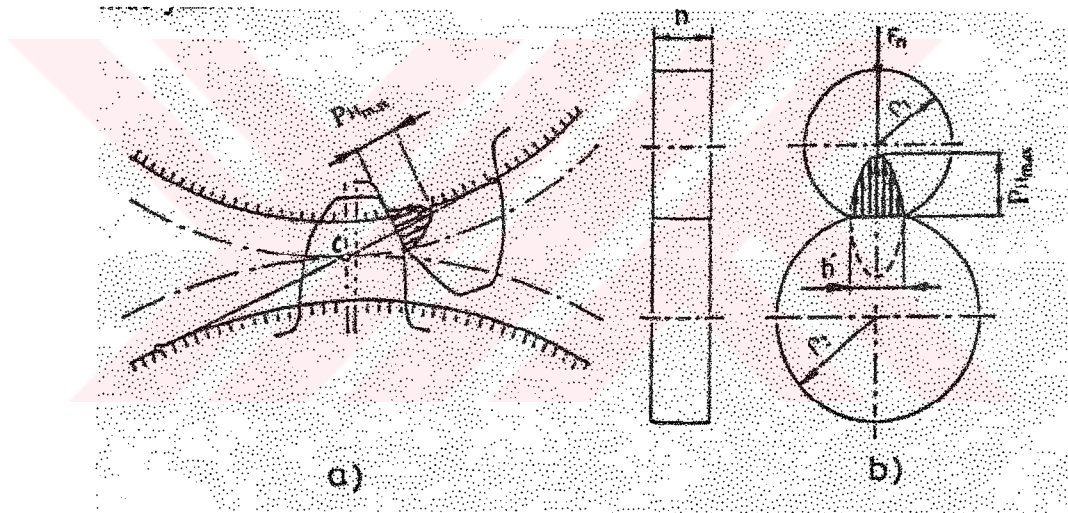
Hızlar diş dibine doğru diş başına göre daha çok büyümektedir. İzafi kayma hızları T_1 ve T_2 noktalarında sonsuz olmaktadır.

Diş profilleri arasındaki yüzey basıncı

Eş çalışan profillerin temas noktalarında şekil 1.10a'da gösterildiği gibi Hertz tipi yüzey basıncı meydana gelmektedir. Şekil 1.10b'de gösterildiği gibi temasta bulunan iki silindir ele alınırsa bu silindirlerin temas yüzeyinde F_n normal diş kuvvetinin etkisi altında oluşan yüzey basıncı;

$$p_H = \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho}} \quad (1.34)$$

şeklinde yazılır (Akkurt, 1997).



Şekil 1.10 Dişli çarklarda Hertz yüzey basıncı (Akkurt, 1997)

Burada E eşdeğer elastisite modülü;

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right] \quad (1.35)$$

ve eşdeğer eğrilik yarıçapı ρ ;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}; \text{ veya } \rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 \pm \rho_2} \quad (1.36)$$

olarak ifade edilir. (1.36) bağıntısındaki artı işareti dış temas eksi işareti iç temas için geçerlidir. Çelik-çelik için ($v_1=v_2=0,3$) olduğundan (1.34) bağıntısı;

$$p_H = 0,418 \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{b \cdot \rho}} \quad (1.37)$$

şeklinde yazılır (Akkurt, 1997).

(1.37) bağıntısının dişli çarklara uygulanması için, temas noktasının ρ_1, ρ_2 eğrilik yarı çaplarının tayin edilmesi gerekir. Şekil 1.11a yardımıyla C yuvarlanma noktası için;

$$\rho_{1c} = (d_1/2) \sin \alpha \quad (1.38)$$

$$\rho_{2c} = (d_2/2) \sin \alpha = i_{12} \cdot \rho_{1c} \quad (1.39)$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{i_{12} + 1}{i_{12}} \cdot \frac{2}{d_1} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha_o} \quad (1.40)$$

Başka bir nokta içinde aynı yolla işlem yapılır. Örneğin Şekil 1.11a'dan B noktası için;

$$l_{1B} = (d_{g1}/2) \tan \alpha_{B1}$$

$$l_{2B} = (d_{g2}/2) \tan \alpha_{B2}$$

$$\tan \alpha_{1B} = 2\overline{T_1B}/d_1 = [(d_{b1}^2 - d_{g1}^2)^{1/2} - 2 \cdot P_e]/d_1 \quad (1.41)$$

$$\tan \alpha_{2B} = \tan \alpha (i_{12} + 1)/i_{12} - \tan \alpha_{B1}/i_{12} \quad (1.42)$$

bağıntıları yazılabilir. Diğer taraftan;

$$\rho_{1B} + \rho_{2B} = \rho_{1C} + \rho_{2C}$$

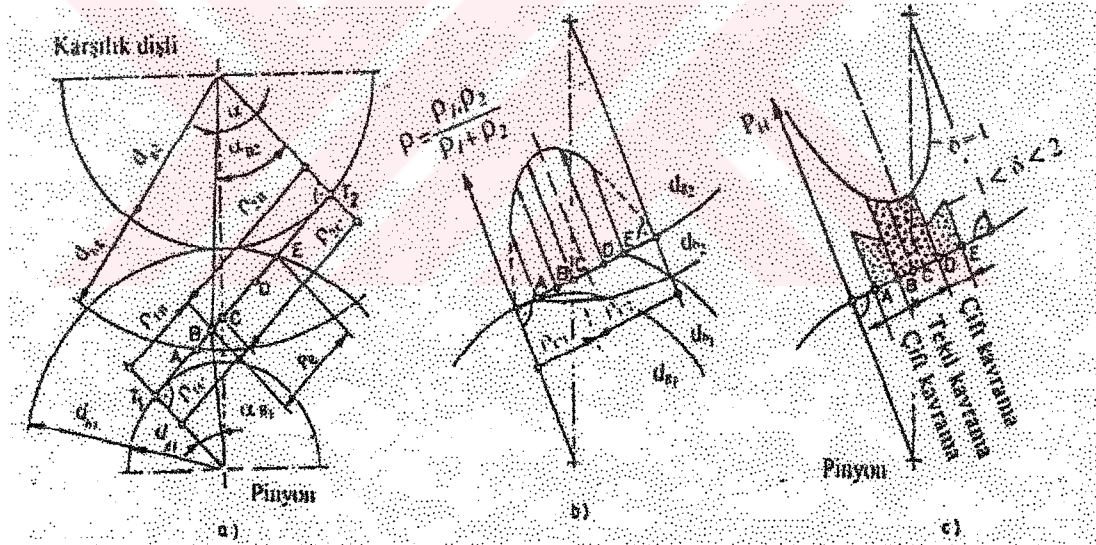
eşitliği dikkate alınırsa;

$$\rho_B = \frac{\rho_{1B} \cdot \rho_{2B}}{\rho_{1B} + \rho_{2B}} = \frac{\rho_{1B} \cdot \rho_{2B}}{\rho_{1C} + \rho_{2C}} \cdot \frac{\rho_{1C} \cdot \rho_{2C}}{\rho_{1C} + \rho_{2C}} = \rho_C \frac{\rho_{1B} \cdot \rho_{2B}}{\rho_{1C} \cdot \rho_{2C}} = \rho_C \frac{1}{K_B^2} \quad (1.43)$$

bulunur. Bu ifadede

$$K_B = \tan \alpha / (\tan \alpha_{B1} \cdot \tan \alpha_{B2})^{1/2} \quad (1.44)$$

dir.

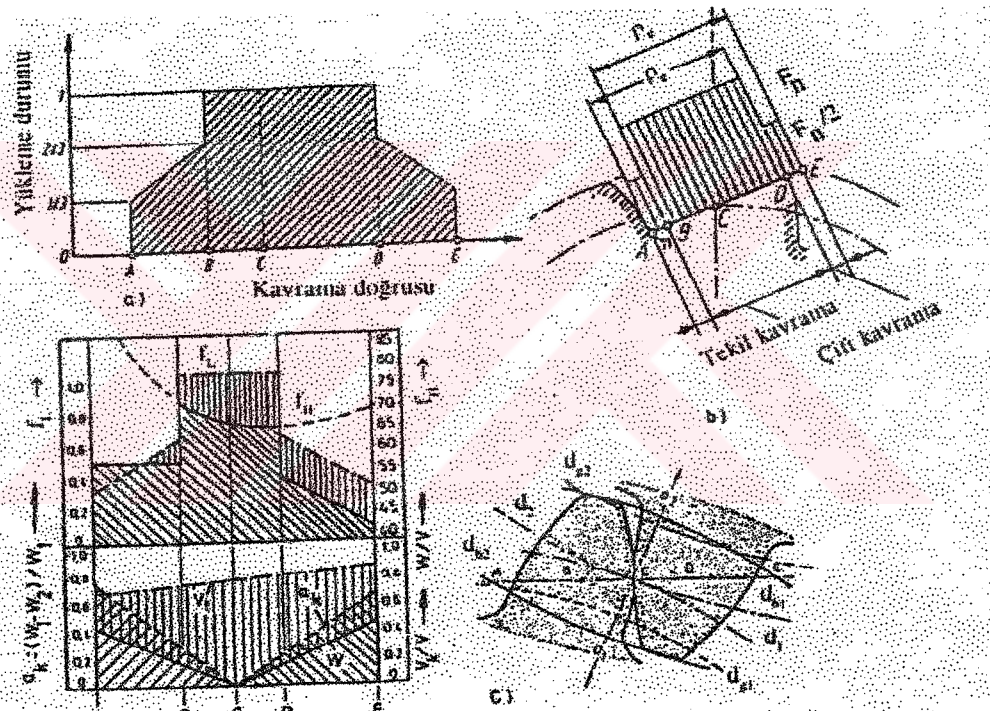


Şekil.1.11 Temas değişimi boyunca eğrilik yarı çapı ve hertz gerilmelerinin değişimi.
a) Tekli B noktasında eğrilik yarıçapları, b) Eşdeğer eğrilik yarıçapı, c) Hertz basıncı (Hoehn, Michaelis, Doleschel, 2001.)

(1.40), (1.41) bağıntılarının incelenmesinden $K_B > 1$ olduğu sonucuna varılır. Buna göre Şekil 1.11b'den de görüldüğü gibi eşdeğer eğrilik yarıçapının maksimum değeri C noktasına çok yakın olan kavrama doğrusunun yarısında ve minimum değerleri kavramaya giriş (A) ve çıkış (E) noktalarındadır. Buna bağlı olarak $\delta=1$ için yüzey basıncının minimum değeri C noktasına yakın olan kavrama doğrusunun ortasında ve

minimum değerleri A ve E noktalarındadır (Şekil 1.11c). Yerel eğrilik yarı çapıyla birlikte temas yüzeyi boyunca Hertz gerilmelerinin dağılımı belirlene bilinir.

Dişli çarklarda kavrama oranı genellikle $\varepsilon > 1$ olduğundan dişlere gelen yük, kavramaya girişte ve çıkışta başka dişlerde kavrama durumunda oldukları için tam yük değil de, kısmi yük şeklinde olacaktır (Şekil 1.12a). Bu durumda yük, tekil yükleme noktaları olarak bilinen B ve D noktaları arasında tam yük olacaktır. Buna bağlı olarak, yüzeydeki basıncın kavrama doğrusu boyunca dişlere dağılışı Şekil 1.12a'da tarama çizgileriyle gösterildiği gibidir.



Şekil 1.12 a.b. Profil üzerinde yükleme durumu c. A tipi profile ait kinematik ve yüzey basınç değerleri (Castr, Seabra, 1997).

Bu dağılım dişlilerin tam rijit olmaları durumunda geçerlidir. Pratikte dişliler tam rijit olmayacağından ve dolayısıyla yük altında şekil değiştirmelerinden dolayı, basınç dağılımı Şekil 1.12b'de gösterildiği gibidir. Ayrıca bu olay profil kaydırma faktörü ve diş başı düzeltmeleri tarafından etkilenir.

Eşdeğer eğrilik yarıçapının etkisi f_H yükün değişimi f_L faktörü ile dikkate alınır, çelik dişliler için E sabit olduğu düşünülürse ($E=2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$) (1.37) bağıntısı;

$$p_H = f_H \sqrt{\frac{F_t \cdot f_L}{b}} \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilebilir (Akkurt, 1997; Castr, Seabra, Part 2, 1997).



Dişli çarklarda yağlayıcının aşınma oluşumu üzerine yapılmış çalışmalar;

R, Errichello, 1990: Bu çalışma dişli yağlama prensiplerini dört bölümde anlatan dört bölümlük bir makaledir. Yani dişli trbolojisi alanındaki şu anlık bilgileri hatırlatma ve dişli dizayncılarına hemde dişli operatörlerine yönelik bir çalışmadır.

Bölüm bir; Dişli diş bozukluklarını beş ayrı moda sınıflandırıp dişli dizayncıları ve operatörlerin dişli bozukluklarını önlemede düşünmesi gereken faktörleri açıklamaya çalışmıştır.

Bölüm iki; Yağlamada etkilenen dişli diş bozukluklarının geniş bir araştırılması yapıp ve aynı zamanda dişli diş bozukluklarının önlenmesi için metotlar geliştirmeye çalışılmıştır.

Bölüm üç; Dişlinin sınırda yağlanması, elasto-hidrokinamik veya tam film yağlama rejiminde çalıştığını gösteren yağ film kalınlığını hesaplamak için analitik hesaplama yöntemi verip aynı zamanda scuffing riskinin tahmini için kullanılan blok ve flaş sıcaklığı içinde bir eşitlik vermektedir.

Bölüm dört; Yağ tipi, viskozite ve uygulama metodu için öneriler vermektedir. Sonuç olarak dişli yağlama prensiplerinin bir çoğunu gösteren bir durum tarihçesi verilmiştir.

Brechat ,P.cardis , A.B.murphy W.R.Theissen,J., 2000: Hem mineral hem' de sentetik bazlı yağlar için geliştirilmiş yeni nesil endüstriyel dişli yağlarının performans özellikleri incelenmiş. Ayrıca yeni teknolojiyle, geleneksel teknolojilerin bütün performans özelliklerini mukayese ederek. Dişlilerin micropitting olayını incelemişlerdir.

J. Castro , J. Seabra., 1997: Gerçekleştirdikleri çalışmada temel yağ viskozitesinin ve adım doğrusu hızının düz dişlilerde ovalama kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Üç değişik mineral yağ için yapılmıştır. Bu testlerde çalışma parametrelerinin analitik değerlendirilmesiyle tamamlanmıştır. Yani yağ film kalınlığı, dişlilerdeki temas yüzeyi sıcaklığı değişik viskoziteli yağlar için her yük durumu düşünülerek FZG A/8.6/90 testlerinde incelenmiştir.

J. Castro , J. Seabra II., 1998; FZG dişlilerinde scuffing ve film tabaka yırtılması üç değişik mineral yağ için yapılmıştır. Yağlayıcı ve sıcaklığa bağlı olarak sabit sıcaklıktaki scuffing testleri, scuffing yükü ve yağlayıcı film tabaka kalınlığı arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Arrisek, A. (Petrol D.D.) Vizuntin, J., 2001; FZG dişli düzeneği kullanarak rapeseed-bazlı yağların pittinge karşı direnci araştırılmış. Elde edilen sonuçları bu yağa karşılık gelen mineral bazlı yağlarla mukayese edip. Önerilen proje kapsamında yapılması planlanan çalışmalarda düz dişli çarklarda pitting olayı detaylı bir şekilde araştırılmış. Yüzey pürüzlülüğü derinliğinin ve yağlayıcı yağın viskozitesinin pitting üzerine etkileri incelenmiştir.

O. Yazıcıoğlu, 1989; Dişli kutularındaki dişli çarkların yağlanması açıkta çalışan dişli çarklarındakinden farklı özellikler göstermektedir. Yağın oksidasyon direnci yanında dişli çarkın tipi, hızı, yüzey kalitesi gibi bazı etkenler tasarımda önemli olmaktadır. Bu makalede dişli kutularındaki yağlama sorunu incelenmekte ve yağlama için bazı öneriler verilmektedir.

S. Tümkor, 1995; Dişli çark mekanizmalarının emniyetle vazife görmesinde bakım şartları büyük önem taşır. Yağlama, periyodik hasar önleyici bakım olarak önemle üzerinde durulması gereken bir husustur. Bu makalede, dişli çark mekanizmalarının yağlanması üzerinde durulmuş, yağlamayı etkileyen faktörler araştırılmış ve DIN 3990 Bölüm II de yüzey yorulma mukavemeti değerlerinin bulunmasında kullanılan yağlayıcı, hız ve yüzey pürüzlülüğü faktörleri incelenmiştir.

Haizuka, S; Naruse, C. ve Nemoto, R., 1986; Bu çalışmada dişli çark sistemlerinde sürtünme kayıplarının azaltılması ve bu suretle verimin artırılması incelenmiştir. Deneyde Base oil (katkısız yağ) viskozitesi ve içindeki EP katkısının yoğunluğunun artırılmasıyla sürtünme kayıplarında düşüş çok olmamakla birlikte sentetik yağlarda sürtünme kayıplarındaki düşüş daha fazla olmuştur. Ayrıca dişli çark yüzeylerinde oluşan sıcaklık ve sürtünme kayıpları arasında bir ilişki bulunmuştur.

Haizuka, S; Nemoto,R; Kurokawa. K; 1986; Bu çalışmada mineral yağlar kullanılarak farklı modüllere sahip düz dişli çarklarda profil kaydırma faktörünün sürtünme kayıpları, sıcaklık artışı ve yenme limit yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Akkurt, M 1990; Bu çalışmada pirinç-çelik malzeme çiftine pim disk deneyi uygulanmış, sürtünme katsayısı ve aşınmanın sıcaklık yük ve kayma hızı ile ilişkisi gösterilmiştir.

Winter ve Weiss, 1981; Isıl işleme tabi tutulan dişlilerde yüzey sertliği ve sertleştirme derinliğinin diş yüzeyinin yük taşıma kapasitesine etkisini, dolayısıyla pitting mukavemetinin değişimini araştırmışlardır. Ayrıca; yağlayıcı cinsi, malzeme cinsi, yüzey pürüzlülüğü parametreleri de incelemiştir.

Bertz ve Krüger, 1975: Çalışmalarda pitting ortaya çıkış mekanizmasını, oluşan çukurcuklarının tiplerine göre meydana geliş sebeplerini ve günümüze dek yeterli bir açıklama getirilmemiş olan yağlayıcıların pitting oluşumuna etkisini araştırmış, hasarın önlenmesi için alınabilecek etkili önlemleri tartışmaya açmışlardır.

Rao ekibi, 1977: Isıl işlem uygulanmış profil kaydırmalı düz dişli çarklar üzerinde kapalı devre güç dolaştıran dişli yorulma test düzeneği vasıtasıyla yaptıkları deneylerde temas basınçlarının, eş çalışan yüzeylerinin kayma hızlarının, yağ filmi kalınlığının ve temas çizgisi üzerinde yüzey altı maksimum kayma gerilmesinin yerinin değişiminin pitting oluşumuna etkisini araştırmış. Profil kaydırmaya sahip dişlilerin daha iyi pitting ve aşınma mukavemeti sergiledikleri, ısıl işleme tabii tutulanların ise neredeyse hiç scoring hasarına rastlanmadığı rapor edilmiştir.

Clifford, G., 1990: Bu makalede dişli yağlama yağının viskozitesini güvenilirlik metodu vasıtasıyla belirlenmesini ve minimum yağ tabakası kalınlığı ve diş yüzeyi sertliği arasındaki mevcut ilişkiler kullanılarak hesaplama formülü sunulmuş ve gerçek hesaplamalar yapılmıştır.

Hoehn, B. R., Michaelis, K. Doleschel, A., 2001: Dişli yağlarının yağ tipi, viskozitesi ve katkı maddelerinin dişli bozulmalarını yani pitting, wear (aşınma), scuffing güç kaybı ve verim gibi özelliklerini etkiler. Bu etkileri rakamsal olarak ifade etmek için çeşitli test metotları geliştirilmiştir. Dişli test teçhizatı, ikiz disk makinesi, dört bıyık test düzeneği farklı testler gösterilmiş ve tartışılmıştır. Yağlama yağının bu testler sonucunda elde edilen pitting, scuffing ve sürtünme özellikleri bir biriyle ve dişli performansı ile karşılaştırılmıştır.

Arrisek, A; Vizintin, J., March 2001.: İyileştirilmiş baz yağlarının pittinge karşı dayanıklılığını FZG dişli testlerine uygulanarak incelenmiştir. Deney sırasında test yağlarının sürtünme karakteristiklerini değerlendirme ve film yağ tabaka kalınlığının analitik değerlendirilmesi için ek testler yapılmıştır. Kötü pitting mekanizması LOM ve SEM tarafından analiz edilmiştir. Baz yağları mineral yağlarla karşılaştırıldığında sonuçlar daha iyi pitting direnci düşük sürtünme katsayısını göstermiştir.

Haizuka, S; Naruse, C; Nemoto, R, 1986. ; Sertleştirilmiş düz dişlilerin scuffing limit yükü incelenmiş ve deneylerde dört çeşit temel yağ viskozitesi kullanılmıştır. Antiscuffing olarak ta ZDTP ve EP değişik konsantrasyonlarla kullanılmıştır. Yağlama yağının viskozitesi ile ZDTP ve EP katıklarının konsantrasyonunun scuffing limit yükü ve özel aşınması üzerindeki etkileri araştırılmış sonuçlar özetlenmiştir. Buna ek olarak ISO standartlarına göre diş yüzeyinin integral sıcaklığı gösterilmiş ve tartışılmıştır.

Jiang, Cheng, Hua, 2000; Bu makalede makro ve mikro yaklaşımlarıyla dişli yüzeyi temasındaki karışık yağlamanın teorik analizi mikro düzeyde nümerik olarak belirlenmiştir. Bu ilişki kullanılarak karışık yağlanmış EHD temastaki ortalama boşluk, ortalama yağ film kalınlığı ve ortalama temas basıncı makro düzeyde temas düz kabul edilerek çözülmüştür.

Larsson, R. 1997; Düz dişli profilinde nifton olmayan EHD yağlama analizi ile bütün yağ film kalınlığı izotermal kabul edilmiş ve model nifton olmayan akışkana göre yapılmış sonuçlar paraffinic mialer yağ ve Poli- α -olefin yağı için sunulmuştur.

Snidle, R. W., Evans, H. P. And Alanou, M. P., 2000,; Makalede yüzey ömrü ve distress'in problemleriyle ilişkili dişli diş temas yağlamanın anlaşılmasındaki gelişmelerin kısa bir bakışını göstermektedir. İnce film mikro elestohidrodinamik yağlama teorisindeki son gelişmeler açıklanmıştır.

Brechat, P., Cardis, A. B., Murphy, W. R. and Theissen, J., 2000; Bu çalışmada mineral ve sentetik tabanlı yağlar olarak geliştirilen endüstriyel dişli yağlarının yeni bir jenerasyonunun performans özelliklerini belirtmektedir. Bu çalışmada klasik ticari ürünlerle yeni teknolojinin bütün performansları karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda dişli micropitting bozulmasını ve değerlendirmesi için optimum metotlar geliştirilmiştir.

2. DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Dişli yağlarının amacı; sistem elemanlarının korunması (aşınma, pas, vb.), enerji dağıtılması, gürültü ve vibrasyonun azaltılmasıdır.

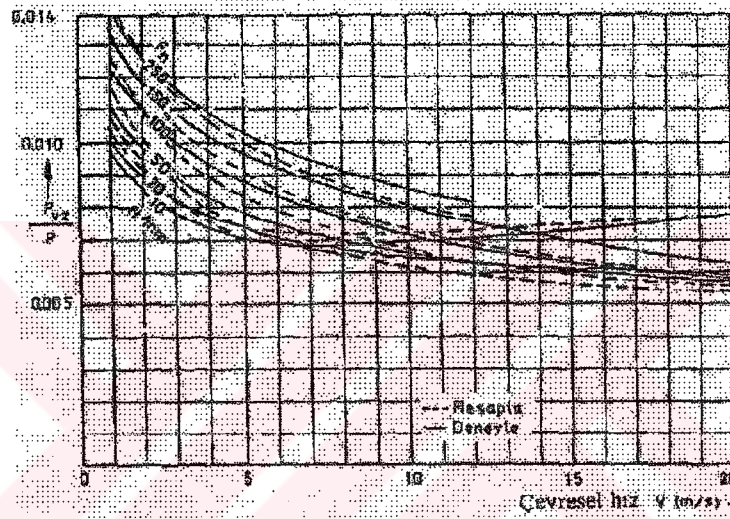
Dişli çarklarda yağlamaya etki eden en önemli faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Hız faktörü
2. Yağ viskozitesi faktörü
3. Malzeme faktörü ve dişlilerin yüzey sertliği
4. Pürüzlülük faktörü
5. Yük faktörü
6. Yağ sıcaklığı faktörü
7. Yağ miktarı faktörü
8. Profil kaydırma faktörü
9. Diş başı daralması faktörü
10. Yağ cinsi faktörü
11. Diş genişliği faktörü
12. Yağlama yöntemi faktörü

2.1 Hız Faktörü (Çevresel Hız)

Yüksek çevresel hızlarda kayma ve yuvarlanma hızları artmaktadır. Hıza uygun yağ kaynağı sağlandığında yağ filminin oluşumuna ve korunmasına yardımcı olmaktadır. Yüksek hızlarda yağ daha çok dişliler arasına çekilmekte ayrıca temas alanından yağın dışarıya çıkma süresinin çok sınırlı olması nedeniyle azalmaktadır. Böylece göreceli olarak daha düşük viskoziteli yağlar kullanılabilir. Düşük hızlarda ise yüksek viskoziteli yağların kullanılması gerekmektedir (Yazıcıoğlu, 1989).

Ohlendorf ise bu konuda yaptığı çalışmada ortalama sürtünme güç kaybı ile çevresel hız arasındaki ilişkiyi göstermiştir (Ohlendorf, 1954). Şekil 2.1’de görüldüğü gibi çevresel hız arttıkça ortalama sürtünme güç kaybı azalmaktadır. Ortalama sürtünme güç kaybı önce 15-20 m/s lik çevresel hıza kadar hızlı bir düşüş göstermekte daha yüksek çevresel hızlarda bu düşüş çok az olmaktadır. Kayıp güç ısı olarak açığa çıkacağından sürtünme güç kaybındaki bu düşüş ortalama diş profil sıcaklığının düşmesine ve dolayısıyla aşınmanın azalmasına sebep olacaktır.



Şekil 2.1 Sürtünme güç kaybı ile çevresel hız arasındaki ilişki (Ohlendorf, 1954; Özkan, 1992)

2.2. Yağ Viskozitesi Faktörü

Yağ viskozitesi, aşınmayı etkileyen faktörlerden biridir. Viskozitenin yüksek olması ise profiller arasındaki sürtünme kayıp gücünü azaltacaktır. Sürtünme gücünün azalması ile malzemenin yüzeyinden kalkacak olan metale aktarılacak olan enerji azalacaktır. Dolayısıyla aşınma direnci artmış olacağından ortalama profil sıcaklığı düşecektir (Carper, 1973; Yozhizaki ve Ark, 1991).

Sıvıların ve gazların viskozitelerini basınç artırmaktadır. Basıncın viskozite üzerindeki etkisi yağlar için ancak çok yüksek basınçlarda (500 daN/cm² üstünde) önemli olmaktadır. Bu sebepten kaymalı yataklar gibi sistemlerde basıncın viskozite

üzerindeki etkisi ihmal edilir. Ancak yüksek basınçlarda Hertz yüzey basınçlarının olduğu dişli çarklar ve rulmanlar gibi sistemlerin yağlanması bu hususun göz önünde tutulması gerekir.

Basınç ve viskozite arasındaki ilişki, akışkanın kimyasal yapısına bağlı olduğundan viskozitenin sıcaklıkla ilişkisindeki gibi tam ve kesin olarak geliştirilemez.

Basınç-viskozite ilişkisi oldukça basit ve yaklaşık olarak;

$$\eta_p = \eta_0 \cdot e^{a \cdot p} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Hani, 1999; Hamrock, 1994). Burada;

η_p : p basıncındaki dinamik viskozite

η_0 : Atmosferik basıncındaki dinamik viskozite

a : İncelenen yağın karakteristiği olan ve sıcaklığa bağlı ampirik sabit

p : Basınç

2.3. Malzeme Faktörü ve Dişlerin Yüzey Sertliği

Dişli çark için malzeme seçimi; Malzemenin mukavemet değerine, maliyetine, ısı işleme, işlenebilirliğine, gürültü açısından çalışma özelliğine ve imal usulüne göre yapılır. Çeşitli dişli malzemelerinin yük taşıma kabiliyetlerini etkileyen mukavemet ve yüzey basıncı değerleri EK 5'deki Cetvel 7'de verilmiştir (Rende, 1997).

Temas halindeki iki cismin temas yüzey sıcaklıkları her iki malzemenin ısı iletkenliğine, özgül ısılarına ve kütle yoğunluklarına bağlıdır. Bu durum aşağıdaki ifade ile gösterilir.

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\sqrt{c_1 \cdot \gamma_1 \cdot \lambda_1}}{\sqrt{c_2 \cdot \gamma_2 \cdot \lambda_2}} \quad (2.2)$$

q_1, q_2 : Her iki yüzeyde artan ısı miktarı

c_1, c_2 : Özgöl ısı(j/KgK)

γ_1, γ_2 : Kütle yoğunluğu(Kg / m³)

λ_1, λ_2 : Isı iletkenliği(W/mK)

Çeşitli tip çelikler için (2.2) ifadesindeki özgöl ısıları ve kütle yoğunlukları eşit olduğu kabul edilebilir. Ancak ısı iletkenlikleri farklıdır. Bu durum malzemenin iç yapısıyla ilgilidir. Bu konuda yapılan çalışmalarda ostenitin ısı iletkenliğinin perlitin ısı iletkenliğinin yaklaşık dörtte biri olduğu bulunmuştur. Bu sebepten dolayı dişli çarkların diş profil yüzeylerindeki ostenit miktarı arttıkça çark gövdesine iletilen ısı da azalmakta dolayısıyla profil yüzeyindeki ısı ve profil yüzey sıcaklığı yükselmektedir. Bunun neticesi olarak da aşınma mukavemeti azalmaktadır (Hamrock, 1994).

2.4. Pürüzlülük Faktörü

Dişlilerin profil yüzeylerinin pürüzlülüğü sürtünme katsayısını, sınır sürtünmesini yağ filmi oluşumunu ve ısının artışı dolayısıyla aşınmayı etkilemektedir. Dişlerin profil pürüzlülükleri arttıkça sürtünme katsayısı artmakta ve böylece profil ısı yükselmekte ve aşınmaya yardım etmektedir. Daha pürüzlü yüzeyleri birbirinden ayırta bilmek için daha yüksek viskozitede daha kalın yağ filmi gerekli olmaktadır. Diğer yandan yüzey kalitesinin artması ile daha düşük viskoziteli yağlarla başarılı bir yağlama yapılabilmektedir (Şahin, 2002; Başaran, 2001; Paygane, 1990).

Sürtünmelerde büyük önem taşıyan metal yüzeyleri pürüzlü, dalgalı ve kusurlu yapılardan oluşmaktadır. Metal yüzeylerindeki bu pürüzlülükler standartlarda tarif edilen yöntemlerle ölçülür. Yüzey pürüzlülükleri çıkıntı ve girinti arasındaki yükseklik (R_t), aritmetik ortalama (R_a) ve karesinin kare-kök ortalaması (rms) olmak üzere üç şekilde ifade edilebilir. Bu ifadeler arasında;

$$R_t \cong (4 \sim 5) R_a, \quad rms = (1.1 \sim 1.2) R_a \quad (2.3)$$

bağıntıları vardır..

Hidrodinamik veya Elasto-hidrodinamik yağlamada sürtünme kesin bir kriterdir. Bu teorilerde yağlamanın meydana gelebilmesi için minimum yağ tabakası (h_o)'nın

$$h_o > R_{top} \quad (2.4)$$

olması lazımdır. Burada R_{top} iki yüzeyin pürüzlülüğünden oluşan bileşik yüzey pürüzlülüğüdür. Bu değer aşağıdaki ifadelerle hesaplanır.

$$R_{top} = R_{t1} + R_{t2} \quad (2.5)$$

$$Ra_{top} = Ra_1 + Ra_2 \quad (2.6)$$

$$Rz_{top} = Rz_1 + Rz_2 \quad (2.7)$$

$$Ra_{top} = rms_1 + rms_2 \quad (2.8)$$

Bunların yanında istatistikli metotlara dayanan Tallian (karekök) metodu da denilen

$$R_{top} = \sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2} \quad (2.9)$$

$$R_{top} = \sqrt{rms_1^2 + rms_2^2} \quad (2.10)$$

ifadeleri de teklif edilmektedir (Blok, 1937; Carper ve Ku, 1973).

2.5. Yük Faktörü

Dişli yüzeylerinin yük taşıma kabiliyeti, müsaade edilen diş yüzeyi basıncı ile belirlenir. Taşınabilecek yük basıncı aşılması halinde temasta bulunan yüzeylerde malzeme parçacıklarının kopması sonucu ufak çukurcuklar şeklinde pitting hasarı meydana gelir. Yağlama yağının seçiminde dişli çarkın taşıdığı yükün özelliği önemli bir etkiye sahiptir. Yük düzgün olduğu zaman döndürme momenti ve dişlilere etki eden kuvvette düzgün olmaktadır. Bununla birlikte darbe yükleri nedeniyle diş

aşırı zorlanma uygulandığında yağ filmi geçici süreyle yırtılabilmektedir. Yağ filminin yırtılmasını önlemek için normal viskoziteden daha yüksek viskoziteli yağlar, bazı durumlarda ise katkı maddeleri kullanılması gerekli olmaktadır (Tümkor, 1995).

Bir dişli çark sisteminde sistemden aktarılan moment dolayısıyla dişler üzerindeki yük arttıkça artan yükün tesiriyle kavramadaki yağ viskozitesi düşer. Viskozitenin düşmesi ise diş profilleri arasındaki sürtünme kaybını yani sürtünme gücünü arttıracaktır. Sürtünme gücünün artması diş profil sıcaklığının artması demektir. Sıcaklığın artışı ise aşınma yükünün azalmasına sebep olacaktır (Lechner, 1966).

2.6. Yağ Sıcaklığı Faktörü

Yağ seçiminde sıcaklık önemli bir etkiye sahiptir. Yağ sıcaklığının aşınma üzerine etkisi iki yoldan olmaktadır. Bunlardan birincisi yağ sıcaklığının, diş kütle sıcaklığını doğrudan etkilediğidir. Yağ sıcaklığının artması kütle sıcaklığının dolayısıyla ortalama profil sıcaklığının artmasıdır. İkinci olarak da yağ sıcaklığının artması yağlama yağının viskozitesini düşürmektedir. Buna bağlı olarak temas halindeki profiller arasında bulunan yağın da viskozitesi düşmüş olmaktadır. Viskozitenin düşmüş olması da çalışan iki profil arasındaki metal-metal sürtünmesini artıracığından diş kayıp gücünü ve ortalama profil sıcaklığını arttıracaktır (Niemann, ve Ark, 1967; Lechner, 1966.). Ayrıca yağ sıcaklığı dişiliyi fazla soğutamayacaktır. Bu ise ortalama dişli sıcaklığının artması demektir.

Viskozitenin sıcaklık değişimlerinden mümkün olduğunca az etkilenmesi istenir. Genellikle sıvılarda viskozite, sıcaklığın artmasıyla azalmakta, gazlarda ise hafif bir yükselme göstermektedir. Önemli olan husus sıvı yağların viskozitelerinin 30°C ile 70°C arasında büyük değişim göstermesidir. Bu sıcaklık aralığı genellikle makinelerin sıcaklık bakımından normal çalışma bölgesi olmaktadır. Sıvı yağlarda, viskozitenin sıcaklıkla değişimini veren tam analitik bir bağıntı yoktur. Bu sebepten

pratikte çeşitli ampirik bağıntıların mukayesesi yoluyla elde edilen ve Walther ismiyle tanınan

$$\log (v + 0,6) = m \log(T + 460) + b \quad (2.11)$$

denklemini kullanılmaktadır. Burada;

T : Mutlak sıcaklık

m, b : Yağlayıcı maddeye ait sabit değerler

Bir sistemin düzgün çalışması için iyi bir yağlayıcıyla kombine olarak çalıştırılması gerekmektedir. Yağlama yağı yatak içinde bir yağ tabakası oluşturur ve küçük eğilme şekil değiştirmelerine izin verir. Bu suretle hem metal-metal teması engellenmiş olur, hem de aşırı ısınma ve bunun neticesi olan hasar engellenmiş olur. Ayrıca dişli kutusunda sürtünmeden dolayı oluşan kayıp engellenerek dişli verimi yağsız duruma göre oldukça arttırılmış olur.

Yağlama yağı ayrıca ortamda oluşan ısıyı da üzerine alır ve sistemin müsaade edilebilir sıcaklık sınırlarında çalışmasına yardımcı olur (ELF industrial oils, 1992).

Yüksek hız ve yüksek yük uygulamalarında yağlama yağı yükün bir kısmını üzerine alarak metal metal temasının azaltılmasında ve dolayısıyla aşınmanın engellenmesinde büyük rol oynar. Bilindiği üzere milin belli bir hızından sonra mil ve yatak arasında bir Hidrodinamik yağ tabakası oluşmakta ve bu tabakanın oluşturduğu basınç milin yatağa uyguladığı basıncın aksi yönünde oluşmaktadır. Dolayısıyla milin yatağa uyguladığı basınç düşmüştür. Ayrıca yağlama yağı çalışma sırasında dişli kutusunun bütün noktalarını aynı sıcaklığa getirir.

Dişli kutusu ısı değiştiricisiyle donatıldığında yağ sıcaklığı otomatik olarak ayarlanabildiğinden sistemde çevre sıcaklığının etkisinden uzaklaşa bilmektedir.

2.7. Yağ Miktarı Faktörü

Bir dişli çark mekanizmasında, yağ miktarı yeterli bir değerin üzerinde değilse bu durum diş profillerinde iyi bir film tabakası oluşmayacağından ve soğutulmasına yetmeyeceğinden diş profillerindeki sıcaklık artmakta bunun sonucu olarak ta aşınma

mukavemeti azalmaktadır. Yağlamada yağın az olması kadar fazla olması da, yağlayıcıların vasıflarını bozduğundan zararlıdır (Lechner, 1966; Tümkor, 1995).

2.8. Profil Kaydırma Faktörü

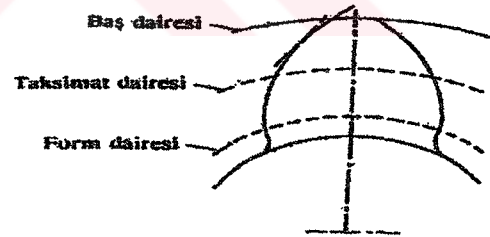
Maksimum aşınma direnci, diş temas sıcaklığının minimize edilmesiyle elde edilir. Sıcaklığın minimize edilmesinin bir metodu da pinyon ve karşılık dişlinin üzerinde yapılacak profil kaydırma işlemidir (Blok, 1937). Profil kaydırma işlemiyle dişli çark çiftinde kavrama oranı artırılarak her bir dişe gelecek yük azaltıla bilinir. Bu şekilde dişlerde aşınma oluşumu azalacaktır.

2.9. Diş Başı Daralması Faktörü

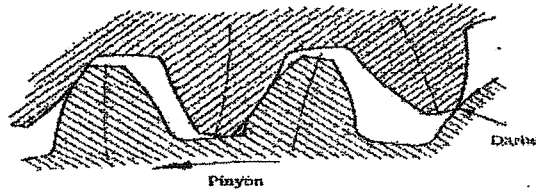
Diş başı daraltması dişli çarkların aşınma mukavemetlerinin artırılması için uygulanan bir profil düzeltme şeklidir. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’de görüldüğü gibi diş başındaki profil düzeltme dişlerin kavramaya girdikleri esnada oluşan darbeleri önlemekte ve kavramadan çıkma esnasında ise diş profillerinin temas yüzeyinin büyümesini sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Diş başı daralması



Şekil 2.3 Kavrama sonunda küçük temas yüzeyi



Şekil 2.4 Dişlilerin elastik eğilmesi sebebiyle kavramaya girişteki darbe etkisi

Kavrama esnasında pinyon dişindeki elastik eğilme sebebi ile bir sonra devreye giren karşılık dişli dişinin diş başı noktası vaktinden önce kavramaya girmekte ve bir darbe kuvveti oluşturmaktadır (Şekil 2.4). Bu darbe kuvveti bu noktadaki kayıp gücü dolayısıyla açığa çıkan ısıyı artırmaktadır. Bu problemin kaldırılması için karşılık dişli diş başında profil düzeltme yapılır (Winter ve Michealis, 1975; Naruse ve ark, 1985).

2.10. Yağ Cinsi Faktörü

Yağ ham petrolden oluşmaktadır büyük kısmı karbon ve hidrojen elemanı olan koyu kahve rengi veya siyah bir sıvıdır. Ham petrolü oluşturan elemanların yüzdeleri yaklaşık olarak %80-85 karbon, %10-15 hidrojen, %0,1-5 kükürt, %0,1-1 azot, %0,1-4 oksijen, %0,1-1 diğer maddelerdir. Bunlardan kükürt ham petrolün kalitesini belirleyen önemli bir elemandır. Yüksek kükürtlü petrolün kalitesi düşük kabul edilir. Yağ cinsinin aşınma üzerine etkisi iki yolla olmaktadır. Bunlardan birincisi kayıp gücün yağın cinsine göre değişimi diğeri ise temas bölgelerinden uzaklaştırdıkları ısı sebebiyledir. Yapılan deneylerle saf mineral yağlardan, orta katıklılı yağlar ve yüksek katıklılı yağlara gidildikçe sistemin aşınma direnci artmaktadır. Yağ tarafından temas bölgelerinden uzaklaştırılan ısı miktarı bu yağların özgül ısıları ile ve özgül ağırlıkları ile orantılıdır. Bu durum matematiksel ifade ile aşağıda gösterilmiştir.

$$q = c \cdot \gamma \quad (2.12)$$

Burada;

q : Temas bölgelerinden uzaklaştırılan ısı miktarı, (w)

c : Yağın özgül ısısı, J / kgK

γ : Yağın özgül ağırlığı, kg/m³

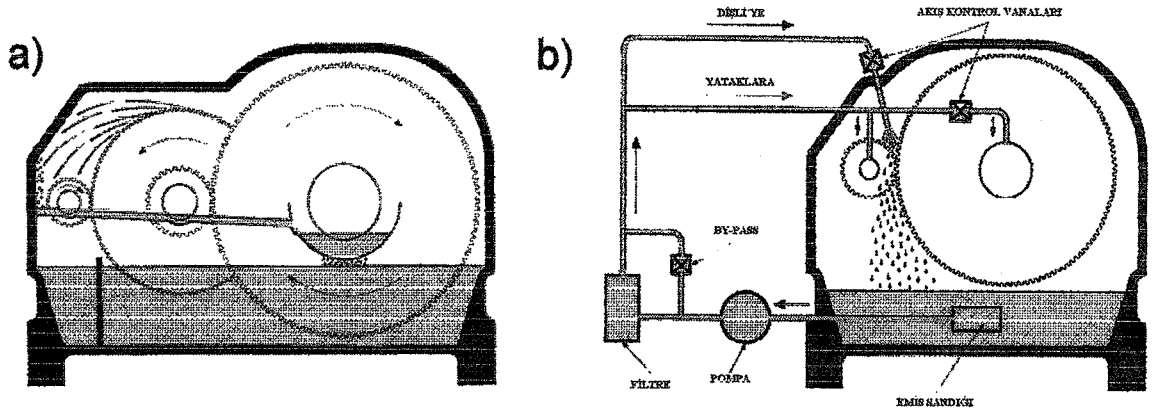
2.11. Diş Genişliği Faktörü

Dişlinin b genişliliği artıkça dişli çarkın yük taşıma kabiliyeti büyür. Ancak b diş genişliliği büyük olduğu durumda, gerek milin deformasyonları ve gerekse işleme hatalarından dolayı yükün bir tarafa yığılmasına ve buna bağlı olarak köşe

kırılmasına yol açabilir (Akkurt, 1997). Diş genişliğinin aşınma üzerine etkisi, diş profilleri üzerinde açığa çıkan ısının dışarıya atılması yönündendir. Bilindiği gibi kavrama esnasında profilin üzerinde açığa çıkan ısı üç tarzda dışarıya atılmaktadır. Bunlardan birincisi oluşan ısının yağlama yağı vasıtasıyla profiller üzerinden alınmasıdır. Eğer dalma yağlama yöntemiyle yağlama yapılıyorsa oluşan ısı dişli çarkların yağ içinde kalan kısımlarından yağ içerisine transfer edilir. Eğer yağlama bir pompa ile yapılıyorsa bu kez de profiller üzerine temas eden yağlama yağı buralardaki ısıyı alacaktır. İkincisi ise dişli çarklarla temas halinde bulunan hava vasıtasıyla atılan ısıdır. Üçüncüsü ise dişli çarkın gövdesi üzerinden miller, yataklar ve kutu gövdeleri üzerindeki soğutma kanatçıkları vasıtasıyla atılan ısıdır

2.12. Dişli Yağlama Yöntemi Faktörü

Yağlama yönteminin aşınma olayı üzerine etkileri, yağlama yöntemi faktörü ile dikkate alınmaktadır. Bu etkiler, daldırma yağlama ve püskürtmeli yağlamada farklılık göstermektedir. Daldırma yağlama emniyetli ve ekonomik bir yağlama yöntemidir. Bir veya birden fazla dişli yağın içine dalarak yağı etrafa sıçratır. Etrafa yayılan yağ yataklara açılan kanallardan yataklara da akar. Sıçratılan yağ ile yağın içine dalmamış dişlilerde yağlanır. Şekil 2.5.a'da daldırma yağlama sistemi gösterilmiştir. Püskürtmeli yağlama; yüksek devirli dişlilerde genelde kullanılır. Yağlamanın karter içerisinde dişlileri komple yağlayacak şekilde yapılması gerekir. Soğutmaya dikkat edilmeli gerekirse dişlilerin yan yüzeyleride ayrıca yağlanarak soğutulmalıdır (Şekil 2.5.b), (Rende, 1997; ELF industrial oils, 1992).

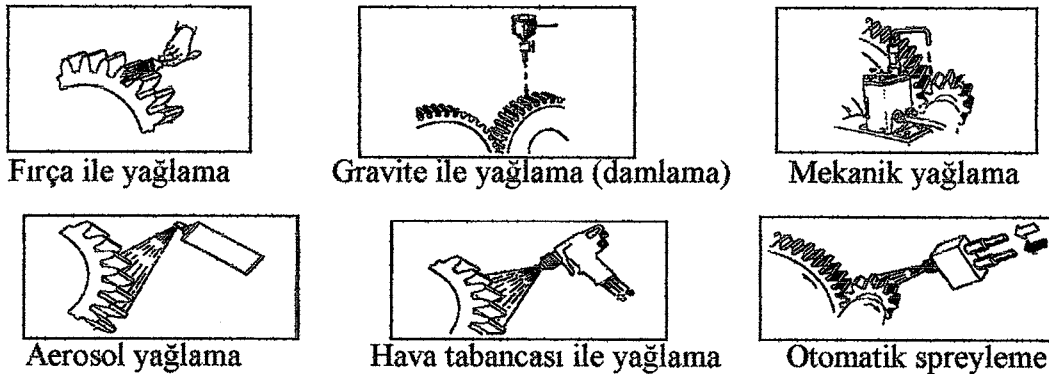


Şekil 2.5a,b Daldırma ve püskürtme yağlama yöntemleri

Yağın dişli dişlerine uygulama metodu yuvarlanma dairesinin doğrusal hızına öncelikle bağlıdır. Daldırma yağlama sistemleri en basitidir, fakat taksimat dairesi hızının yaklaşık 3000 fpm (fit por minit) olacağı yere sınırlanmıştır. Daldırma yağlamanın aralığı, köpürme (churning) azalmada deflektör ve yağ yıkama tavası (Pans) kullanılarak yaklaşık 5000 fpm (fit por minit)'ye arttırılabilir. 5000 fpm (fit por minit)'nin yukarısında çoğu dişliler, basınç-beslemeli sistemlerle yağlanır. Sürtünmesiz yataklı dişli sistemleri için, maksimum 7000 fpm (fit por minit) 'lik taksimat dairesinin doğrusal hızına kadar dişli kavrama sadece yağ püskürtme ve yatakları yağlamada sıçratma üzerine itimat ederek izin verilir. Bu hızdan yukarı olan mil yatağı dişli sürücüler için hem dişliler hem de yataklar basınç beslemeli olmalıdır. Basınç-beslemeli sistemlerde aşağıdaki parametreler uygun yağlamayı sağlamada ve dişli kavramasını soğutma için dikkate alınmalıdır.

- Akış miktarı
- Püskürtme ebadı
- Besleme basıncı
- Püskürtücü sayısı

Bu parametreleri belirlemek için deneyim ve deneyi temel alan genel rehber hatlar vardır. Fakat her uygulama kendi özel çalışma koşulları ve gereksinimlerini temel alan bir şekilde bağımsız olarak belirlemelidir (Errichello, 1990). Dişli kutularındaki dişli çarkların yağlanması açıkta çalışan dişli çarklardan farklılık göstermektedir. Yağın oksidasyon direnci yanında dişli çarkın tipi, hızı, yüzey kalitesi gibi bazı etkenler tasarımda etkili olmaktadır. Açık dişliler için kullanılan yağlama metotlarını şekiller üzerinde göstermek gerekirse (Şekil 2.6);



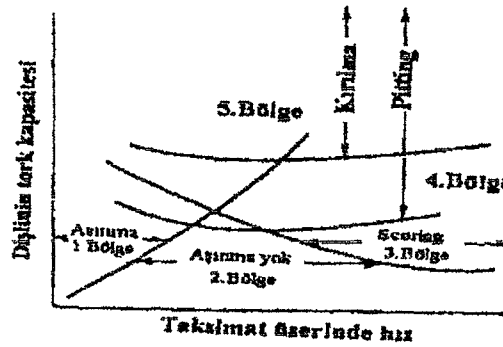
Şekil 2.6. Açık dişliler için yağlama metotları

3. DİŞLİ ÇARKLARDA OLUŞAN HASARLAR

Dişli tasarımcısı bir çok farklı bozukluk modunun karışık detaylarından haberdar olmalıdır. Amerikan Dişli Üreticileri Birliği (AGMA) ulusal standardı kendi terminolojik yayınlarında 20 tip diş bozukluğunu 5 temel bozukluk modu içinde sınıflamışlardır.

- Aşınmanın geniş kategorileri
- Plastik akış
- Yüzey yorulması (Hertz basıncı)
- Kırılma
- Dişli bozuklukları

Bu 5 temel bozukluk modlarını alt guruplara ayırmaktadır. Bu bozukluk modları hafif, orta ve harap edici gibi çeşitli isimler veya sınıflandırma terimleriyle adlandırılırlar. Bir dişli dizayn edilirken tasarlanan çalışma şartlarında muhtemel hangi tür hasarlarla karşılaşacağı bilinmelidir.



Şekil 3.1 Dişli çarklarda meydana gelen hasarların oluştuğu bölgeler

Şekil 3.1'de çevresel hız-tork diyagramı üzerinde farklı hasar tipleri ve bu hasarların oluştuğu bölgeler gösterilmiştir. 1., 2. ve 3. bölgeler aşınma olayından dolayı oluşan hasar bölgeleridir. 1.inci bölgede dişli bir yağ filmi oluşturacak kadar hızlı

çalışmamaktadır. 2.inci bölgede dişli bir yağ filmi oluşturacak kadar hızlıdır. Eğer çalışma çevresinde aşındırıcı maddeler yoksa aşınma gözlenmez ve dişli uzun ömürlü olur. 3.üncü bölgede hız ve yük oluşan yağ filmini yırtabilecek kadar yüksektir. Dolayısıyla ani aşınma olarak bilinen Scoring (Yenme aşınması) gözlenebilir. Tasarımcı dişli setini uygun kuvvet, (wear) aşınma direnci ve scuffing (soyulma) direnci ile birlikte tasarlamalıdır. Yağ seçimi ve uygulama metodu çelik karışımı ve ısıtma işlem uygulaması kadar önemlidir. Aynı zamanda tasarımcı aşağıdaki faktörlerin arasındaki ilişkileri düşünmelidir.

- Dişli geometrisi
- Dişli diş hareketi (kinetik)
- Dişli diş kuvveti (statik ve kinetik)
- Dişli diş malzemesi ve yüzey karakteristikleri (fiziksel ve kimyasal)
- Yağlama karakteristikleri (fiziksel ve kimyasal)
- Çevresel karakteristikler (fiziksel ve kimyasal)

Bu faktörler arasındaki ilişki düşünülerek, dişli çarkın 2.inci bölgede çalıştırılacak şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir.

3.1 . Dişli Çarklarda Yağlamayla İlgili Bozukluk Modları

Dişlilerde yağlamayla ilgili genel bozukluk modlarını aşağıdaki gibi sıralıya biliriz.

- Yüzey yorulması
 - Pitting
 - Micropitting
- Aşınma (wear)
 - Adezyon
 - Abrasyon
 - Polising
 - Scoring
- Scuffing (soyulma)

Yüzey yorulması; Malzemenin dayanım sınırı ötesindeki tekrarlı yüzey veya yüzey altı gerilmelerin sonucunda oluşan bir hasar türüdür. Bazı şartlar altında maksimum kayma gerilmesi malzemenin mukavemet sınırını aşar ve tekrarlı yük etkisiyle yüzeye paralel bir yorulma çatlak meydana gelir. Bu çatlak zamanla ilerler ve nihayet yüzeye ulaşır. Böylece, izole edilmiş küçük malzeme parçası kırılır ve ardında bir çukurcuk bırakarak yüzeyden kopar. Çukurcuk oluşumu, yorulma bozulmasının bir sonucu olduğundan dişliler, Pitting belirtisi göstermeden bir süre çalışmaya devam edebilir.

Yüzey malzemesine etkileyen faktörlerin etkileri dişli tasarımına (geometrisine), devir sayısına, yüke, yağlama rejimine, yüzey pürüzlülük durumuna ve diğer parametrelere göre farklılık gösterebilir.

Micropitting: Çoğu zaman oluşan mikropitting diş yüzeyine hasar verici değildir. micropittingler, “iyileştiği” durumda çalışırken hafif, fakat dişli dişini yok etmeye öncülük eden micropitting’lerin, büyük ölçekli pittinge yükseldiği örneklerde vardır. Micropittingi etkileyen faktörler dişli yüzeyinin yüzey pürüzlülüğü, tutulan ostenit yüzdesi, yağ viskozitesi, sürtünme katsayısı, tanjant hız, yağ sıcaklığı ve yağ eklentileri olarak bildirilmiştir (Sindle, Evans, 2000; Brechot, Theissen, 2000).

Spesifik film kalınlığı micropittinge etkileyen en önemli parametredir. Hasar özellikle düşük viskoziteli yağlarla yağlandığında pürüzlü yüzeyli dişli dişleri üzerinde meydana geldiği görülmektedir. Bir özel parlatma çarkıyla ayna gibi yapılarak bitirilen dişliler etkin bir şekilde micropittingi elimine ederler. Düşük hızlı dişliler micropittinge daha çok eğilimlidir, çünkü film kalınlıkları azdır, micropittingi önlemek için, spesifik film kalınlığı düzgün dişli diş yüzeyleri yüksek viskoziteli yağlar ve yüksek hızlar kullanılmalıdır.

Micropittingi Önlemenin Yolları;

1. İzin verilebilen en yüksek viskoziteli soğuk, temiz ve nemsiz yağın uygun miktarını kullanma.
2. Eğer mümkünse yüksek hızda kullanma.

3. Dikkatli parlatma ve bilelemeyle düzgün diş yüzeyleri kullanma.

4. Yüzey tabakalarında uygunluk.

Pitting oluşumu; Çevrimsel olarak etkileşen aşırı yük altında yüksek temas basınçlarına maruz eş çalışan dişli yüzeylerinde küçük pulcuk ve parçacıkların kalkarak çukurcuklar halinde ortaya çıkan hasara pitting adı verilir. Pitting, esas itibariyle diş yüzeylerinde ki malzemelerin yorulması sonucu meydana gelir. Pitting dişli dişleri için yaygın bir bozulma modudur. Çünkü bunlar yüksek yüzey (Hertzion) temas gerilmesine ve epey gerilme döngülerine maruz kalırlar. Örneğin; Karbürüze edilmiş dişli üzerinde temas gerilmesi 300.000 psi ye ulaşırken through-hardened dişliler tipik olarak yaklaşık 100.000 psi temas gerilmesine dayanacak şekilde tasarlanmıştır (Errichello, 1990).

Hertz (yüzey) yorulması için bir tahammül yoktur ve eğer dişliler uzun süredir çalışıyorsa düşük gerilmelerde bile pitting oluşabilir. Çünkü dayanma (erdurance) sınırı yoktur ve dişli dişleri uygun, sonlu bir kullanım süresi için dizayn edilmelidir. Dişli setinin pitting yaşamını uzatmak için, tasarımcı temas gerilmesini düşük, materyal gücünü yüksek ve yağ spesifik film kalınlığını yüksek olarak korumalıdır.

Temas gerilmesini azaltmada optimizasyon için çap, yüzey genişliği, dişli sayısı, basınç açısı gibi çeşitli geometrik değişkenler vardır.

Yüksek yağ spesifik film kalınlığının elde edilmesinin detayları (EHD) yağlama 4.üncü bölümde geniş bir şekilde açıklanmıştır. Fakat genel öneriler yeterli viskozite ve basınç-viskozite katsayısına sahip soğuk, temiz ve kuru yağın uygun olarak kullanılmasıdır.

Yağ içerisindeki sudan bozulmanın metalin hidrojen embrittlement vasıtasıyla pittingi ilerlettiğine inanılır ve yağ içerisindeki abrasife parçacıklar, gerilme temaslarına veya yağ filmini aşmaya yol açacak dişli yüzeylerinde çentiklerle pittinge yol açacaktır. Henüz tam olarak yağ eklentilerinin pitting üzerindeki etkisi çözümlenmemiştir (Bartez, Krüger, 1975; Winter, Weiss, 1981).

Pittingi Önlemenin Yolları;

1. Yükleri azaltarak veya dişli geometrisini optimize ederek temas gerilmesini azaltmak.
2. Temiz çelik kullanmak, yüksek sertliğe uygulanan düzgün sıcaklık, karbürüze önerilir.
3. Dikkatli parlatma ve bilemeyle düzgün dişli yüzeyleri elde etme.
4. Uygun viskoziteli temiz, soğuk ve kuru yağın uygun miktarını kullanma.

Aşınma; Dişlinin temas yüzeyinden olan malzeme kaybını tarif eden genel bir terimdir. Mekanizmaların hareketli elemanlarında en çok rastlanan hasar çeşididir. Dişlilerde de oldukça sık rastlanır. Dişlilerdeki aşınmanın en genel nedenleri; yetersiz yağ filminden dolayı metalik temas, kullanılan yağdaki abrasiv parçacıklar, hızlı aşınma veya scoring sebebiyle temas bölgesinde yağ filminin bozulması, yağın ve katkıların bileşimi sebebiyle kimyasal aşınma olarak sıralanabilir. Aşınma hasarı, dereceleri veya ortaya çıkış mekanizmalarına göre sınıflandırılabilir. Aşınmanın üç derecesi mevcuttur: Hafif aşınma, cilalama (parlatma) olarak da anılır. Dişlinin ömrü boyunca tatminkar performansını sürdürmesine pek az etkisi olacak oranda yavaş malzeme kaybı görülmektedir. Bu normal ve çok yavaş bir aşınma süresi olup temas yüzeylerindeki pürüzler kademeli şekilde aşınarak temiz, pürüzsüz ve uyumlu yüzeyler ortaya çıkana kadar devam eder. Cilalama hem adhesiv hem de abrasiv mekanizmalar tarafından genellikle düşük devirli uygulamalarda sınırlı yağlama şartları veya ince yağ filmi oluşumlarında ortaya çıkar. Normal yada izin verilebilir aşınma, dişin beklenen ömrü dahilinde sunacağı tatminkar performansı çok az etkileyecek kadar yavaş süratte gelişir. Normal aşınma; yağlama rejimine, yükün doğasına, yüzey sertliği ve pürüzlülüğüne yağlayıcı içindeki katkılara bağlıdır. Hasar verici yada aşırı aşınma, dişli ömrünü bariz şekilde azaltan, diş şeklini dişlerin eş çalışmasını bozacak kadar değişikliğe uğratan bir aşınma derecesidir. Devam eden işletme sonucu, daha fazla aşınma ile diş kırılmaları meydana gelir. İşletmenin erken safhalarda bu derece aşınmanın ortaya çıkması aşırı yük, kirlenmiş yağ veya çok düşük yağ viskozitesi sebebiyle olabilir.

Aşınmayı ortaya çıkış şekillerine göre sınıflamak da mümkündür;

Adheziv Aşınma: Adheziv aşınması en çok rastlanan aşınma mekanizması tipi olup, elemanların temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilmeler sonucu mikro kaynak bölgelerinin oluşması esasına dayanır. Yani metalin dış yüzeyinden tabakalar halinde yada küçük partiküller halinde ayrılması olayıdır. Adheziv aşınmada yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adheziv aşınmasını önlemektedir.

Yüksek-yükü, yavaş-hızlı (<100 fpm) fit por minit sınır yağlanmış dişli özellikle aşırı adhesive aşınmaya maruz kalırlar. Yüksek viskoziteli yağların aşınma hızını belirgin bir şekilde azalttığını yorumlamaktadır (Errichello, 1990; Akkurt, 1997).

Adheziv aşınmasının genel sebepleri.

- Yağ ve içindeki kimyasal katıkların oluşturacağı kimyasal aşınma
- Uygun olmayan yağlama neticesi metal-metal teması olması.
- Yağ içindeki aşındırıcı tanecikler ve toz parçaları
- Temas alanında yağ filminin yırtılması, yük durumuna, malzeme sertliğine.
- En uygun yüksek viskoziteli serin, temiz ve nemsiz yağın uygun miktarları kullanılmalıdır.

Abrasiv Aşınma: Çok önemli olan abrasiv aşınmasında yüzeylerin bozulması, dışardan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan dişli yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Abrasiv aşınmasının önlenmesi için yüzeyi sertleştirilmiş dişli dişleri, düzgün diş yüzeyleri ve yüksek viskoziteli yağlar kullanılarak çalışma esnasında oluşan aşınma artıkları azaltılarak abrasiv aşınmasını minimize edilebilir. Yağın, asit numarası, viskozite ve su içeriği analizleri ile spektografi ve ferrografik (yağ kirlilik analizi) ile görüntülenmesi ile çözüm yolları arana bilinir (Errichello, 1990).

Polishing (Parlatma) aşınması: Eğer yağdaki aşınma önleyici maddeler kimyasal yönden çok reaktif olursa bunlar parlak, ayna bitişi gibi yüzeyleri elde edinceye

kadar dişli diş yüzeyinin parlamasına yol açabilir. Parlayan dişli yüzeyinin iyi görünmesine rağmen, parlama aşınması arzu edilen bir bozulma değildir, çünkü genellikle parlama aşınması diş profillerinin, kendi ideal forumlarından uzaklaşmasına yol açacak şekilde aşınmasıyla dişli yüzeyi koruması azalır yani güvenilirliğini azaltır (Bartez, 1993).

Polising aşınmayı önleme metotları;

1. Polising aşınması daha az etkili kimyasal ilaveler kullanılarak önlenabilir.
2. İyi filtre kullanarak ve sık yağ değişimleriyle abrasifleri atmak yararlıdır.

Scoring: Eş çalışan dişlilerin yağ filminin görevini yerine getirememesi sonucu metal metale, yüksek sıcaklık altındaki teması ile pürüzlülüklerinin birbirine kaynaması ve bu şekilde diş yüzeyinden kalkan parçacıkların hızlı kaybı olarak tanımlanır. Kaynak meydana geldikten sonra, kayma olayından doğan kuvvetler, eş çalışan yüzeylerden birinde çok hafif bir oyuk; karşı yüzeyde de bunun iz düşümü kalacak şekilde kaynamış metali sıyırır. Aşınma mikroskobik olarak başlar, bununla beraber çok hızlı gelişir. Scoring bazen galling, seizing veya scuffing olarak da anılır.

Scoring diş üzerinde en sık olarak, yüksek temas basınçlarını ortaya çıktığı yerel bölgelerde veya kayma hızlarının, dolayısıyla da temas sıcaklıklarının yüksek olduğu diş ucu ve kökünde görülür. Bu tip aşınma genellikle yuvarlanma çizgisinin yüksek hızları ile ilgili olup, standart devirlerde çalışan düşük sertliğe sahip tamamı sertleştirilmiş dişlilerde pek görülmez. Scoringe doğrudan sebep olan faktörler; yüksek temas sıcaklığı, yüksek temas basıncı ve uygunsuz yağlamadır. Scoring, daha viskoziteli yağ ve EP tipi yağ kullanılarak önlenabilir. Yerel yüksek temas basınçları, imalat safhasında (bitiş) operasyonlarının hassaslaştırılmasıyla giderilir. Bazı hallerde, fazla yük altında çalışan dişlilerin yerel yüksek temas basınçlarını minimuma indirmek için diş profili modifiye edilebilir (Bartez, 1993).

Sucffing; Bir birine göre bağıl hareket yapan iki yüzey arasında ani hasarla sonuçlanan yapışık aşınmanın ağır bir şeklidir. Diğer dişli bozukluklarının

yağlayıcıyla ilişkili hasar verici boyuta gelmesi zaman alırken, scuffing ani olarak ortaya çıktığından dişliler için daha acil bir konudur.

Scuffing sınır yağlama rejiminde çalıştıklarında, dişli yüzeylerinde oluşabilir. Eğer yağ filmi belirgin metal-metal temasını önlemede yetersiz kalırsa dişli diş yüzeylerini normalde koruyan oksit tabakalar kırılır ve saf metaller birbirleriyle kaynar, birleşmesi ve yırtılması sonucu metal transferi oluşur.

Scuffing Aşınmasının mekanizması açıkça anlaşılmamıştır. Fakat genel uyuşmayla, yüksek sürtünme hızının ve yoğun yüzey basınç kombinasyonu ile üretilen yoğun sürtünme sıcaklığının scuffing'e sebep olduğu kabulünü görmüştür. Blok kritik sıcaklık teorisinin, scuffing beklentisinin en iyi kriteri olduğu düşünülür. Çalışma koşullarına yakın simülasyon testlerinden hesaplanmalıdır (Errichello, 1990).

Aşınma, dişli bulk sıcaklığı (T_b) ve flaş sıcaklığı (T_f)'nin toplamını içeren toplam temas sıcaklığı (T_c) ile kontrol edilir.

$$T_c = T_b + T_f \quad (3.1)$$

Bulk sıcaklığı dişli çarkın bölgesine girmeden önceki dişli diş yüzeylerinin denge sıcaklığıdır. Flaş sıcaklığı bölgeseldir ve çark bölgesine geç tiklerindeki sürtünme sıcaklığına bağlı olarak dişli diş yüzeyleri üzerinde oluşan anlık sıcaklık yükselmektedir. Bulk sıcaklığını veya flaş sıcaklığını azaltacak herhangi bir şey toplam temas sıcaklığını azaltacak ve aşınma riskini düşürecektir. Yüksek viskoziteli yağlar veya düzgün diş yüzeyleri, spesifik film kalınlığını artırarak yani sürtünme ve flaş sıcaklığını azaltarak yardımcı olurlar. Aynı zamanda yağ soğutucu görevi görerek dişli yüzeyinden sıcaklığı atarak önemli bir rol oynar. Sertleştirme, scuffing direncinin güvenilir bir göstergesi olarak görünmektedir. Dişli dişleri aşınma dirençleri göz önüne alınarak seçilmelidir.

Scuffing önleme metotları;

- Parlatma Cilalama
- Anti-scuff ilaveler, yüksek viskoziteli yağlar

- Soğuk yağın uygun miktarıyla dişli dişlerini soğutan, sürkule yağ sistemlerinde yağı soğutmak için ısı değiştirici kullanıla bilinir.
- Maksimum scuff direnci için nitridte çelikler kullanılmalı ve paslanmaz çelik veya alüminyum, dişliler için kullanma önerilmez.

Düz ve helisel dişliler için ek (ilave) A(17) AGMA 2001-B88’de formüle edilen blok, flaş sıcaklığı (Erichello, 1990; Wellauer, 1986; Verlag, 1987).

$$T_F = \frac{0.8 \mu_m X_r W_{Nr} \left| (V_{r1})^{0.5} - (V_{r2})^{0.5} \right|}{B_m (b_H)^{0.5}} \quad [^{\circ}\text{F}] \quad (3.2)$$

$$B_m = (\lambda_m P_m C_m)^{0.5} \quad (3.3)$$

$$b_H = [(8 X_r W_{Nr} P_n) / (\pi E_r)]^{0.5} \quad (3.4)$$

Burada;

μ_m = Ortalama sürtünme katsayısı ($0,06 < \mu_m < 0,18$ alına bilinir).

X_r = Yük paylaşma faktörü

W_{Nr} = Normal birim yük [lbf/in]

V_{r1} = Pinyon dönme hızı [in/s]

V_{r2} = Dişlinin dönme hızı [in/s]

λ_m = Isı iletkenliği [lbf/(s °F)]

P_m = Yoğunluk [lb/(in³)]

E_r = Elastisitenin azaltılmış modülasyonu [lbf/in²]

C_m = Birim kütle başına spesifik sıcaklık [lbf.in / (lb °F)]

B_m = Termal temas katsayısı [lbf/(in s^{0.5} °F)]

b_H = Hertz temas bandının yarı kalınlığı [in]

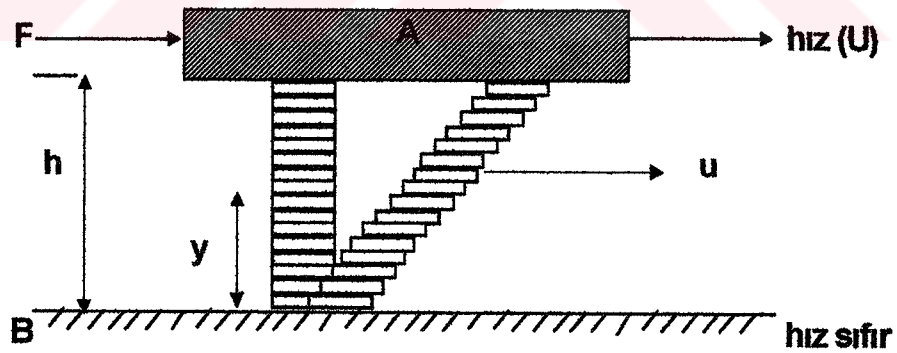
4. DİŞLİ ÇARKLARDA YAĞLAMA TEORİSİNİNİ ESASLARI

Bir yağlayıcının temel görevi hareket yüzeyleri ile yuvarlanma elemanlarını birbirinden ayırtan bir yağ filmi meydana getirmek ve bu suretle sürtünmeyi azaltarak aşınmayı önlemek ve sistemin enerji kaybını azaltmayı amaçlamaktır.

Yağlar, esas olarak şu amaçlara hizmet ederler;

- Sürtünme kontrolü
- Aşınma (Mekanik aşınma) kontrolü
- Korozyon (Kimyasal aşınma) kontrolü
- Sıcaklık kontrolü
- Kirlilik kontrolü
- Güç iletimi

Yağlama konusunda kullanılan tanım ve terminolojiyi açıklamak gerekirse, belli bir sıra takip etmeden tanımları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.



Şekil 4.1. Bir biri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşan sıvı sürtünme

Viskozite; Genel olarak viskozite, bir akışkan maddenin akmaya karşı göstermiş olduğu direnç veya başka bir deyimle, akma sırasında sıvı tabakaları arasındaki iç sürtünmeyi ifade eden bir özelliktir. Şekil 4.1'deki sisteme Newton'un viskoz akışkanlarla ilgili kanunu uygulayarak viskoziteyi veren bir ifade elde edilebilir. Şekildeki A ve B tablaları birbirine paralel hareket etmekte, B tablası ise sabit

durmaktadır. Yağ filminin bir seri yatay tabakalarda meydana geldiği ve F kuvvetinin bu tabakaları deforme ettiğini veya birbiri üzerinde bir deste oyun kartında olduğu gibi kaydırıldığını kabul edelim. Madensel yüzeylerle doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakaları adsorpsiyon dolayısıyla yüzeylere tamamıyla U hızı ile hareket eden A yüzeyine yapışmış olan tabakanın hızı ve sabit B yüzeyi üzerindeki tabakaların hızı ise sıfırdır. Ara tabakaların hızı sabit yüzeyden uzaklıkları 'y' ye bağlı olarak sıfır ile U hızı arasında değişir. Newton kanununa göre akışkan filmin herhangi bir noktasındaki kayma gerilemesi 'y' ye göre hızdaki değişim miktarıyla orantılıdır. O halde;

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (4.1)$$

yazılır. Burada η orantı sabiti olup *dinamik viskozite* denir. du/dy hızın y mesafesine göre değişimi, hız gradyanı veya kayma oranıdır. Buna göre viskozite (η) akışkanın iç sürtünme direncinin bir ölçüsüdür. Hız yağ filmi kalınlığınca doğrusal değiştiğine göre ;

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{h} \quad \text{olur ve}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{u}{h} \quad \text{ifadesi elde edilir.} \quad (4.2)$$

Boyut analizi yapılırsa, viskozitenin;

$$\eta = \frac{F.T}{L^2} = \frac{(\text{kuvvet}).(\text{zaman})}{(\text{uzunluk})^2} \quad \text{boyutunda olduğu görülür.} \quad (4.3)$$

Dinamik viskozite; Birbiri üzerinde kayan yağ tabakalarının kayma geriliminin, kayma hızına oranıdır. Birimi poise (P), yada bunun yüzde biri olan (1 cP = 0,01 P) centipoise (cP) veya Saybolt Üiversal Viskozite (SSU) ile ölçülür (Çağlayan, 1997).

İngiliz-Amerikan sisteminde dinamik viskozitenin birimi;

$$\frac{\text{pound} \times \text{s}}{(\text{inch})^2} = 1 \text{ reyn} = 10^6 \mu \text{ reyn} \quad \text{olarak adlandırılır.}$$

Diğer bir viskozite tarifi'de *Kinematik viskozite* olup dinamik viskozitenin yağın yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilen tanımdır.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta g}{\gamma} \quad (4.4)$$

Olarak ifade edilir. Burada (η) dinamik viskozite, (ρ) kütle yoğunluğu, (g) yerçekimi ivmesi ve (γ) özgül ağırlıktır. Kütle yoğunluğu ile özgül ağırlık arasında

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{bağıntısı vardır.}$$

Kinematik viskozitenin boyutu ($\frac{L^2}{T}$) dır. ve

$$\frac{1 \text{ cm}^2}{\text{s}} = 1 \text{ st (stokes)}$$

olup (0,01) st=1cst (centistokes) olarak adlandırılır.

$$(1 \text{ st} = \frac{1 \text{ cm}^2}{\text{s}} = 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = \frac{1}{929} \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{s}}) \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Almanya'da viskozite daha çok ENGLER derecesi ile gösterilir ve aşağıdaki esasa göre tayin edilir;

$$E^0 = \frac{100 \text{ cm}^3 \text{ yağın akma zamanı}}{100 \text{ cm}^3 \text{ suyun } 20^\circ \text{C'de akma zamanı}}$$

Bugün viskozite dünya çapında kabul gören ISO standardına göre hesaplanmaktadır. Viskozite 40°C de (Centistoke) mm²/s ile mutlak *Kinematik viskoziteyle* ifade ediliyor. ASTM D 445, ISO 3104 (NF T 60-100).

TAN (Toplam Asit Sayısı); bir gram yağ içerisinde mevcut olan organik veya mineral asitlerin nötralize olması için gerekli potas (KOH) miktarının miligram cinsinden belirlenmesidir. Katkı maddeleri ilave edilmiş yağlar TAN değerine sahiptir. Bu değer katkı maddelerinden kaynaklanmakta olup hiçbir risk oluşturmamaktadır. Yağın işlevini yapıp yapmama yönünde önemli bir göstergedir. Yorumlanması hassas konudur, tecrübe ve deneyim gerektirir. ASTM D 974, ISO 6618 (NF T 60-112).

Renk; Yansıma rengi veya saydam rengi olarak ortaya çıkar Naftinik veya Aromatik yağlar yeşil, Parafinik yağlar mavi renk yansıma verir. Yağın rengi saydamlığından ölçülür. 0 dan 8 kadar 0,5'lik birimlerde düzenlenmiştir. Uygulamada yağın yeterliği ve kirlenme derecesi hakkında bilgi verir. ASTM D 1500, ISO 2049 (NF T 60-104).

Viskozite İndeksi; yağın viskozitesi sıcaklığa göre değişir. Viskozite indeksi biri 0 diğeri 100 olacak şekilde işleme tabii tutulan iki referans yağı kullanılarak hesaplanmış bulunan bir konvansiyonel sayı ile ifade edilir. Viskozite indeksi büyük olan yağlar viskoziteleri sıcaklık etkisi ile daha az ölçüde değişim gösteren yağlardır. ASTM D 2270, ISO 2909 (NF T 60-136).

Yoğunluk; Bir sıvının belli bir sıcaklıktaki belli hacminin ağırlığıdır. Petrol ürünleri için 15 °C 'de kg/m³ veya gr/cm³ cinsinden ifade edilir. ASTM D 1298, ISO 3675 (NF T 60-101).

Analın Noktası (°C); yağın sızdırmazlık elemanlarına davranışı yani, analin noktası bir yağlayıcının lastik contalara etkisinin belirleyici niteliğini oluşturmaktadır. ASTM D 611, ISO 2909 (NF T 60-136).

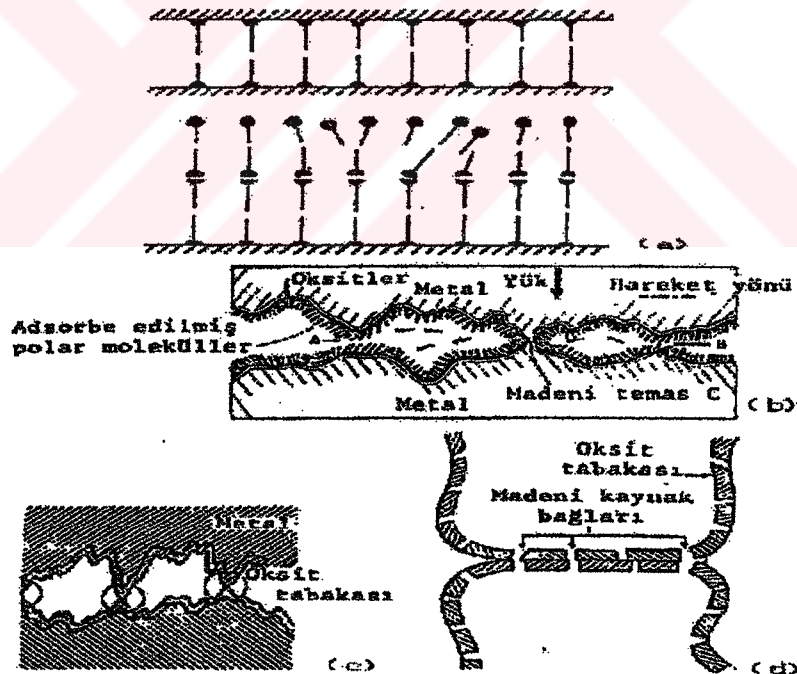
Parlama Noktası (°C); Alev ile karşılaştığında yağ buharının yandığı sıcaklık derecesidir. ASTM D 92, ISO 2592 (NF T 60-118).

Akma Noktası (°C); Normaliz'e edilmiş koşullar altında yağın çalkalama ve sallama olmaksızın soğutulması durumunda hala akıcılığını sürdürdüğü en alçak sıcaklık derecesidir. ASTM D 97, ISO 3016 (NF T 60-105).

Yağlama durumu büyük önem taşımaktadır. Geniş çapta yapılan araştırma ve incelemenin sonucu olarak dişli setine uygun kuvvet, wear (aşınma) direnci ve scuffing (soyulma) direnci ile birlikte tasarlanmalıdır. Bu nedenle dişli çarkların yağlama teorisinin esaslarını; yağın fiziko-kimyasal etkisi, sürtünme ve yağlama koşulları, Elasto-hidrodinamik teorisi, sıcaklık, hız ve yüzeylerin kalitesi gibi konular oluşturmaktadır. Bu konuların araştırılması yapılmış ve tez amacına uygun sonuçlar araştırılmıştır.

4.1. Yağın Fiziko-Kimyasal Etkisi

Metalik yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yağın bu özelliğine yapışma kabiliyeti denir. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır.



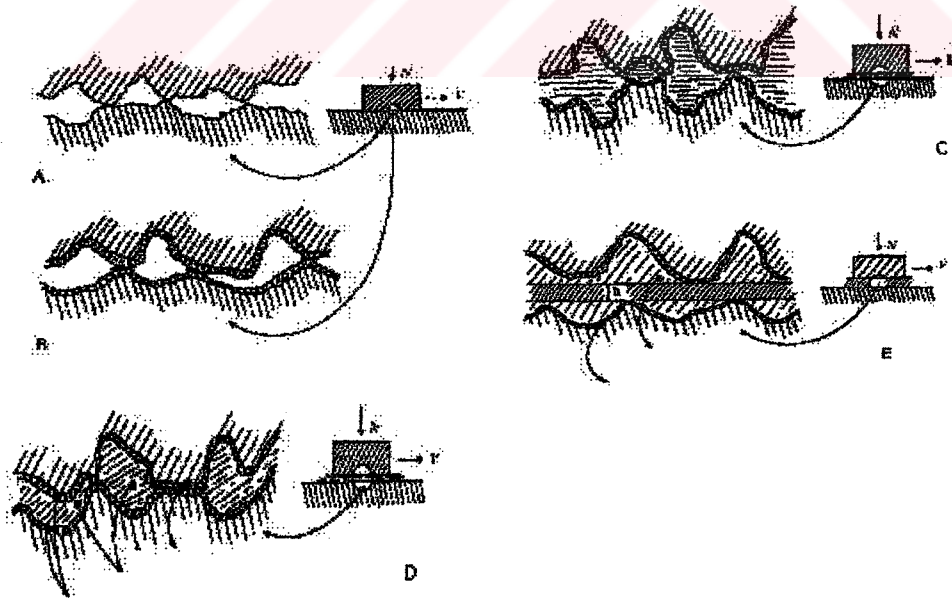
Şekil 4.2 Metalsel yüzeyler üzerinde yağın fiziksel etkisi (Akkurt, 1990)

Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kullanıldığında adsorbasyon tabakaları oluşmaktadır (Şekil 4.2a,b). Yapışmış yağ tabakası bir ölçüde metalik yüzeylerin doğrudan doğruya temas etmesini engeller (Şekil 4.2c). Ancak yük tatbik

edildikten sonra tabaka'nın bir kısmı kopar (Şekil 4.2d) ve burada metalik kısımlar oluşur. Bu küçük temas alanlarında, sürtünme ve aşınmaya neden olur. Mikro kaynak şeklinde metalik bağlar meydana gelir.

4.2. Diş Yüzeylerinde Sürtünme ve Yağlama Koşulları

Aşınma ve sürtünme bakımından yapışmış yağ tabakalarının kopma mukavemeti ve kayma mukavemeti önem taşımaktadır. Yapışmış tabakanın kopma mukavemeti metalik yüzeylerin temas etmesini ve dolayısı ile aşınma olayının meydana gelmesini engeller. Bu bakımdan kopma mukavemeti yapışmış yağ tabakasının yük taşıma kabiliyetini belirler; kopma mukavemeti büyüdükçe yapışmış yağ tabakasının yük taşıma kabiliyeti de büyür. Sürtünme bakımından yağ tabakasının kayma mukavemetinin küçük olması istenir. Bu değer ne kadar küçükse sürtünme katsayısı o kadar daha küçüktür. Dişli sıcaklıklarının ve gerilmelerinin dönme yağlama koşullarına bağlı olduğu diş yüzeyleri üzerinde sürtünme koşullarıyla genişçe karakterize edildiği gibi, ilgili faktörleri kısaca şekillerle açıklamak gerekirse; (Bartz, 1993).



Şekil 4.3 a.b.c.d.e. Sürtünme ve yağlama koşulları

Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi çıplak yüzeylerin sürtünmesi, yüzey kılıfına sahip olmayan direk temasıyla karakterize edilmektedir. Kuru sürtünme olarak kabul

edilebilir. Sürtünme sürecinin herhangi bir şekilde uygun görülmediği gibi sürtünme ve yorulma değerleri de yüksektir. Bu sürtünme durumu tabiki metal çalıştığında aşırı yorulmakta ve isteyerek veya istemeyerek metal yüzeylerin aşınmaya maruz kalmaları diyebiliriz (Şekil 4.3a).

Şekil 4.3b’de yüzey kılıfı sürtünmesi emilen gaz kılıfları veya sıvı veya kimyasal reaksiyon kılıflarına sahiptir. Sürtünme sürecini destekler ve sürtünme ve yorulmayı azaltırlar. Böylece çıplak metalin aşırı yorulmadan ve sonrasındaki parçalanmadan korunurlar. Şekil 4.3c’de yüzey kılıfı ve sıvı sürtünmesinde yüzey yorulması, sürtünme ve temas yüzeyinde oluşan ısıyı azaltırlar. Böylece çıplak metalde soğutucu görevi görerek yorulmadan ve sonrasındaki parçalanmadan korunurlar.

Karışık sürtünme sürecinin sıvı sürtünmede olduğu gibi katı-cisim sürtünmesiyle karakterize edildiğinden karışık sürtünme olarak da adlandırılır (Şekil 4.3d). Bu bölgede sürtünme ve yorulma hem kimyasal ve fiziksel reaksiyonlarla sürtünme yüzeyleri üzerinde koruma filmleri üretmede yağın kabiliyeti hem de yoğunluk karakteristiklerince etkilenirler.

Şekil 4.3e’de sıvı ve gaz sürtünmesi yağ tabakasındaki iki çift arasında üretilen basınçlar, dış kuvveti dengelemede yeterli ise, yüzeyler tamamen ayrılır ve sonuçta hiçbir direk temas oluşmaz. Sürtünme işlemi iki katı cisim arasındaki temas düzleminden bir sıvı tabakaya doğru yer değiştirmiştir. Genel sonuç bu bölgede aşınmanın bağımsız olduğudur. Bu durum, sürtünme noktalarındaki temas filmi üretildiği sürece Hidro-dinamik yağlama olarak adlandırılır. Tek belirgin yağlama karakteristiği viskozite veya akış işlemini karakterize eden diğer bir değerdir (Bartz, 1993).

4.2.1 Ortalama sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayıları, doğal olarak temas yolu boyunca değişen, sürtünme kayıpları için önemlidir. Dişli testlerinin temelinde mineral yağlar için ortalama sürtünme katsayısı hesabı için ampirik bir denklem geliştirilmiştir (Bartz, 1993).

$$\mu_m = 0,045 \frac{(K_A F_{bt} / b)^{0,2}}{v_{\Sigma C} \zeta_C} \eta_{oil}^{-0,05} X_R \quad (4.5)$$

$$X_R = 3,8 (R_a/d_o)^{2,85} \quad (4.6)$$

F_{bt} / b = Diş genişliğine bağlı çevresel kuvvet (lbf)

K_A = DIN 3990 Bölüm 2.'ye göre yük faktörü

$v_{\Sigma C}$ = Toplam hız (m/s)

ζ = Eğrilik yarı çapı (mm)

η_{oil} = Yağın işletme sıcaklığındaki dinamik viskozitesi (MPa s)

X_R = Pürüzlülük katsayısı

Mineral yağlar için ölçülen sürtünme katsayılarıyla kıyaslama iyi bir korelasyon gösterir. Bununla beraber sentetik yağlar için daha düşük sürtünme katsayıları bulunmuştur. Sürtünme dişli setlerinde bulunan özel akışkanlar için aşırı derecede yüksek sürtünme katsayıları da görülebilir (Bartz, 1993).

Aşınmayı azaltan ve scuffing'e karşı koyucu katkı maddeleri sürtünmeyi azaltmaz. Bu durum hipoid yağlar ile C, CLP mineral yağların kıyaslamasında görülür

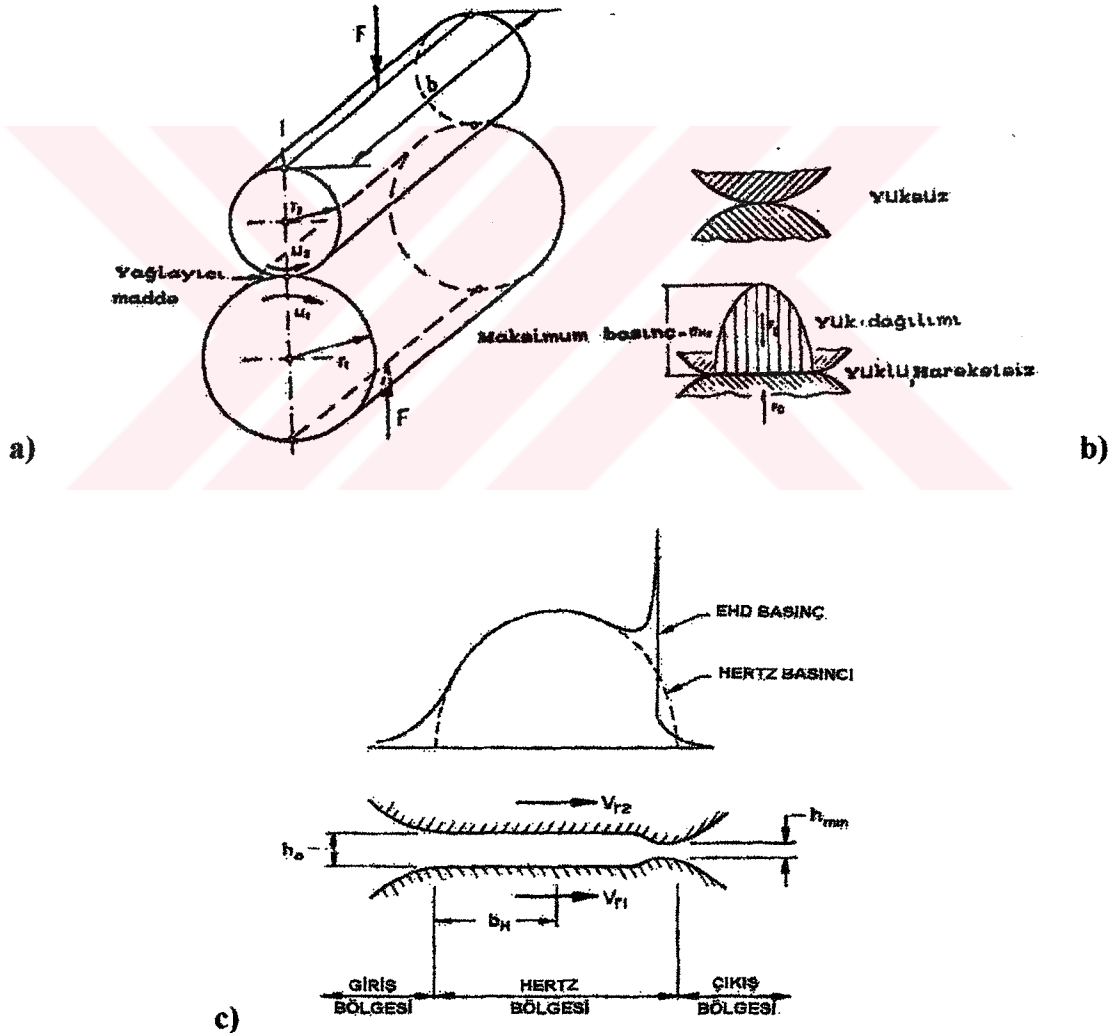
4.3. Elasto-hidrodinamik Yağlama Teorisi;

Elasto-hidrodinamik yağlama dişli çarklarda önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek hız ve yüklerde çalışan dişli çarklarda bu yağlama yük taşıma kabiliyetini tayin etmektedir. Yüzeyler aynı anda bir yağ filmi tarafından ayrılmakta ve elastik şekil değişimleri göstermektedir.

Elasto-hidrodinamik teorisinde bir kuvvetin etkisi altında temasta bulunan kendi eksenleri etrafında dönme hareketi yapan iki silindir esas alınmaktadır (Şekil 4.4a). Silindirler hareketsiz ve aralarında hiç yağ bulunmadığı durumda, temas alanında hertz tipi yüzey basınçları meydana gelmektedir (Şekil 4.4b). Silindirler hareketli ve aralarında yağ tabakasının bulunduğu durumda, yağ tabakasının basınç dağılımı,

kuru temas durumundaki hertz basınç yayılımına benzemektedir (Şekil 4.4c). Yüksek basınç bölgesinde yağ tabakasının kalınlığı sabit olup, çıkışa yakın bir bölgede daralma göstermekte ve buradaki daralma minimum yağ tabakasını oluşturmaktadır.

Şekil 4.4.c' de bir dişli çifti arasındaki temas bölgesini anlatmaktadır. Aynı zamanda elastik olarak deforme olan dişlilerin şeklini temas bölgesinde gelişen basınç dağılımı göstermektedir. Artan basıncın neden olduğu, yağ viskozitesinin artışı yağın temas bölgesi olarak adlandırılan yüksek basınç içerisinde yağ bir yere kaçamaz çünkü viskozite, yağ gerçekten sert katı olduğu bir yoğunluğa yükselir.



Şekil 4.4

- a – Paralel eksenli silindirler
- b – Yağsız temasta basınç dağılımı (hertz tipi)
- c – Yağlı temasta basınç dağılımı.

Dawson ve Higginson'a bağılı olan aşağıdaki temas çıkışının yakınlarında oluşan minimum film kalınlığını (h_{min})'i vermektedir (Wilfried, 1993; Erichello, 1990).

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{\rho} = 2,65 \cdot G^{0,54} \cdot U^{0,7} \cdot W^{-0,13} \quad (4.7)$$

Bu bağıntıyı dişli çarklarda uygulayabilmek için Elasto-hidrokinamik film kalınlığı hesaplamasında kullanılan (G) malzeme parametresi, (U) hız parametresi, (W) yük parametresi ve iki yüzeyin eşdeğer eğrilik yarıçapı (ρ)'nun hesaplanması gerekir.

Malzeme parametresi;

$$G = \alpha \cdot E \quad (4.8)$$

α basınç viskozite katsayısı Şekil 4.6 den buluna bilinir.

$$E = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \text{ den elde edile bilinir.}$$

Hız parametresi;

$$U = \eta_o \frac{n}{E \cdot \rho} \quad (4.9)$$

η_o mutlak viskozite Şekil 4.5 viskozite sıcaklık diyagramından elde edilebilir. Düz dişliler için iki yüzeyin aktif çevresel hızı (u) bulmak için;

$$u = \frac{\pi n_1}{30} \left(\frac{a}{i+1} \right) \sin \alpha \quad (4.10)$$

Birleşik yüzey eğrilik yarıçapını bulmak için;

$$\rho = \frac{2}{\sin \beta_n} \cdot \left(\frac{1}{d_{0,1}} + \frac{1}{d_{0,2}} \right) \text{ veya } \rho = \frac{a \cdot i \cdot \sin \beta_n}{(i \pm 1)^2} \quad (4.11)$$

Yük parametresini bulmak için;

$$W = \frac{\omega}{E \cdot \rho} \quad (4.12)$$

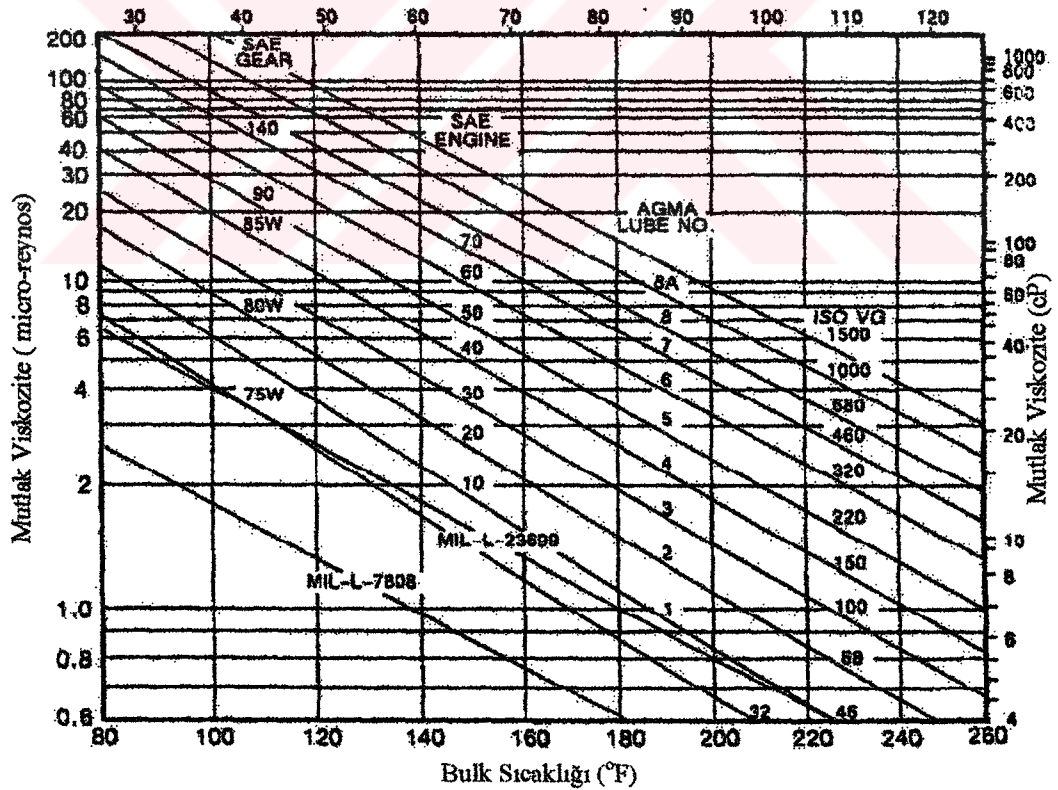
$$\omega = \frac{F_n}{b} \text{ spesifik dik diş kuvvetidir.}$$

Spesifik film kalınlığı şöyle verilir ki;

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\Sigma R_q} \quad (4.13)$$

R_q = kompozit yüzey pürüzlülüğü;

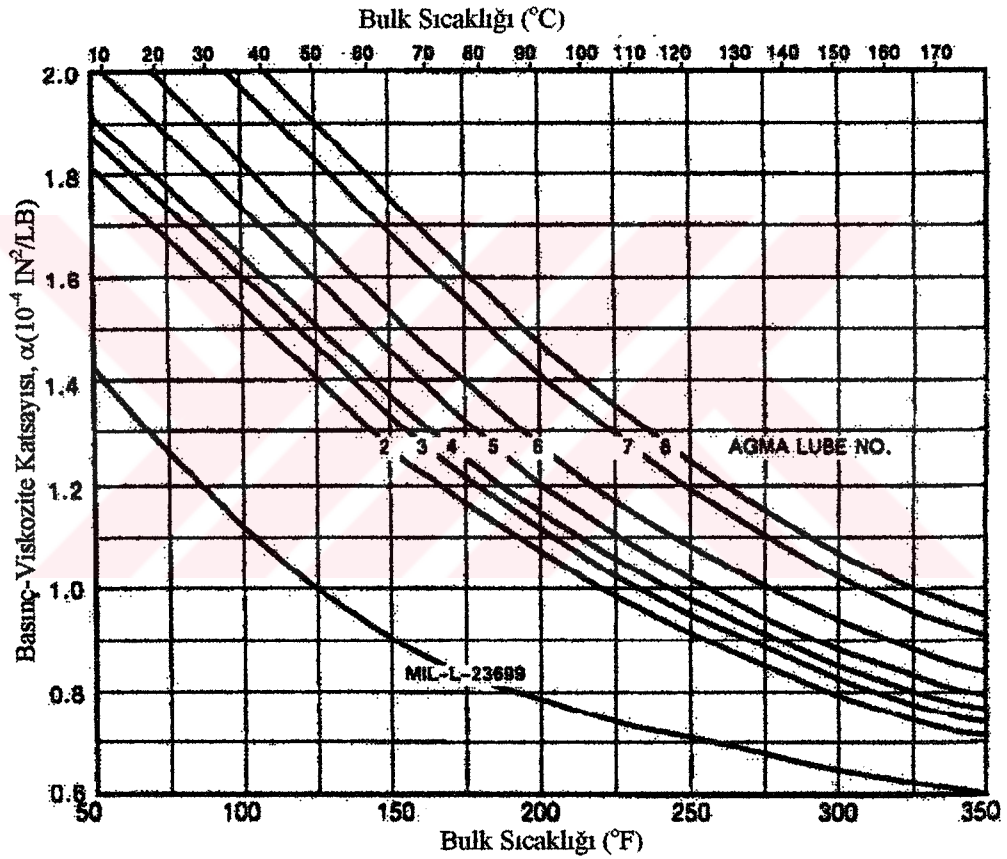
$$R_q = (R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{0.5} \text{ olarak bulunur.} \quad (4.14)$$



şekil 4.5 95 viskozite indeksli tipik mineral dişli yağları için viskozite sıcaklık diyagramı

η_0 mutlak viskozite Reyns(lb.sec/in²), Şekil 4.5'da 95 viskozite indeksli tipik mineral dişli yağları için viskozitenin sıcaklığa bağlı ortalama değerini göstermektedir.

α = basınç - viskozite katsayısı (in²/lb). Tipik dişli yağları için basınç viskozite katsayısı $\alpha=0,05 \cdot 10^{-4}$ den $\alpha=2 \cdot 10^{-4}$ in²/lb'ye kadar bir aralıkta değişmektedir. Tipik dişli yağları için basınç viskozite katsayısının sıcaklığa bağlı değişiminin verileri Şekil 4.6'de verilmiştir.



Şekil 4.6 Mineral dişli yağlar için basınç - viskozite katsayısına karşılık gelen sıcaklık

$$h_{\min} = \frac{2,65 \alpha^{0,54}}{E^{0,03} \omega^{0,13}} \left(\eta_0 \frac{m_1}{30} \right)^{0,7} (a \sin \beta_n)^{1,13} \cdot \frac{i^{0,43}}{(i \pm 1)^{1,56}} \quad (4.15)$$

Yapılan araştırmalara dayanarak diş profilleri arasında meydana gelen yağ tabakası kalınlığı hakkında şu sonuçlar elde edilir.

1. Verilerin bir yük ve yuvarlanma hızı için Hidrodinamik teorisine göre tayin edilen yağ tabakasının kalınlığı, gerçek değerlere göre çok daha büyük değerler vermektedir. Elasto-hidrodinamik teorisi ile elde edilen değerler gerçek değerler mertebesinde dir.
2. $G = \alpha E$ malzeme faktörünün film kalınlığının üzerine etkisi, hız faktörlerinden daha büyüktür.
3. Elastik şekil değiştirmede önemli olduğu bölgede, film kalınlığı çok az yüke bağlıdır.
4. Yük büyüdükçe ve/veya hız faktörü azaldıkça, basınç yayılımı, rijid silindirlere karşılık gelen hidrodinamik yayılıştan, kuru silindirler arasında meydana gelen yarı eliptik hertz basınç yayılımına geçmektedir.
5. Çıkış kısmına doğru kaymanın mevcut olduğu durumlarda basınç dağılışı keskin bir tepe göstermektedir.
6. Elasto-hidrodinamik yağlamada, olayını ifade eden denklemlerin tam bir çözümü henüz elde edilmemiştir. Tam çözüm hidrodinamik, elastisite ve viskozite – sıcaklık-basınç denklemlerinin aynı anda, yani termal bir çözümle mümkündür.
7. Elasto-hidrodinamik teorisinde, Dowson ve Higginson'un buldukları sonuçlar oldukça gerçeğe yakın değerler vermektedir. Dolayısıyla pratik uygulamalarda bu denklemler başarı ile kullanılabilir.

4.4. Film Kalınlığının Hesaplanması İçin Prosedür

Dişli dizaynına, Elasto-hidrodinamik yağlama uygulandığında aşağıdaki prosedür kullanılmalıdır.

- Hız, yük, Elastisite modülü ve eğri için efektif değerler hesaplanmalı.
- Efektif sıcaklık belirlenmeli
- Viskozite ve basınç – viskozite katsayısını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmeli
- Film kalınlığı hesaplandıktan sonra (analitiksel ve grafiksel) olarak belirlenmeli

- Film kalınlığını zirve yarık yüksekliğiyle karşılaştırılarak scoring direnci hesaplanmalı.

4.5. Film kalınlığı ve hasar kriteri

Film kalınlığı ve hasar kriteri diye adlandırılan spesifik film kalınlığı hasar kriteri olarak tanımlanır ki örnek olarak yorulma ve scoring'in önlenmesi için minimum film kalınlığı yetirence genişse scoring yorulması olmaz. Burada spesifik film kalınlığı Elasto-hidrodinamik scoring direncine eşit yapmak gereklidir. Böylelikle;

$$S_{FEHD} = \lambda$$

Hasarı önlemede λ 'yı birden oldukça büyük yapmak arzu edilir. Spesifik film kalınlığı λ şu şekilde tanımlanır.

$$\lambda = \frac{\text{Yağ film derecesi } (h_{\min})}{\text{Yüzey pürüzlülüğü } (R_q)} \quad (4.16)$$

Birleştirilen yüzey pürüzü (R) iki farklı yüzeyin her bir pürüz değeri R_1 ve R_2 'den belirlenir.

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (4.17)$$

$5 \leq \lambda \leq 100$ Hidrodinamik yağlayıcı

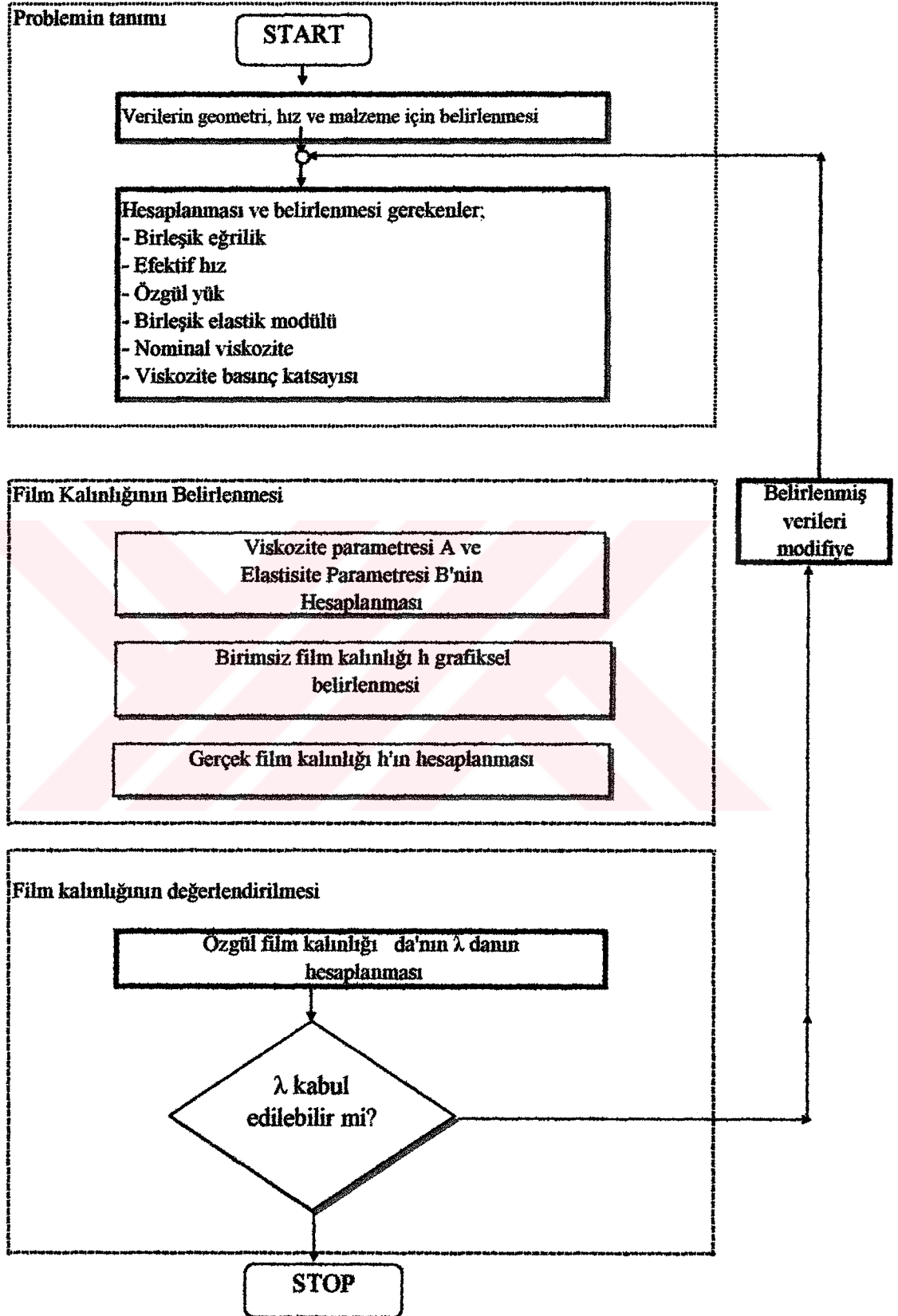
$3 \leq \lambda \leq 5$ EHD yağlayıcı

$1 \leq \lambda \leq 3$ Kısmi yağlama

$\lambda < 1$ Sınır yağlama

Şekil 4.7'de bu prosedür için bir akış diyagramı verilmiştir (Bartz, 1993).

Daha pratik bir çözüm elde etmek için VISUAL BASIC de programı yazılmış ve programın taşına bilir olması için exe dosyası oluşturulmuş ve her türlü hesaplama için pratik olarak tabloya dönüştürülmüş hali EK 4 de verilmiştir.



Şekil 4.7 Yağ tabakasının kalınlığının hesaplanması için akış diyagramı

4.6.Yüzey Basıncının Aşınmaya Olan Etkilerinin İncelenmesi

Yüzey yorulmasından dolayı oluşan aşınmaya yağlayıcının mukavemet etkisi göz önünde bulundurulduğunda, çatlak oluşumunun yapıdan veya malzemenin içinden etkilenmesine göre, yağlayıcının pitting üstüne muhtemel etkileri özetlemek gerekirse (Özkan, 1992; Tümkor, 1995; Verlag, 1987 ; Wilfried, 1993).

İç çatlak oluşumunu azaltma için;

-Daha yüksek nominal hız

-Viskozite basınç katsayısını artırma

-Viskozitenin sıcaklık bağıntısını azaltma

Yüzeyden Başlayan Çatlak Oluşumunu Azaltma;

- Uygun çalışma viskozitesi

- Uygun yağlayıcı tipi

- Uygun yağlayıcı katkıları

Kullanılarak kuru sürtünme katsayısı azaltılabilir.

- Yüksek çalışma Viskozitesi

- Uygun yağlayıcı Katkıları

Kullanılarak çatlaklardaki patlayıcı etki azaltılabilir.

4.7. Yük Taşıma Kapasitesi ve Hesaplanması

Bir dişli setinin tasarım işlemleri yapılırken dişli değerleri belirlendikten sonra dişlinin yük taşıma kapasitesinin hesaplanması gerekir. Yük taşıma kapasitesi hesaplanırken yağlayıcının etkisini de göz önüne almak gerekir. Çizelge 4.1' de basitleştirilmiş biçimde malzemenin, tasarım çalışma şartları ve yağlayıcının dişli yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Kırılma direnci yağlayıcıdan etkilenmektedir. Diğer taraftan pitting dolaylı olarak dişli yağına bağlıdır. Dişli yüzeyindeki scuffing belli bir dereceye kadar uygun dişli yağı seçilerek önlenebilir. Dişlilerde en çok rastlanan pitting direnci hesaplanmalıdır.

Çizelge 4.1 Dişlilerin yük taşıma kapasitesi üzerine malzeme, yağlayıcı, tasarım ve çalışma şartlarının etkisi gösterilmiştir.

Direnç	Malzeme	Tasarım çalışma şartları	Yağlayıcı
Diş kırılması	x	x	-
Pitting	x	x	(x)
Scuffing	(x)	x	x
Aşırı sıcaklık	-	x	x
x Etkilenebilir (x) Bir dereceye kadar etkilenir - Etkilenmez			

Dişli çarklarda aşınma türü olarak en çok görülen pitting hasarını DIN standardına göre hesaplamak gerekirse;

Pitting Direncinin Hesaplanması;

Pitting oluşumunun ana sebebi malzeme için hesaplanmış maksimum Hertz gerilmesinin aşılmasıdır. DIN 3990 Bölüm 2 Metot B Standardına göre diş yüzeyi yük taşıma kapasitesinin hesaplanması dişliyi zarardan korumak için Hertz (yüzey) gerilmesine bağlı olarak hesaplanır.

Diş yüzeyi gerilmesinin hesaplanması;

İzin verilebilir diş yüzeyi gerilmesi hem küçük dişli pinyon için hem de dönderilen büyük dişli için hesaplanmalıdır. Sürekli mukavemet halinde müsaade edilen yüzey basıncı (σ_{HP}) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{HLim} Z_n}{S_{Hmin}} (Z_L Z_R Z_V) Z_W Z_X \quad (4.18)$$

(Z_L , Z_V , Z_R) değerleri birbirine bağlı olarak diş yüzeyi yük taşıma kapasitesinde yağ filminin etkisini göstermektedir.

Yağlayıcının Pitting Direncine Etkisi;

Diş yüzeyleri arasındaki yağlayıcı film dişlerin yük taşıma kapasitesini etkiler.

Yağlayıcı filmin oluşması ve minimum yağlayıcı film kalınlığının hesaplanması temel olarak aşağıdaki değerlere bağlıdır.

- Yağlayıcı faktörü
- Yüzey pürüzlülüğüne
- Hız faktörüne
- Yük faktörüne
- Eşdeğer eğrilik yarıçapına

Yağlayıcı faktörü (Z_L): EP-Katkılı mineral yağlar için viskozite ve düşük mukavemetli dişlerin yüzey emniyet gerilmesi değerine bağlı olarak bu faktör DIN normunda şu şekilde verilmiştir.

$$Z_L = C_{ZL} + \frac{4(1,0 - C_{ZL})}{(1,2 + 80/V_{50})^2} = C_{ZL} + \frac{4(1,0 - C_{ZL})}{(1,2 + 134/V_{40})^2} \quad (4.19)$$

Yağlama sabiti aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$C_{ZL} = \frac{\sigma_{HLim}}{4375} + 0,6357 \quad (4.20)$$

$$\text{Burada; } 850 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{HLim} \leq 1200 \text{ N/mm}^2 \quad (4.21)$$

$$\sigma_{HLim} \leq 850 \text{ N/mm}^2 \text{ için } C_{ZL} = 0,83$$

$$\sigma_{HLim} \geq 1200 \text{ N/mm}^2 \text{ için } C_{ZL} = 0,91$$

Bu değerler EP katkıları olsun veya olmasın mineral yağlar için geçerlidir. Daha düşük sürtünme oluşturan bazı sentetik yağlar için, Z_L yüzey sertleştirilmiş dişliler

için 1,1 katsayısı ile su verilip menevişlenmiş dişliler için 1,4 katsayısıyla çarpılır. Yağlayıcı faktörü yumuşak olan malzemenin yüzey basıncı için sürekli mukavemet değeri σ_{HLim} 'e bağlı olarak EK 5'deki cetvel 3'dende alınabilir.

Yüzey Kalitesi (Yüzey pürüzlülüğü faktörü) (Z_R): Yüzey pürüzlülüğü yağ filmi kalınlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha pürüzlü yüzeyleri birbirinden ayırtabilmek için daha yüksek viskozitede ve daha kalın yağ filmi gerekli olmaktadır. Yüzey kalitesinin artması ile daha düşük viskoziteli yağlarla başarılı bir yağlama yapılabilmektedir.

Normlara bağlı olarak şu şekilde ifade edebiliriz;

$$Z_R = P_R^{C_{Zr}} \quad (4.22)$$

$$P_R = 1,29 / (R_{Z1} + R_{Z2}) \cdot a^{1/3} \quad \text{veya} \quad (4.23)$$

$$Z_R = \left(\frac{3}{R_{Z100}} \right)^{C_{Zr}} \quad (4.24)$$

$$R_{Z100} = R_Z \sqrt[3]{\frac{100}{a}} \quad (4.25)$$

$$R_Z = \frac{R_{Z1} + R_{Z2}}{2} \quad (4.26)$$

Yorulma dayanımına bağlı olarak pürüzlülük sabiti aşağıdaki formülle hesaplanır;

$C_{Zr} = 0,32 - 0,0002 \sigma_{HLim}$ bağıntısından

$$850 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{HLim} \leq 1200 \text{ N/mm}^2 \quad \text{için} \quad (4.27)$$

$$\sigma_{HLim} \leq 850 \text{ N/mm}^2 \quad \text{için} \quad C_{Zr} = 0,15$$

$$\sigma_{HLim} \geq 850 \text{ N/mm}^2 \quad \text{için} \quad C_{Zr} = 0,08 \text{ alınabilir.}$$

Yumuşak olan malzemenin yüzey basıncı için sürekli mukavemet değeri σ_{HLim} 'e bağlı olarak EK 5'deki cetvel 2'dende alınabilir.

Hız faktörü Z_v : Çevre hızına ve bir çark çiftinin daha yumuşak olan malzemenin yüzey basıncı için sürekli mukavemet değeri σ_{HLim} 'e bağlı olarak EK 5 teki cetvel 1 den alına bilinir, veya aşağıdaki bağıntılardan kolaylıkla elde edile bilinir. Hız faktörü Z_v farklı sertlikteki çarklardan oluşan çiftlerde, daha yumuşak olan malzeme esas alınır.

$$Z_v = \frac{C_{zv} + 2(1,0 - C_{zv})}{(0,8 + \frac{32}{v})^{0,5}} \quad (4.28)$$

Hız sabiti için pratikte $C_{zv} = C_{zL} + 0,02$ alınabilir.

4.8. Dişli Yağ Viskozitesinin Seçimi

Gerekli viskozitenin belirlenmesi DIN 51509'na göre rediktörlerde kullanılan yağ cinsinin seçimi dişli şekline göre belirlenmiştir. Alın ve konik dişli mekanizmaları için kuvvet-hız faktörüne göre kinematik viskozitenin seçimi Şekil 4.8'dan yapılır (Klüber Lubrication, 1999; Rende, 1997).

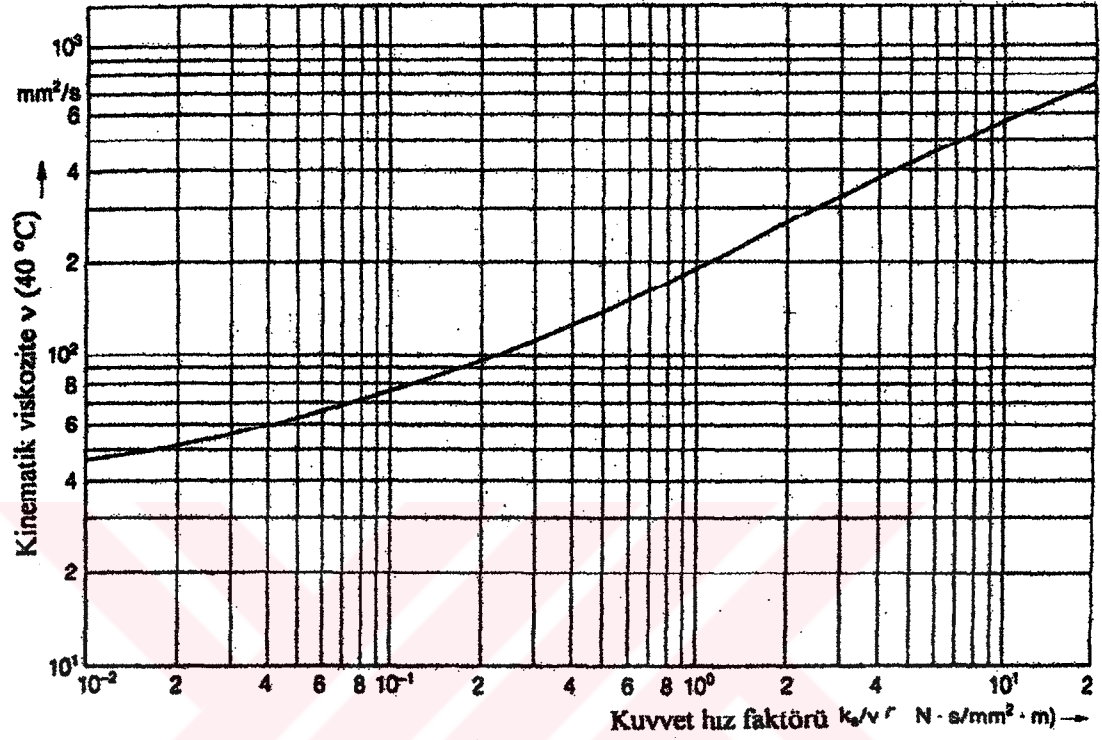
Kuvvet-Hız faktörü (k_s/v) ;

$$\frac{k_s}{v} = \left[\frac{Fu}{b \times d_1} \times \left(\frac{i+1}{i} \right) \times Z_H^2 \times Z_\epsilon^2 \right] \times K_A / v \quad [\text{N/mm}^2, \text{MPa}] \quad (4.29)$$

5000 fpm (fit por minit)'ye kadar çıkan taksimat dairesi çizgisel hızında çalışan kapalı dişli sürücüler için yağ seçerken AGMA 250.04 (20)'nün önerileri takip edilmelidir. Yüksek-hızlı sürücüler (>5000 fpm) için AGMA 421.06 (21) önerilerine başvurmak gerekir (Erichello, 1990).

Kritik uygulamalar için, spesifik film kalınlığı Dawson ve Higginson eşitliğiyle hesaplanmalıdır. Spesifik Film kalınlığı yağ rejiminin kullanışlı bir ölçümüdür. Aşınma-ilişkili yüzey güvenliğinin (alarm'ının) olasılığına yaklaşık olarak Şekil 4.8 ile birlikte kullanılabilir. Şekil 4.8'da dişli sürücülerinin yüzlerce laboratuvar testinden

ve alan uygulamalarından elde edilen Wellauer ve Hollaway'in verileri üzerine kuruludur (Erichello, 1990).

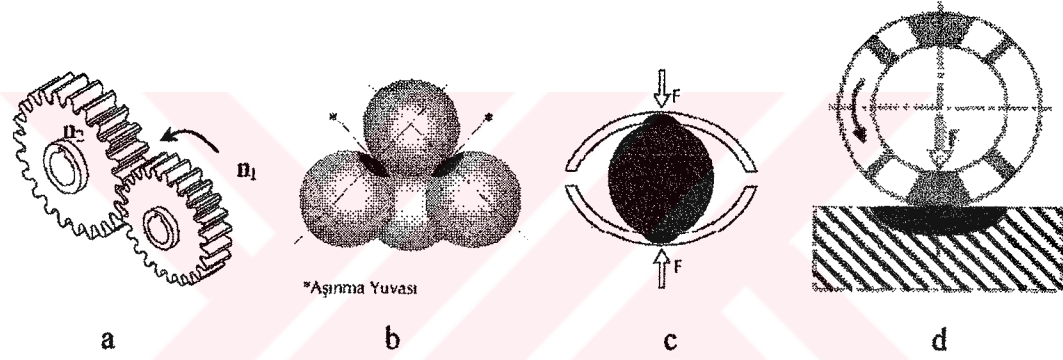


Şekil 4.8 Alın ve konik dişliler için kuvvet - hız faktörüne göre viskozite seçimi

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Mekanik–Dinamik Testler

Mekanik-Dinamik testlerin amacı yağlama yağının gerçek kullanım şartlarına benzer şartlar altında test etmektir. Hertz tipi gerilmelerin meydana geldiği temas alanlarında deneysel olarak yağın etkisini incelemek için soyut model, deney model ve gerçek deney sistemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Soyut model yöntemi Şekil b,c,d gibi sistemlerden meydana gelmektedir.



Şekil 5.1 a,b,c,d. Deney model ve soyut model deney yöntemleri (Klüber, 1996)

Dört Bilye Testi; DIN 51 350, bölüm 4 ve 5 de tanımlanan yağlama yağının testinde kullanılan düzendir. Bu düzende uygun yük ve yağın kaynak yükü parametresi tanımlanır. Dört bilye piramit şeklinde test makinesine yerleştirilir. Üsteki bilye döndürülür. Dört bilye birbirine kaynak oluncaya kadar yük artırılabilir. Yukarıda uygun yük olarak ifade edilen yük, kaynamanın olmadığı maksimum yüküdür. Test başladığından bir saat sonra üç sabit bilyenin küresel girintilerinin ebadı ölçülür. Bu ölçüm aşındırma parametresi olarak tanımlanır ve bu isim altında değerlendirilir. Bu test sonuçları mekanik elemanlar için yağlayıcının davranışı hakkında bilgi vermez (Şekil 5.1b).

Almen-Wieland Testi; Bu test yağlayıcının hem normal şartlar altında hem de sınır ve kavrama sürtünme şartları altında yük taşıma kapasitesini ve aşınmaya karşı korunma karakteristiğini belirlemekte kullanılan bir özelliktir. Test, içine shaft ölçüsünden biraz

daha büyük iki çelik kabuk arasında yataklanmış döner şaftta hidrolik pres uygulamasıyla gerçekleştirilir (Şekil 5.1c). Testte otuz dakika içinde torkun kademe kademe artırılmasıyla önceden belirlenmiş kırılma noktasında şaft kırılıncaya kadar yük kademesi arttırılır. Fakat Almen-wieland testi geçerliliği olan standart bir test değildir.

Timken Testi; ASTM D 2509 olarak tanımlanan timken testi, yağlama yağının dayanabileceği aşırı yükü ve aşınmaya karşı koruyuculuğu ölçmek amacıyla oluşturulmuş 181302 SEP diye bilinen çelik demir yüzeyinden oluşan bir düzeneştir (Şekil 5.1d). Test de konik makaralı yatak yük altında temas bloğu boyunca kaydırılır. 10 dakika içinde sürtünmenin neden olduğu oluk artan yük kademesiyle de genişler. Değerlendirme kriteri olarak yük ve test uygulanan örneğin görünüşünden yararlanılır. Testin sonunda Newton cinsinden yağın ‘timken ideal yükü’ tespit edilebilir.

FZG Dişli Testi ; Dişli sistemlerde kullanılan yağlayıcıların Mekanik-Dinamik test metotları DIN 51 354 Bölüm 1 ve 2 de tanımlanmıştır. FZG dişli testinde sadece yağlayıcının basınç kapasitesi araştırılmaz. Dişli yağının sabunlaşma, korozyon koruma özellikleri de araştırılır (Şekil 5.1a). Sonuçta spesifik hız, spesifik yük ve spesifik aşınması belirlenebilir (Van Damme, 1990; Höhn, Döbereiner, 1999).

Deney model yöntemlerinde gerçek elemanlar kullanılmaktadır. Dişli çarklarda yağların etkisini incelemek için günümüzde en çok kapalı devre denilen ve Şekil 5.1a’da gösterilen yöntem kullanılmaktadır. Burada kapalı devre şeklinde iki dişli mekanizması kullanılmaktadır. Mekanizmalardan biri deneye tabi tutulan dişli çarklardan, diğeri bir burulma momenti meydana getiren dişli çarklardan oluşmaktadır. Burulma momenti bir kavramanın yardımı ile meydana getirilir. Bu sisteme dayanan fakat deney momentleri bakımından bir birinden farklı olan Ryder, IAE ve FZG olmak üzere üç sistem vardır. Ryder, Amerika’da; IAE, İngiltere’de ve FZG, Almanya’da patentli sistemlerdir (Hoehnetal., 2001; Klüber Lubrication, 1999).

Gerçek deney sisteminde sanayide çalışan dişli çark sistemleri kullanılmaktadır. Gerçeğe çok yakın olan bu deneyler gerek olayı etkileyen parametrelerin değiştirilmesi, gerekse çeşitli faktörlerin ölçülmesi çok zor ve karışıktır.

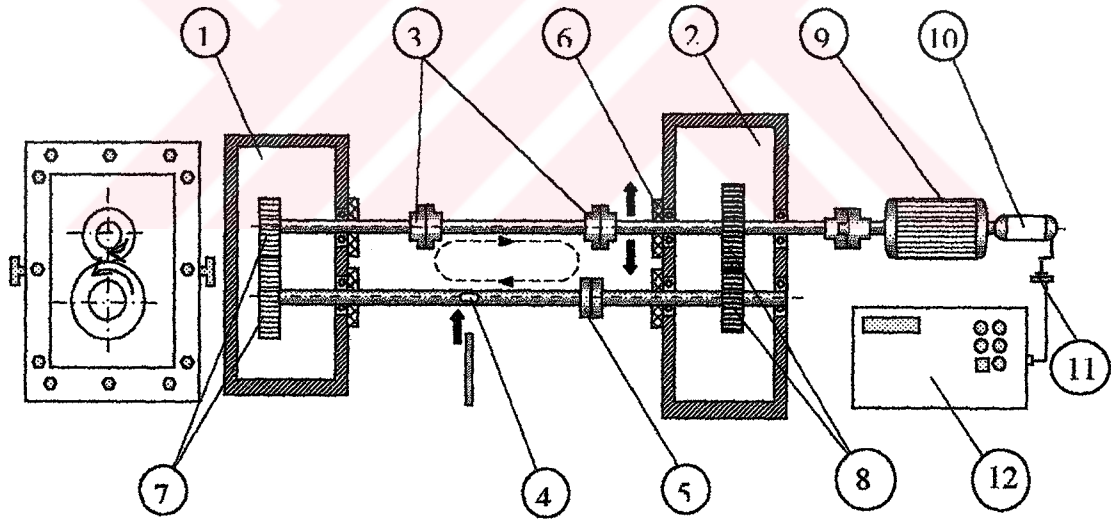
Yukarıdaki açıklamaların sonucunda anlaşıldığı gibi dişli çarklarda yağlama olayını incelemek için en uygun yöntem dişli çarklardan oluşan deney model sistemidir. Bu çalışmada bu sistem kullanılmıştır.

5.2. Deney Düzeneği

Planlanan deneyler, Şekil 5.2’de gösterilmiş olan kapalı devre güç dolaştıran dişli yorulma test düzeneği üzerinde yapılmıştır. Deney düzeneği aynı çevrim oranını sağlayan iki dişli kutusundan meydana gelir. Dişli kutuları arasındaki çıkış milinin burulmasıyla sistem yüklenmiş olur. Yükleme, düzenek hareketsizken yapılmaktadır. Yardımcı dişli kutusu ve motor arasında kalan mil parçasına bir adet cıvata takılması ve cıvatanın boyu ayarlanmış sabit desteğe denk getirilmesi suretiyle sistem hareketsiz kılınır. Daha sonra test dişli kutusu ve yardımcı dişli kutusu arasında bulunan, ucunda tork kalplini bağlı mil parçasına bir moment kolu vasıtasıyla ağırlık asılır. Böylece söz konusu mil parçası burulmuş olur. Ağırlık asılı haldeyken, tork kalplini üzerinde bulunan cıvatalar sıkılarak kapalı devre tamamlanır. Ardından sabitleme cıvatası çıkartılır. Bu sayede, burulan milin uğradığı açısal deformasyon kapalı devredeki tüm millere ve dolayısıyla dişlilere dağılmış olur. Yükleme için uygulanan burulma momentinin yönü, motorun dönüş yönünün aksi istikametindedir.

Düzeneği tahrik eden motor; Gamak marka, 3,2 kW gücünde, 3000 dev/dak’ ya çıkabilen trifaze elektrik motorudur. Düzenek mekanik aksamın haricinde gelişmiş bir kontrol panosuna da sahiptir. Tahrip motorunun devir sayısını, Telemekanique marka programlanabilir-dijital bir hız kontrol cihazı ile hassas ve çok kademeli bir şekilde ayırtmak mümkündür. Bu sayede devir sayısı’da bir parametre olarak çalışmaya dahiledile bilinir. Hız cihazı, yine programlanabilir – dijital omron marka sayacı ile ilişkilendirilmiştir. $\frac{1}{62}$ çevrim oranına sahip, küçük alüminyum kasa

Yılmaz marka redektör motor milinin modifiye edilip uzatılmasıyla motorun arkasına yerleştirilmiştir. Böylece, omron marka dijital endüktivi devir alıcısının redüktör çıkış mili üzerindeki metal plakanın turunu görmesi ile dişlilerin arttığı tur sayısı saptanmış olmaktadır. Sayıca altı basamaklı olup, redüktör sayesinde programlanabilen maksimum tur sayısı yaklaşık 62 milyona çıkmaktadır. Endüktiv devir alıcısının dijital sayıcıya, dijital sayıcının hız kontrol cihazına ve hız kontrol cihazının da elektrik motoruna kumanda etmesiyle eksiksiz bir elektronik kumanda sistemine sahip olunmuştur. Sayıca verilen tur sayısı tamamlandığında kumanda sistemi elektrik motorunu bir fazla tur dahi yaptırmadan frenlemektedir. Sistem durduktan sonra, operatörün müdahalesine kadar mevcut halini muhafaza etmektedir. Ayrıca, motor kapasitesini aşabilecek yükleme durumunda sistem, hız kontrol cihazı tarafından anında durdurulmaktadır (Başaran, 2001; Haizuka, Nemato, Naruse, 1995).



Şekil 5.2 Deney düzeneği

- 1-Test dişli kutusu
- 2-Yardımcı dişli kutusu
- 3-Kardan mili (burulma mili)
- 4-Portatif tork yükleme kolu
- 5-Tork kaplini
- 6-Kaya bilen yatak

- 7 -Test dişlileri
- 8 -Yardımcı dişliler
- 9 -Elektrik motoru
- 10 -Redüktör
- 11 -Devir alıcı
- 12 -Kontrol panosu

5.3. Deneyde Kullanılan Yağ Çeşitleri

Deney dişlilerinin yağlanması daldırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan yağlar REDUCTELF SP 68-150-320-680 viskoziteli yağlardır. Bu yağların özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Deneyde kullanılan yağ çeşitleri ve özellikleri

Yağ No	Kinematik Viskozite 40°C (Cst)	Kinematik Viskozite Limitleri (Cst) - 40°C (mm ² /sn)		Özgül Ağırlık ASTM D 1298 kg/m ³ 15°C	Yaklaşık Eşdeğer (SUS) Birimi	Kinematik Viskozite (mm ² /sn) Cst 40°C 100°C	
1	68	61,2	72,8	883	315	67	8,9
2	150	135	165	894	700	145	14,8
3	320	288	352	901	1500	318	24
4	680	612	748	918	3150	656	46

Yağ numune alınması çok hassas bir konu olduğundan TOTALFINAELF madeni yağ firmasından numune alım tüpleri temin edilip, firmanın önerdiği doğrultuda yağ numunesi alınmıştır. Yağ numunesi alınırken dikkat edilecek ilk husus, Numune kabının sabunlu suyla ve sıvı deterjanla yıkanmış olması ve defalarca temiz suyla durulanıp son olarak trikloretilen ile yıkanıp basınçlı havayla kurutulup ağzı kapalı bir şekilde muhafaza edilmiştir. Deneyden sonra yağ analizi yapılması için kapalı dişli yağ kutusunun ortasından yağ numunesi alınmıştır.

5.4. Teste Tabi Tutulan Dişli Çarklar

Teste tabi tutulacak dişli çark imalatında GG25 Dökme demir kullanılmıştır. Kullanım nedeni ise hem dişlinin imalat zamanından kazanma hem de çelik malzemeye göre daha çabuk aşınma oluşumunu sağlayabilmektir. Dış açma işleminin tümü aynı tezgahta, aynı kesici takımlarla ve aynı kesme hızlarında yapılarak, dişlerin yakın yüzey pürüzlülüğü değerine sahip olması amaçlanmıştır. Çizelge 5.2’de deney dişlilerinin özellikleri topluca verilmiştir.

Çizelge 5.2 Deneyde kullanılan dişlilerin özellikleri

DENEYDE KULLANILAN DİŞLİLER		
	Pinyon	Çark (döndürülen)
Diş sayısı	17	41
Modül (m_n) mm	3	3
Kavrama açısı (α_0) deg.	20	20
İmalat yöntemi	Azdırma	Azdırma
Diş genişliği (b) mm	20	20
Malzeme	GG25 dökme	GG25 dökme
Sertlik	83 HRB	81 HRB
Isıl İşlem	Yok	Yok
Toplam devir sayısı	5 milyon	
Malzemenin elastisitesi (kN/mm^2)	118-128	118-128
Yük (kg)	17	

5.5. Deneylerin Hazırlık ve Gerçekleştirme Yöntemi

Deneylerde dişli çark malzemesi olarak kullanılan GG25 gözenekli bir yapıya sahip olduğundan deney esnasında dişli çarkların yağ emdiği gözlenmiştir. Bu sebepten dolayı emilen yağın tespiti için, test dişli çarkları önce benzin sonra trikloretilen ile yıkanıp basınçlı hava ile kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak ilk ağırlıkları tespit edilmiştir. Daha sonra deney çalışmalarına başlamadan önce test dişli çarkları bir gün boyunca ortalama ($30^{\circ}C$) sıcaklıkta kullanılmış olduğumuz yağda bekletilmiştir. Yağda bekletilen test dişlileri aynı şartlar altında önce benzin sonra trikloretilen ile yıkanıp basınçlı hava ile kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak bir kere daha ağırlıkları ölçüldüğünde her dişlide görülen ağırlık artış miktarı ortalama 0,5gr. olup dişlilerin yağ emme miktarlarında herhangi bir farklılık görülmemiştir.

Deneyleerde kullanılan pinyon ve çarkların tümü, test dişli kutusuna monte edilmeden önce benzin, trikloasetilen ve fırça yardımıyla iyice temizlenmiştir. Göz ile yapılan muayenede, herhangi bir imalat hatası olup olmadığı araştırılmış, diş profillerinin abrazif aşınmaya yol aabilecek yabancı maddelerden arındırıldığından emin olunduktan sonra test dişli kutusunun içine, önceki deneylerde oluşan aşınma artıklarını yağdan ayırmak amacıyla iki adet güçlü mıknaatıs yerleştirilmiş ve her yeni deney öncesi abrazif aşınmanın etkisini en aza indirmek için bu mıknaatıslar ve test dişli kutusunun içi benzin ve trikloretilen ile iyice temizlenip, yabancı madde ve kirden arındırılmıştır .

Test dişlilerinin montajını takiben dişli kutusu uygun seviyeye kadar her deney için değişik viskoziteli yağları uygun seviyeye kadar doldurularak, düzenek yüklemeye hazır hale getirilmiştir. Yükleme bölüm 5.2’de de anlatıldığı gibi düzenek hareketsizken yapılmaktadır. Yardımcı dişli kutusu ve motor arasında kalan mil parçasına bir adet cıvata takılması ve cıvatanın boyu ayarlanmış sabit desteğe denk getirilmesi suretiyle sistem hareketsiz kılınır. Daha sonra test dişli kutusu ve yardımcı dişli kutusu arasında bulunan, ucunda tork kaplini bağlı mil parçasına, asılan ağırlık ile etki ettiği milin ekseni arasında tam 1 metre mesafe sağlayan bir moment kolu vasıtasıyla ağırlık asılır. Böylece söz konusu mil parçası burulmuş olur. Ağırlık asılmadan önce, moment kolu yere paralel hale getirilerek mile uygulanan tork miktarı sabitlenmelidir. Ağırlık asılı haldeyken, tork kaplinin üzerinde bulunan cıvatalar sıkılarak kapalı devre tamamlanır. Ardından sabitleme cıvatası çıkartılır, asılan ağırlık ve moment kolu sklr. Bu sayede, burulan milin uğradığı açısal deformasyon, kapalı devredeki tüm millere ve dolayısıyla dişlilere dağılmış olur. Yükleme için uygulanan burulma momentinin yönü, motorun dönüş yönünün aksi istikametinde olmasına dikkat edilmelidir. Yüklemenin ardından, el ile birkaç tur attırılarak sistemin doğru yüklenip yüklenmediğini ve transmisyon elemanları güvenliği kontrol edilir. Kumanda panosundan, dijital sayaç vasıtasıyla istenen tur sayısı ayarlanır. Sistem yavaşça harekete geçirilir. Bu sayede dişlilerin tamamen yağlanması için biraz zaman tanınmış olunur. Ardından, hız kontrol cihazı ile istenen motor devir sayısı ayarlanır. Sistem, dijital-programlanabilir sayaca girilen tur sayısını tamamladıktan sonra durup, operatörün müdahalesini bekleyecektir.

5.6. Deneyin Yapılması ve Ölçümler

Deney sonuçları, beş ayrı işlem uygulanarak değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bunların ilki; aşınmaya uğrayan diş yüzeylerinin renkli makro fotoğraflarının çekilmesi ile Metlapta görüntü işleme metoduyla dişli temas yüzeyinde oluşan aşınmanın tespiti yapılmış, ikincisi; dijital mikro fotoğraflarının (filmlerinin) çekilmesi, üçüncüsü de; deneylerden önce ve aşınma oluşumundan sonra dişlerin aşınma miktarının hassas teraziyle ağırlıkça tespiti, dördüncü olarak yüzey pürüzlüğünün çukurcuk derinliği tespiti yapılmış. Son olarak deneylerden sonra yağların spektrometrik analizi yapıp oluşan aşınma elemanları ve yağdaki değişim karakteristikleri incelenmiştir.

5.6.1. Makro fotoğraf çekimleri

Deneylerin sona ermesinin ardından, her bir pinyon benzin ile yıkanıp, fırçalanarak yağdan arındırılmıştır. Ayrıca, aseton ve trikloretilen ile tekrar yıkanarak tüm boya vb. kimyasaldan tamamen temizlenmiştir. Daha sonra tüm dişler tek tek incelenerek fotoğrafı çekilecek yüzeyler kararlaştırılmış ve işaretlenmiştir. Dişlerin birbirlerinin yüzeylerini perdeleri olmaları, aşınmaya uğramış yüzeylerin açık bir şekilde fotoğraflanmasını ilk başta engellemiştir. Bu sebeple, tüm pinyonlar göbeklerindeki delik genişletilip, et kalınlığı azaltılmak suretiyle el testeresi ile kesilmeye uygun hale getirilmiş, işaretlenen dişlerin önünden fotoğraf çekimine imkan tanıyacak şekilde kesilmiştir. Bu sayede aynı dişliye ait en az iki adet diş yüzeyinin net fotoğraflarını çekmek mümkün olmuştur.

Makro fotoğraf çekimlerinde OLUMPUS C-2100 dijital fotoğraf makinesi kullanılmış yüzeylerde oluşan hasar çok net bir şekilde tespit edilmiştir. Kullanılan fotoğraf makinesinin çözünürlüğü 2,11 milyon piksel olup, objektif 38 açı ile 1026 zooma kadar olduğundan istenen büyütme oranı sağlanmıştır. OLUMPUS C-2100 dijital fotoğraf makinesinin USB girişi olduğundan direk bilgisayar ortamına aktarılıp ve editör programıyla müdahale edilebilir duruma getirilmiştir ve gerekli kırpma işlemleri yapılarak, sadece dişin aktif yüzeyini incelemek için kaydedilmiştir. Metlapta görüntü işleme metoduyla dişli temas yüzeyde oluşan aşınmanın %'de

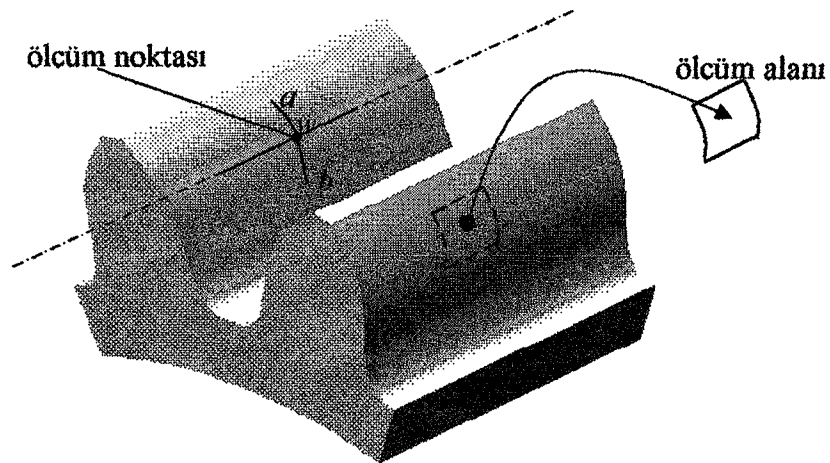
olarak tespiti yapılmıştır. Elde edilen ham görüntüler işlenebilmesi için önce gri-düzey forma dönüştürüldü. Gri formdaki görüntüye bazı temel görüntü güçlendirme metotları uygulanarak görüntü daha belirgin hale getirildi. Görüntüye uygulanan uygun eşik (treshold) değer aralığı ile aşınan bölgeler ortaya çıkarıldı. Elde edilen son görüntü alan analizi için ikili (binary) forma dönüştürüldü. Son görüntü eşit alanlara bölünüp siyah aşınma lekeleri alansal olarak hesaplandı (piksel²). Sonuçlar tablo ve grafiklerle açıklandı.

Üzerinde çalışma yapılmış tüm fotoğraflar Bölüm 6.4. de sunulmuştur.

5.6.2. Dijital mikro fotoğraf çekimleri

Mikro yapı fotoğrafları, dijital kamera entegre edilmiş optik mikroskop kullanılarak sağlanmıştır. Üzerinde *capture fonksiyonlu* TV kartı bulunan bilgisayar ile ilişkilendirilen dijital kamera sayesinde, normal düzlemde yüzeyde oluşan düz dişlerin profil yüzeylerinin hemen altındaki aşınma oluşumlarının birkaç karelik, kısa renkli filmleri çekilmiştir (Şekil 5.3). Daha sonra her karesi birbirinin eşi olan bu filmler Real Player programı ile açılmış, son kareleri fotoğraf olarak Paintshop Pro 6 programı ile kaydedilmiştir. Dijital mikro fotoğraf çekim alanı Şekil 5.3'de gösterilmektedir.

Üzerinde Çalışma yapılmış tüm fotoğraflar EK 2 de sunulmuştur.



Şekil 5.3 Dijital mikro fotoğraf çekim alanı

5.6.3. Yüzey pürüzlülüğü ve aşınma derinliği tespiti

Tüm dişliler azdırma ile aynı kesme hızında açıldığı için yüzey pürüzlülüğü parametresi sabit kılınmıştır, yani tüm pinyon ve çarkların çalıştırılmadan önce sahip oldukları yüzey pürüzlülüğü değeri aynı sayılabilecek derecede yakındır.

Aşınma hasarına uğramış diş yüzeylerindeki çukurcuk derinliklerinin saptanması için, Taylor Hubson Surtronic 3+ Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazından (Şekil 5.5) yararlanılmıştır. Surtronic 3+ ucundaki iğne tipi algılayıcı ile çukurcuk derinliklerini ve pürüzlülük profilini tespit etmiş, geliştirilen bir bilgisayar programı aracılığıyla da tespit edilen data bilgisayara aktarılarak yüzey pürüzlülüğünün ölçekli grafiğe dökülmesi sağlanmıştır. Cihaz, üzerinden ölçüm alınan diş yüzeylerin boyutlarına uygun Lc örnek alma uzunluğu (cut off length) ve Ln hesaplama uzunluğu (evaluation length) girilerek şu parametreleri tespit etmek üzere kullanılmıştır.

Ra: Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarında, eksen çizgisinin altında ve üstünde oluşan profil sapmalarının aritmetik ortalama değeridir.

Rq: Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarında, eksen çizgisinin altında ve üstünde meydana gelen sapmaların ve derinliklere karşı daha hassas olup, Ra değerinin bir tamamlayıcısı olmaktadır.

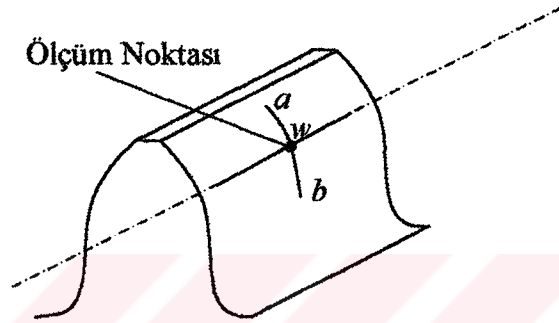
Ry: Örnek boyu içindeki en yüksek tepe noktası ile en derin çukur nokta arasındaki yüksekliktir.

Rz (DIN): Profilin seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en yüksek beş tepe noktasının yükseklikleri ile en derin beş çukur noktasının derinliklerinin mutlak değerlerinin ortalamasıdır.

Sm: Tüm hesaplama uzunluğu boyunca profil tepelerinin arasındaki ortalama aralık.

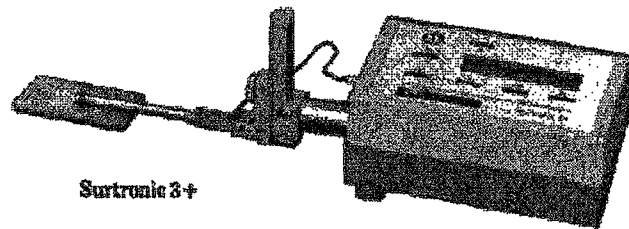
Üzerinde ölçüm yapılan tüm pinyonlar ve çarkların kalınlığı, dolayısıyla yüzeyin boyu 20 mm' dir. Ölçülmeye çalışılan çukurcuk derinliklerinin mertebesi ve diş yüzeyinin boyu, cihazın bunlara uygun olarak izin verdiği maksimum Ln hesaplama

uzunluğunu 12,5 mm ve örnek alma uzunluğunu 2,5 mm ile sınırlamıştır. İğne tipi algılayıcının yüzey üzerinde ölçüm alırken izleyeceği doğrunun, en hasarlı ve göz ile algılanan en derin çukurcukların bulunduğu bölgelerden geçirilmesine çalışılmıştır (Şekil 5.4). Bu sayede aşınma hasarının fotoğraflı iz düşüm ve derinlik bilgileri birleştirilerek üç boyutlu gerçek derecesinin saptanması amaçlanmıştır.



Şekil 5.4 Yüzey pürüzlülüğün ölçüm doğrultusu

Üzerinde çukurcuk derinliklerinin tespit edildiği tüm profillerin açıklamalı grafik çıktıları Ek-3'te verilmiştir.



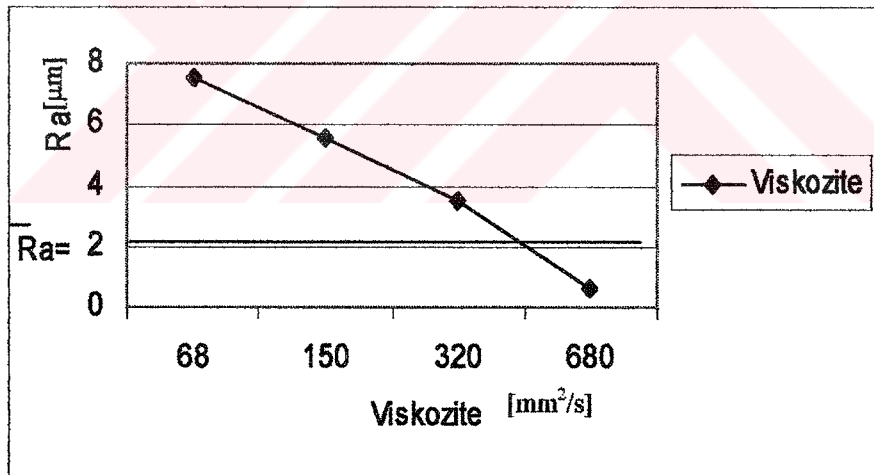
Şekil 5.5 Taylor hupson surtronic 3+ yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

6.DENEYSEL SONUÇLAR

6.1.Oluşan Aşınma Değerinin ve Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerinin Tespiti

Bu çalışmada dört değişik viskoziteli mineral yağlar (REDUCTELF SP 68 – 150 – 320 – 680) kullanılarak dişli çarklarda meydana gelen aşınmaların sağlıklı tespiti için, sadece izdüşüm fotoğrafların kapladığı % alan hesabıyla yetinilmemiş, üçüncü boyut (derinlik) için de hasarın en yoğun ve çukurcukların en derin olduğu yerlerden ölçümler alınmıştır.

Şekil 6.1 incelendiğinde, relatif aşınma değerinin (R_a , R_q , R_y , R_z) değerlerinin viskozite arttıkça azaldığı görülmektedir. Düşük viskozite altında çalıştırılan dişlilerde ise aşınma değerinin artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.1 Viskoziteyle – Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değişim diyagramı

Şekil 6.1’de R_a (ortalama yüzey pürüzlülüğü) değeri deneye tabi tutulmamış dişlilerde ortalama $R_a \cong 2 \mu m$ olarak ölçülmüştür.

Üzerinde çukurcuk derinliklerinin tespit edildiği tüm profillerin açıklamalı grafik çıktıları Ek-3’te verilmiştir.

6.2.Oluşan Aşınma Değerinin Hassas Terazide Ağırlıkça Tespiti

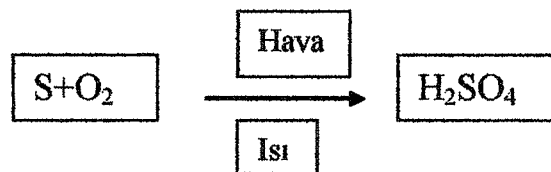
Oluşan aşınma hasarının sağlıklı tespiti için, deneyden önce dişliler benzin ve trikolasetilen ile iyice temizlendikten sonra basınçlı hava ile kurutulup hassas terazide ağırlıkça tespiti yapılmıştır. Son olarak dişlilerin deneyden sonra benzin ve trikolasetilen ile tekrar iyice temizlendikten sonra basınçlı hava ile kurutulup hassas teraziyle ağırlıkça tespiti yapıp. Dişlilerde oluşan aşınma miktarını Çizelge 6.1 de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 Pinyon dişlilerin aşınma miktarının ağırlıkça tespiti

Dişli çiftinin ismi ve kullanılan yağ	Çalıştırılmadan önceki ağırlık (gr)	Çalıştırıldıktan (5 milyon tur) sonraki ağırlık (gr)	Aşınma (mg)
P ₁ Ç ₁ (68 VG)	235,104	233,495	1609
P ₂ Ç ₂ (150 VG)	235,110	234,214	896
P ₃ Ç ₃ (320 VG)	235,105	234,776	329
P ₄ Ç ₄ (680 VG)	235,113	235,089	24

6.3.Oluşan Aşınma Elemanları ve Yağ Karakteristiği Değerinin Spectrometrik Analiziyle İrdelenmesi

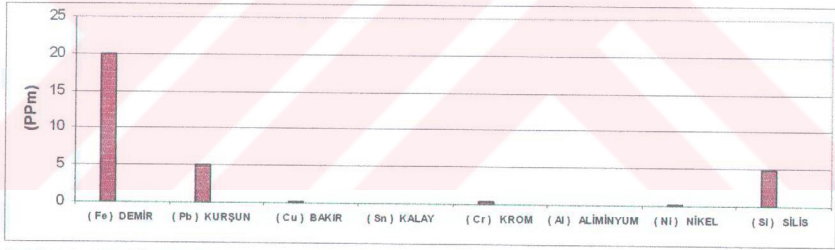
ELFTECH kalite kontrol ünitesinde, kullanılmış yağ numunelerini analiz ederek bilgisayar ortamında değerlendirilmesi ile yağ ömrünün belirlenmesi oluşan arıza ve problemlerin erken teşhisini ve takibini sağlayan sürekli bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan Endüstriyel yağların spectrometrik analiz yöntemiyle değerlendirilmesi yapılmıştır. Çizelge 6.2’de ve şekiller üzerinde yorumlamak gerekirse en önemli aşınma elemanları (Fe ve Si) dur. Silisyum ortam tozu iri partiküllerdir. (Fe ve Si) değerleri arttıkça yağ rengini kaybeder grileşe bilir. EP katkı maddesinin ana maddeleri (P, Zn)’ dir. (TAN) değerinin oluşması için ısı, ortam şartları(nemlilik) hava içerisindeki su birikintileri ve dolaylı olarak yükten, devirden vb. etkilenirler.



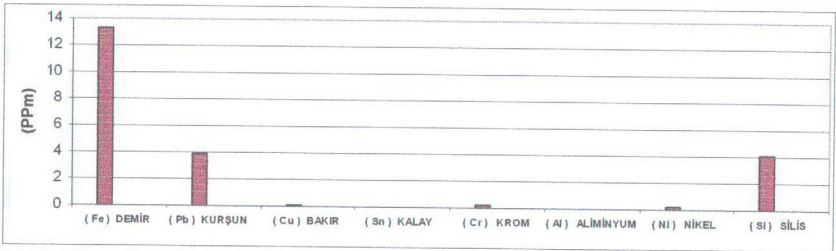
Oluşan H_2SO_4 kuvvetli bir asit olup yağın özelliğini bozduğundan istenmeyen bir özelliktir. (TAN) değeri en düşük olan yağın kullanım ömrü açısından en uygun olanıdır. Endüstriyel yağlarda (TAN) yüksek olmamalı 2 veya 2,5 kadar sorun yok denir 3 ve üçten sonra yağ asidite olmuş denir ve yağ değiştirilmelidir.

Çizelge 6.2 Deneylerde kullanılan yağların deney sonrası yağ analiz değerleri

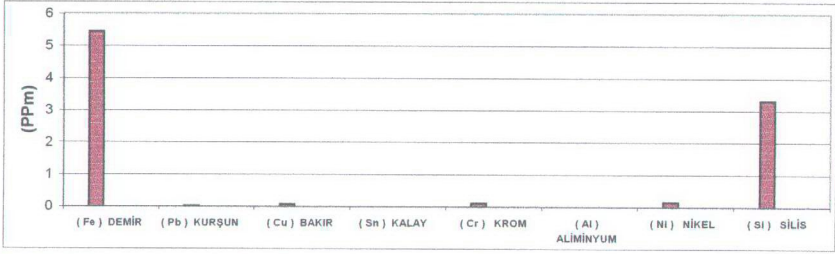
Yağ No	Kinematik Viskozite 40°C mm ² /sn	TAN mg KOH/gr	Katkı Elemanları (ppm)				Aşınma Elemanları (ppm)							
			(B)	(M _g)	(P)	(Z _n)	Fe	Pb	Cu	Sn	Cr	Al	Ni	Si
1	69,05	2,55	0	0	342	4	19,9	5,1	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2	4,8
2	145,14	2,15	0	1	359	7	13,3	3,9	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2	4,1
3	293,88	1,45	0	22	410	50	5,4	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	3,3
4	707,62	1,7	0	0	339	2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	2,2



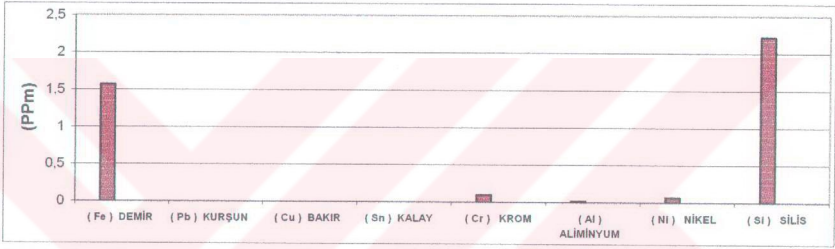
Şekil 6.2 68 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı



Şekil 6.3 150 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı



Şekil 6.4 320 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı



Şekil 6.5 680 viskozitede oluşan aşınma elemanları dağılımı

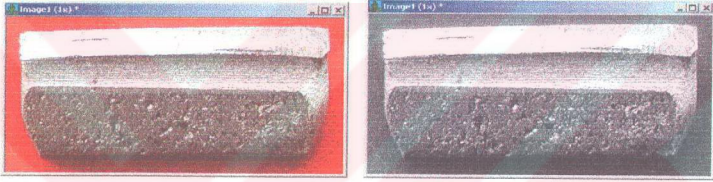
Çizelge 6.2'deki 1 nolu yağ için; sistem yağının katkı maddeleri kullanım seviyesi alt limitlerindedir. Diğer tüm değerler limitler içerisindedir. Sistem yağında renk değişimi (Grimsi) gözlenmiştir. 2 nolu yağ için; sistem yağının katkı maddeleri seviyesi alt limitlerinde olup, sistem yağında renk değişimi gözlenmemiştir. Diğer tüm değerler limitler içerisindedir. 3 nolu yağda tüm değerler ideal limitler içerisinde olduğu ve 4 nolu yağda ise sistem yağının katkı maddeleri seviyesi alt limitlerinde, diğer tüm değerler limitler içerisinde olduğu gözlenmiştir.

6.4.Oluşan Aşınma Değerinin Görüntü İşleme Metoduyla Belirlenmesi

Bir Deney İçin İşlem Aşamaları: Şekil 6.6'da elde edilen dişli temas yüzeyinin ham görüntülerinin işlenebilmesi için önce gri-düzey forma dönüştürüldü. Şekil 6.7'de aşınma oranı analizi için incelenecek olan dişli temas yüzeyini sarı renkle işaretlenmiş görüntü bölgesi oluşturulduktan sonra Şekil 6.8'de görüldüğü gibi aşınma oranı analizi için incelenecek gri seviye görüntüsü belirlenmiştir. Şekil 6.9'da

gri formdaki görüntüye bazı temel görüntü güçlendirme metodları uygulanarak görüntü daha belirgin hale getirildi. Şekil 6.10 da [29-36] gri ton değeri arasında eşikleme işlemi uygulanmış gri düzey görüntüsü elde edildikten sonra Şekil 11'de görüntüye uygulanan uygun eşik (threshod) değer aralığı ile aşınan bölgeler ortaya çıkarılıp elde edilen son görüntü alan analizi için ikili (binary) forma dönüştürüldü. Son görüntü Şekil 6.12'de ise eşit alanlara bölünüp siyah aşınma lekeleri alansal (piksel²) olarak hesaplandı ve sonuçlar Çizelge 6.3 ve Şekil 6.13'de grafiklerle açıklanmıştır.

Deney 1: 68 viskoziteli yağ ile deneye tabi tutulmuş dişli yüzeyi.



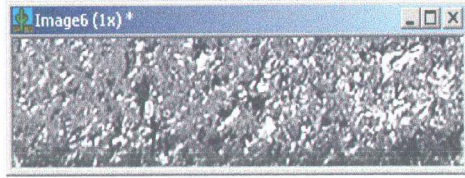
Şekil 6.6 İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzy (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali



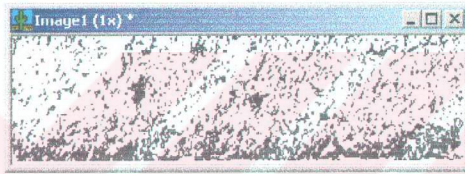
Şekil 6.7 Aşınma oranı analizi için incelenecek sarı renkli işaretlenmiş görüntü bölgesi



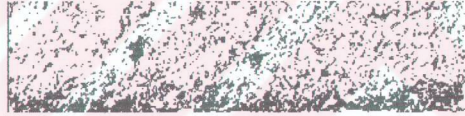
Şekil 6.8 Aşınma oranı analizi için incelenecek gri-seviye görüntü



Şekil 6.9 Aşınma oranı analizi için incelenecek gri-seviye görüntünün çeşitli görüntü güçlendirme (Image Enhancement) metodları ile güçlendirilmiş hali



Şekil 6.10 [29-36] gri ton değeri arası tresholding (Eşikleme) işlemi uygulanmış gri-düzey görüntü



Şekil 6.11 [29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali

Bölgelere Ayrılmış İkili Görüntü; Deneye tabi tutulduktan sonraki aşınmış dışlı yüzeyleri üzerindeki tipik kötü etkenler (zararlar) dışlı dışındaki çatlak ve çukurların görüntü işleme metoduyla analizi.

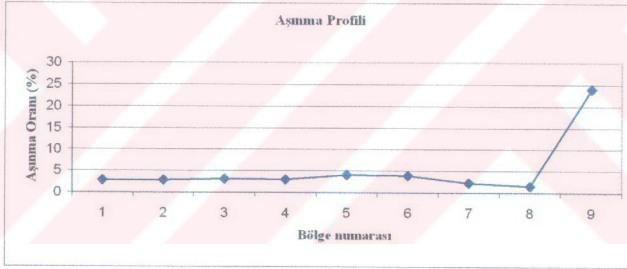


Şekil 6.12 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması

Ölçüm Sonuçları;

Çizelge 6.3 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.

Bölge No.	Aşınma Alanı (Piksel ²)	Aşınma Oranı (%)
1	789,125	2,886137408
2	609,125	2,838193662
3	565,5	3,16580926
4	765,875	3,060180816
5	686,625	4,178259414
6	618	3,936866458
7	1039	2,272761864
8	1660,4	1,539146449
9	2537,9	23,87735533
Toplam	9271,55	47,75471066



Şekil 6.13 Aşınma oranının 9 eş bölgeye ayrılması

Deney 2: 150 viskoziteli yağ ile deneye tabi tutulmuş dişli yüzeyi.



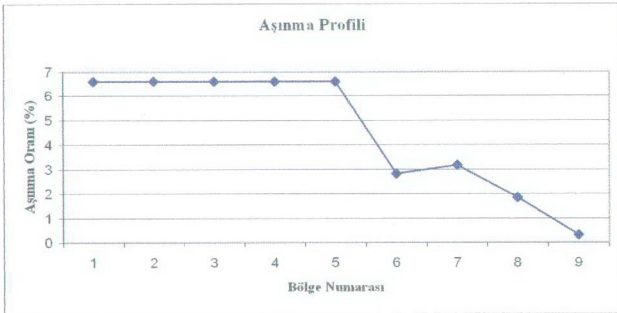
Şekil 6.14 İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali



Şekil 6.15 [29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali

Çizelge 6.4 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 9 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.

Bölge No.	Aşınma Alanı (Piksel ²)	Aşınma Oranı (%)
1	2098,6	6,606018635
2	2098,6	6,606018635
3	2098,6	6,606018635
4	2098,6	6,606018635
5	2098,6	6,606018635
6	898,625	2,828711282
7	1006,4	3,167967766
8	587,125	1,84816482
9	96,875	0,304945228
Toplam	13082,025	41,17988227

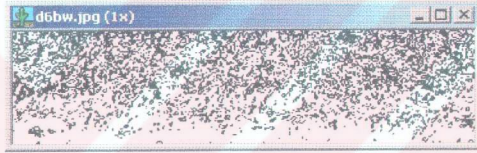


Şekil 6.16 Aşınma oranının 9 eş bölgeye ayrılması

Deney 3: 320 viskoziteli yağ ile deneye tabi tutulmuş dişli yüzeyi.



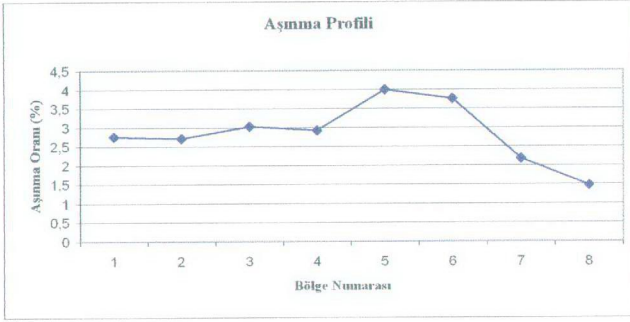
Şekil 6.17 İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali



Şekil 6.18 [29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali

Çizelge 6.5 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 8 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.

Bölge No.	Aşınma Alanı (Piksel ²)	Aşınma Oranı (%)
1	1048,125	3,452549575
2	1032,375	3,400668687
3	1140	3,755188089
4	1105,3	3,640885434
5	1472,6	4,850780684
6	1393,3	4,58956453
7	756,625	2,492341393
8	515,625	1,698481455
Toplam	8463,95	27,88045985

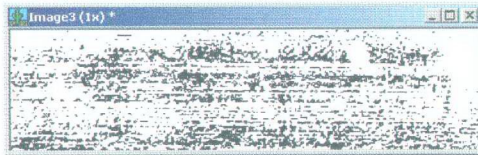


Şekil 6.19 Aşınma oranının 8 eş bölgeye ayrılması

Deney 4: 680 viskoziteli yağ ile deneye tabi tutulmuş dişli yüzeyi.



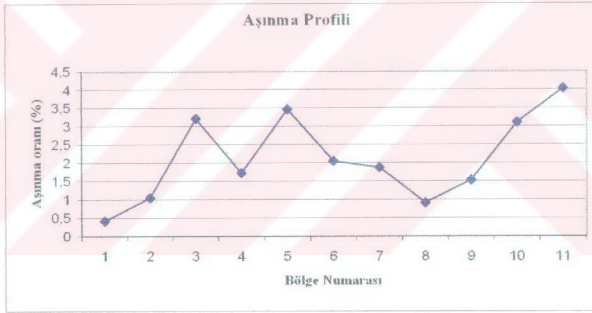
Şekil 6.20 İşlenmemiş ham görüntü ve gri-düzey (0-255 gri renk tonu) forma dönüştürülmüş hali



Şekil 6.21 [29-36] gri ton arası tresholding (Eşikleme) uygulanmış görüntünün ikili (Binary) forma dönüştürülmüş hali

Çizelge 6.6 İkili forma dönüştürülmüş son görüntünün 11 eş bölgeye ayrılması ile aşınma oranlarının tespiti.

Bölge No.	Aşınma Alanı (Piksel ²)	Aşınma Oranı (%)
1	203	0,411089285
2	514,5	1,041898706
3	1585,9	3,211559102
4	848,875	1,719031611
5	1713,1	3,469148053
6	1008,6	2,042485976
7	925,625	1,874455762
8	445,875	0,902928252
9	754,25	1,527409327
10	1535,1	3,108685527
11	1989,8	4,029485025
Toplam	11524,625	23,33817663



Şekil 6.22 Aşınma oranının 11 eş bölgeye ayrılması

7. SONUÇLAR

Dişli çarklarda aşınma olayının yağ viskozitesi tarafından nasıl etkilendiği sorusuna cevap aranan bu çalışmada yapılan deneyler ve araştırmalara dayanarak aşınma olayı irdelenmiştir.

Bu çalışmada dört değişik viskoziteli mineral yağlar (REDUCTELF SP 68 – 150 – 320 – 680) kullanılarak dişli çarklarda meydana gelen aşınmaları ve yağ karakteristiğinin değişimini incelemek için yağ spektrum analizi, yüzey pürüzlülüğü, mikro ve makro filmler kullanılarak görüntü işleme metoduyla aşınma olayının tespiti ve hassas terazi kullanılarak aşınma miktarı ölçülmüş, meydana gelen aşınma ile viskozite arasındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar tablolarda ve şekiller üzerinde gösterilmiştir.

Dişli bozukluk modları yaptığımız deneylerin yorumlanmasında, viskozitenin en önemli özelliklerinden biri olduğunu ve viskozitenin artan değerlerinde çeşitli diş bozulmalarına karşı korunmanın o kadar arttığı görülmüştür. Fakat viskozite ve yüksek hızlı dişli ve yataklarca yağın karıştırma ve kesme güç kaybından dolayı aşırı sıcaklık üretiminden ve güç kaybından kaçınmak için, sınırlandırılmalıdır. Dişli çarkın çalışma sıcaklığı, yağın çalışma viskozitesini belirler. Eğer yağ çok yoğunsa aşırı sıcaklık üretir, ısı yağ sıcaklığını artırır ve viskoziteyi azaltır aynı zamanda (TAN) değerini de yükselteceğinden viskozite sınırlandırılmalıdır.

Elde edilen sonuçlar, literatürde çelik dişliler ve diskler üzerinde yapılan çalışmaların sonucuna göre bazı farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıklarda, yüzey hasarının tespiti için pek de kolay bir malzeme olmadığı anlaşılan GG25 gri dökme demir kullanılmasının payı büyüktür. Döküm dişlilerde yüzey hasarı, çeliklerde olduğu gibi ayrı ayrı çukurcuklar halinde değil, geniş alansal bozukluklar şeklinde meydana geldiği (EK 1)'de görülmektedir. Döküm malzemesinin yumuşak olması sebebiyle, çelik malzemede tek tek oluşan çukurcuklar yerine genellikle çukurcuk şebekeleri meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR

- Adams, J. H., January 1981, Borate Gear Lubricant – EP Film Analysis and Performance, **Journal of the Society Tribologist and Lubrication Engineers**, Vol: 37, No:1 pp:16 – 21
- Akkurt, M., (1990-1997), Makine Elemanları Cilt II, **Birsen Yayınevi**, ISBN 975-511-141-7, Bölüm 22
- Arrisek, A., (Petrol D.D.) Vizintin, J., March 2001., “Pitting Resistance Of Rapeseed-Based Oils”, **Lubrication Engineering**, Vol:57, No:3. pp: 17 - 21
- Bartz, W. J. and Krüger, V., 1975, “Influence of Lubricants on the Pitting Fatigue of Gears”, **Wear**, pp: 315 – 329
- Başaran, B., 2001, “Helisel Dişli Çarklarda Pitting Oluşumunun Deneysel İncelenmesi, **G.Ü. Fen Bil. Ens. Yük. Lis. Tezi**, Ankara.
- Brechat, P., Cardis, A. B., Murphy, W. R. and Theissen, J., 2000, “Micropitting Resistant Industrial Gear Oils With Balanced, **Industrial Lubrication And Tribology**, Vol.52, pp: 125 – 136, no: 3
- Carper, H.J. ve KU, P.M., 1973. Effect of Some Material and Operating Variable on Scuffing. **Mech. and Mach. Theory**, 8:209-232.
- Lechner, G., 1966. Die Fress-Grenzlast bei Stirnrädern aus Stahl. Dissertation, **TH-München**.
- Castr, J., Seabra, J., 19 May 1997., Scuffing And Lubricant Film Breakdown In FZG Gears Part I. Analytical And Experimental Approach, **Wear**, Vol:215, pp.104 - 113
- Castr, J., Seabra, J., 13 May 1997, Scuffing And Lubricant Film Breakdown In FZG Gears Part II, New PV Scuffing Criteria, Lubricant And Temperature Dependent, **Wear**, Vol:215, pp.114 - 122
- Chironis, N. P., 1967, Gear Design and Application, **Mc Graw-Hill Co**, New York.
- Cho, Y. K., Cai, L. and Granick, S., 1997, Molecular Tribology of Lubricants and Additives, **Tribology International**, Vol:30, No:12, pp:889 – 894

- Clifford, G. P., Waldemar, B. M. and Roger, E. M, May 1990, Test Methods for Open Gear Lubricants, **Journal of the Society Tribologist and Lubrication Engineers**, Vol:46, pp:318 – 326
- Creamer, R. H., 1976, **Machine Design**, 2 nd Ed., Addison-Wesley Publishing Co., Massachusettes.
- Damme, E. V., Decemmer 1990, A New Test Method for Low Cost Gear Wear Simulations, **Journal of the Society Tribologist and Lubrication Engineers**, Vol:46, No:12 pp:817 – 825
- ELF, Lubricants and Industrial Maintenance, **ELF industrial oils**, 1992, February
- Erichello, R., 1990, Lubrication and Gear, **Lubrication Engineering**, pp:231 – 237
- Haizuka, S., Naruse, C., Nemoto, R., 1986., Studies on Frictional Loss and Temperature Rise of Spur Gears. **Bull. of JSME**, No: 29, pp: 4416-4423.
- Hani, İ., 1999., Madeni Yağlar ve Petrol Ofisi Ürünleri.
- Haizuka, S. and Nemoto, R., Kurokawa, K., 1986, Studies on Friction Loss, Temoerature Rise and Limiting Load For Scoring of Spur Gears, **Bull.of JSME**, Vol. 29, No:248
- Haizuka, S., Nemoto, R. and Naruse, C., 1995, “Study on Limiting Load for Scuffing and Specific Wear of Spur Gears”, **JSME International Journal Series C**, Vol:38, No:1, pp:149 – 159
- Hamrock, B. J., 1994, Fundamentals of Fluid of Lubrication, **Mc Graw Hill Series in mechanical engineering**, use ISBN 0-07-025956-9
- Hewson, W. D., July 1990, Oil Lubrication of Locomotive Traction Gears – Theory and Practice, **Journal of the Society Tribologist and Lubrication Engineers**, Vol:47, pp:455 – 464
- Hoehn, B. R., Michaelis, K. Doleschel, A., 2001, Limitations of Bench Testing for Gear Lubricants, Bench Testing of the Lubrication and Wear Properties of Industrial Fluids Used in Machinery Application; **Symposium**, No:1404, pp:15 – 32
- Höglund, E., 1999, Influence of Lubricant Properties on Elastohydrodynamic Lubrication, **Wear**, Vol:232, pp:176 – 184

- Iwai, R.; Nonaka, N.; Kubo, A.; Yabe, H.; 1984, Fundamental On Scoring Failure, **Bull of JSME** Vol.27, No:226
- Jiang, Q. Y. And Barber, G. C., 1999, Modeling of Reaction Film Failure in Gear Lubrication, **Wear – Lausanne**, Vol:231, No:1, pp:71 – 76
- Jiang, X., Cheng, H. S., Hua, D. Y., 2000, A Theoretical Analysis of Mixed Lubrication by Macro Micro Approach: Part I – Result in a Gear Surface Contact, **Tribology Transactions**, Vol:43, No:4, pp:689 – 699
- No Author, **Klüber Lubrication**, 1996, Lubrication of Large Gear Drives
- Larsson, R., 1997, Transient non-Newtonian Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of an Involute Spur Gear, **Wear – Lausanne**, Vol:207, No:1/2, pp:67 – 73
- Mouveaux, J. C., 1997, Large Girth Gear Lubrication Stresses the Importance of Choosing the Right Lubrication System for Particular Large Girth Gear Applications, **World Cement**, Vol:28 No:11, pp:61 – 62
- Naruse, C., Haizuka, S., Nemoto, R., 1985, Studies On Effects Of Tip Relief Upon Load Carrying Characteristics of Spur Gears, **Bull of JSME**, Vol.28, pp:1279-1287.
- Neale, M. J., 1975, (ed.): Tribology Handbook, Gear and Roller Chain Lubrication B9, London, **Newnes-Butterworths**, 2 nd Impression.
- No Author, 1995, Wear and Lubricating of Gear, **Lubrication Engineering, Huangpu**, No:1, pp:68 – 71
- No Author, 1998, Gear and Transmission Lubricants, **Industrial Lubrication and Tribology**, Vol:50, No:1, pp:16 – 25
- No Author, 2001, Reliability Calculation in Selecting the Viscosity of Gear Oil Base on Elastohydrodynamic Lubrication Theory, **Lubrication Engineering – Huangpu**, 2001, Part 2, pp: 14 – 15
- Oktay, Ş., 1972, Makina Elemanları 3, **Birsen Kitapevi**, İstanbul
- Özkan, T., 1992, Helisel Alın Dişli Çarklar, İnsan Gücü Eğitim Şube Müdürlüğü Yayını.
- Paygane, G., 1990, Dişli Çarklarda Yenme Olayının Yağlama Bakımından İncelenmesi, **Doktora Tezi**, İstanbul.

- Putnam A.R., *Metals Handbook, American Society for Metals*, pp. 151, 152, 312, 314, 424 - 432, 507 - 524, 1975
- Rende, H., *Makine Elemanları*, Cilt 2, Pamukkale Üniv. Mühendislik Fakültesi., ISBN 975-7670-16-289 (Tk. No), 975-7670-18-9 (Cilt 2), Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Rush, R. E., March 1997, A review of the More Common Standard Grease Tests Use Today, **Journal of the Society Tribologist and Lubrication Engineers**, pp:17 - 25
- Snidle, R. W., Evans, H. P. And Alanou, M. P., 2000, Gears: Elastohydrodynamic Lubrication and Durability, **Proc. Instn. Mech. Engrs.**, Vol. 214, Part C pp:39 - 49
- Şahin, Ö.S., 2002, "Düz Dişli Çarklarda Oluşan Sıcaklığın Aşınmayı Etkilerinin Deneyisel İncelenmesi, **S.Ü. Fen Bil. Ens. Yük. Lis. Tezi**, Konya.
- Tümkor, S., Ocak 1995, Dişli Çark Mekanizmalarının Yağlanması, *Mühendis ve Makine*, ISSN No: 1300 - 3402, pp:38 - 42
- Ulukan L., 1984 "Yağlama Tekniği", **İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi**.
- Verlag, B., **DIN 3990 Teil II**, December 1987, **Tragfähigkeitsberechnung von Stirradem.**
- Wellauer, E. J. and Holloway, G.A., 1986, Application of Elasto-Hydrodynamic Oil Film Theory to Industrial Gear Drives. **Trans. ASME, J. Eng. Ind.** 98 B(1), pp:626-634
- Wilfried, J. B., 1993, "**Lubricaion of Gearing**" **MEP** Exoert verlag, ISBN 0 85298-831-1, Part 1, Part 2 of Part 3, London
- Wills, J. G., 1980, *Lubrication Fundamentals*, **Mechanical Engineering**, 3. Marcel Dekker Inc., New York.
- Winter, H., 1981, Some Factors Influencing The Pitting, Micro - Pitting (Frosted Areas) and Slow Speed Wear of Surface Hardened Gears, **Journal of Mechanical Design**, Vol:103, pp:499 - 506
- Yazıcıoğlu, O., Aralık 1989, Dişli Kutularındaki Dişli Çarkların Yağlanması Üzerine Bir Öneri, *Mühendis ve Makine*, Vol.359, pp:21 - 25



EKLER

EK 1

AŞINMA HASARI TESPİTİNDE DİŞ YÜZEYLERİNİN MAKRO ÇEKİMLERİ

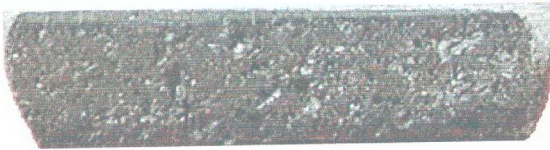
Kullanılmamış dişli yüzeyinin makro çekimi



680 Viskoziteyle kullanılmış (P4-Ç4) dişli yüzeyi



320 Viskoziteyle kullanılmış (P3-Ç3) dişli yüzeyi

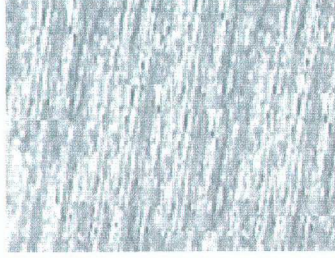


150 Viskoziteyle kullanılmış (P2-Ç2) dişli yüzeyi

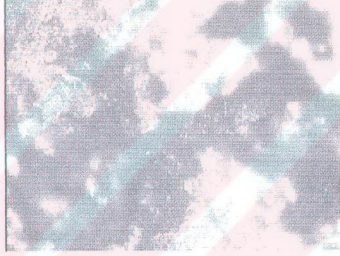


68 Viskoziteyle kullanılmış (P1-Ç1) dişli yüzeyi

EK 2
DİJİTAL MİCRO FOTOĞRAFLAR



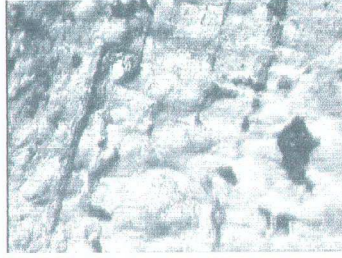
Deneye tabi tutulmamış dişli yüzeyi (zoom X 100)



68 Viskoziteli yağ ile kullanılmış (P1-Ç1) dişli yüzeyi (zoom X 100)



150 Viskoziteli yağ ile kullanılmış (P2-Ç2) dişli yüzeyi (zoom X 100)



320 Viskoziteli yağ ile kullanılmış (P3-Ç3) dişli yüzeyi (zoom X 100)



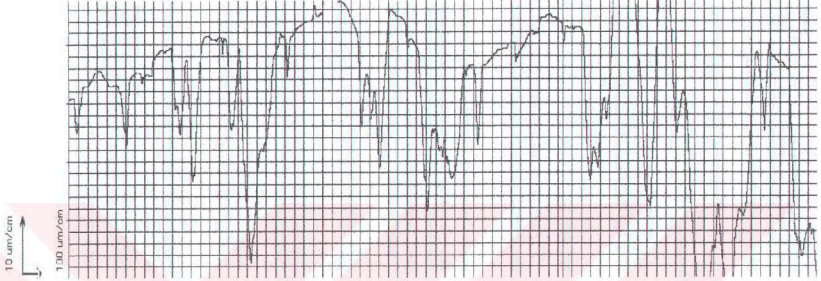
680 Viskoziteli yağ ile kullanılmış(P4-Ç4) dişli yüzeyi (zoom X 100)

EK 3
TÜM DİŞİLİRE AİT YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ASINMA DERİNLİĞİ
DEĞERLERİ

(1500 dev / dak , 5 milyon tur)

$R_a = 7,54 \mu m$
 $R_q = 9,94 \mu m$
 $R_{aDIN} = 40,7 \mu m$
 $R_t = 98,6 \mu m$
 $R_y = 59,6 \mu m$
 $S_m = 249 \mu m$

$V_v = x1000$

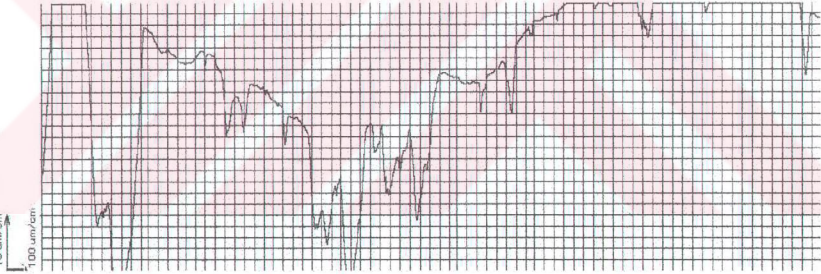


68 Viskoziteli yağ ile kullanılmış dişli çifti (P1-Ç1)

$R_a = 5,54 \mu m$
 $R_q = 8,84 \mu m$
 $R_{aDIN} = 30,4 \mu m$
 $R_t = 67,5 \mu m$
 $R_y = 67,5 \mu m$
 $S_m = 212 \mu m$

$V_v = x1000$

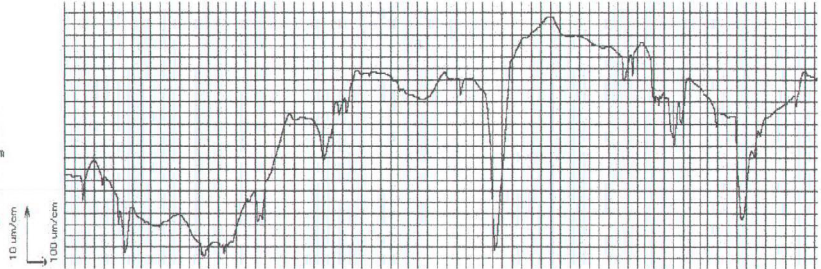
$V_h = x100$



150 Viskoziteli yağ ile kullanılmış dişli çifti (P2-Ç2)

$R_a = 3,32 \mu m$
 $R_q = 4,90 \mu m$
 $R_{aDIN} = 22,6 \mu m$
 $R_t = 39,5 \mu m$
 $R_y = 39,5 \mu m$
 $S_m = 251 \mu m$

$V_v = x1000$

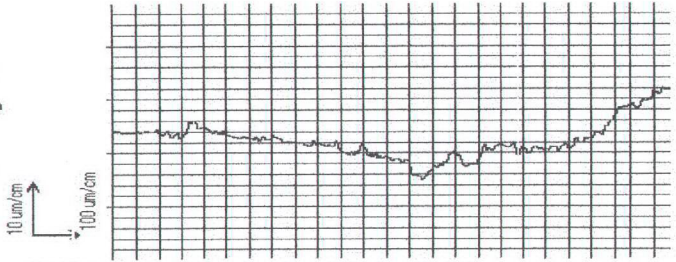


320 Viskoziteli yağ ile kullanılmış dişli çifti (P3-Ç3)

R_a	=	0.60 μm
R_q	=	0.84 μm
R_{zDIN}	=	3.5 μm
R_t	=	5.0 μm
R_y	=	4.0 μm
S_m	=	44 μm

$V_v = \times 1000$

$V_h = \times 100$



680 Viskoziteli yağ ile kullanılmış dişli çifti (P4-Ç4)

R_a	=	2.02 μm
R_q	=	2.78 μm
R_{zDIN}	=	13.1 μm
R_t	=	19.9 μm
R_y	=	19.9 μm
S_m	=	216 μm

$V_v = \times 1000$



Kullanılmamış ortalama dişli yüzey pürüzlülüğü

EK 4

VISKOZİTE DEĞİŞİMİNE BAĞLI HERTZ BASINCI İÇİN ÖRNEK HESAP

Verilenler:

Pinyona ait diş sayısı	$Z_1=17$
Çarka ait diş sayısı	$Z_2=41$
Pinyona ve çarkın (kalınlığı)	$b=20\text{mm}$
Taksimat dairesine ait basınç açısı	$\alpha_0=20$
Pinyon ve çarkın normal modül (standart)	$m_n=3\text{mm}$
Mile uygulanan burulma momenti	$M_b=170\text{Nm}$
GG25 demir döküm malzemesi için Elastisite oranı	$E=128000\text{N/mm}^2$
GG25 demir döküm malzemesi için poisson oranı	$\nu=0,3$
Pinyon ve çarkın ortalama yüzey pürüzlülüğü	$R_a=2\text{ }\mu\text{m}$
Viskozite sıcaklık değişimi	$\eta_0=0,075\text{Pa.s}$
Viskozite basınç katsayısı	$\alpha=2,2 \times 10^{-8}\text{m}^2/\text{N}$

Formüller ve hesaplamalar:

Pinyon ve çarkın taksimat dairesinin çapları;

$$d_{01}=m_n Z_1=51\text{mm}$$

$$d_{02}=m_n Z_2=123\text{mm}$$

Pinyon ve çarkın baş dairesinin çapları ;

$$d_{01}=d_{01}+2m_n=51+2 \times 3=57\text{mm}$$

$$d_{02}=d_{02}+2m_n=123+2 \times 3=129\text{mm}$$

Pinyon ve çarkın temel dairesinin çapları;

$$d_{g1}=b_{01} \times \cos \alpha_0 = 51 \times \cos 20=47,924\text{mm}$$

$$d_{g2}=b_{02} \times \cos \alpha_0 = 123 \times \cos \alpha_0 = 115,582\text{mm}$$

Temas alanının eni ;

$$\begin{aligned}\varsigma &= \sqrt{\frac{d_{b1} - d_{g1}}{4}} + \sqrt{\frac{d_2 - d_{g2}}{4} - \frac{(d_{01} + d_{02})}{2} \sin \alpha_0} \\ &= \sqrt{\frac{(57)^2 - (47,924)^2}{4}} + \sqrt{\frac{(129)^2 - (115,582)^2}{4} - \frac{(51 + 123)}{2} \sin 20^\circ} = 14,316 \text{ mm}\end{aligned}$$

Silindir düz dişlinin eşdeğer eğrilik yarıçapı;

$$\rho_1 = \frac{d_1}{2} \sin \alpha_0 = \frac{51}{2} \sin 20^\circ = 8,72 \text{ mm} = 8,72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_2 = \frac{d_2}{2} \sin \alpha_0 = \frac{123}{2} \sin 20^\circ = 21,034 \text{ mm} = 2,1 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{\sin \alpha_0} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{\sin 20^\circ} \left(\frac{1}{51} + \frac{1}{123} \right) = 0,1622$$

$$\rho = 6,0652 \text{ mm} = 6,1652 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Pinyona etkiyen kuvvetin teğetsel bileşeni;

$$F_t = \frac{2M_b}{d_1} = \frac{2 \times 170}{(10^{-3}) \times 51} = 6666,667 \text{ N}$$

Pinyona etkiyen dış kuvveti;

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha_0} = 7094,518 \text{ N}$$

Bir yüzey genişliğindeki normal yük ;

$$w = \frac{F_n}{b} = \frac{7094,518}{0,02} = 354725,9 \text{ N/m}$$

İletim oranı;

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{123}{51} = 2,4117$$

Ortalama hız ;

$$U = \frac{w_1 \times \rho_1 + w_2 \times \rho_2}{2} = 26,4 \text{ m/s}$$

Etkili elastisite modülü ;

$$E' = \frac{E}{1 - \nu_1^2} = \frac{128 \times 10^3}{1 - 0,09} = 140659,34 \text{ N/mm}^2 = 140659,34 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Yük parametresi (yük faktörü);

$$W' = \frac{w}{E' \times \rho} = \frac{354725,9 \text{ N/m}}{140659,34 \times 10^6 \text{ N/m}^2 (6,1652 \times 10^{-3})} = \frac{354725,9 \text{ N/m}}{867192963 \text{ N/m}} = 4,09 \times 10^{-4}$$

Hız parametresi;

$$U = \eta_0 \frac{u}{E' \rho} = \frac{0,075 \text{ N} \times \text{s/m}^2 (26,4 \text{ m/s})}{140659,34 \times 10^6 \text{ N/m}^2 (6,1652 \times 10^{-3} \text{ m})} = \frac{1,98 \text{ N/m}}{867192963 \text{ N/m}} = 2,283 \times 10^{-9}$$

Malzeme parametresi;

$$G = \alpha \times E' = (0,022 \text{ mm}^2 / \text{N}) \times (140659,34 \text{ N/mm}^2) = 3094,505448$$

Birimsiz minimum film kalınlığı;

$$H_{\min} = \frac{h_{\min}}{\rho} = 2,65 \times (W')^{-0,13} \times (U)^{0,7} \times (G)^{0,54} = 449,98 \times 10^{-6}$$

Minimum film kalınlığı;

$$h_{\min} = H_{\min} \times (\rho)$$

$$h_{\min} = 449,98 \times 10^{-6} \times 6,1652 \times 10^{-3} = 3,087209 \times 10^{-6} m \\ = 3,087209 \mu m$$

$$P_h = E' = \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 1134,923707925 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\Sigma Rq} = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} = \frac{2,7742 \times 10^{-6}}{10^{-6} \sqrt{2^2 + 2^2}} = 1,0914932$$

Film kalınlığı ve hasar kriterine göre (Bartz, 1993) ;

$\lambda \geq 3$	hasar yok
$1,5 < \lambda < 3$	hasar olası
$\lambda \leq 1,5$	hasar mümkün

Bulunan bu değerlere göre hasar mümkündür. Daha pratik bir çözüm elde etmek için VISUAL BASIC de programı yazılmış ve programın taşınabilir olması için exe dosyası oluşturulmuştur.

Option Explicit

Private Sub bul_Click()

Dim kontrol As Boolean

Dim i As Integer

Dim U As Double, W As Double, G As Double

Dim Eu As Double, R1 As Double

Dim R2 As Double, lamda As Double, hmin As Double

Dim pi As Double

pi = 3.141592654

```

kontrol = True
For i = 0 To 9
  If Text1(i) = "" Then
    kontrol = False
    MsgBox ("bos olan yerleri lutfen doldurunuz")
  Exit For
End If
Next

```

If kontrol Then

```

'W = Fn / b
Text2(0) = Val(Text1(7)) / Val(Text1(4))

'E' = E / (1-v^2)
Text2(1) = Val(Text1(0)) / (1 - Val(Text1(3)) * Val(Text1(3)))

```

```

'G = alfa * E'
Text2(2) = Val(Text1(2)) * Val(Text2(1))

```

```

'U = nu * V / (E' * ro)
Text2(3) = Val(Text1(1)) * Val(Text1(5)) / (Val(Text2(1)) * Val(Text1(6)))

```

```

'W = w / (E' * ro)
Text2(4) = Val(Text2(0)) / (Val(Text2(1)) * Val(Text1(6)))

```

```

U = Text2(3)
W = Text2(4)
G = Text2(2)

```

```

'hmin
hmin = 2.65 * (U ^ 0.7) * (W ^ -0.13) * (G ^ 0.54) * Val(Text1(6)) * (10 ^ 6)
Text2(5) = hmin

```

```

Eu = Text2(1)

```

```

'Ph
Text2(6) = Eu * ((W / (2 * pi)) ^ 0.5) * (10 ^ -6)

```

'lamda R1 pinion yüzey pürüzlülüğü (rms) R2 çark yüzey pürüzlülüğü (rms)
'eşit alındı

```

R1 = Val(Text1(8))

```

```
R2 = Val(Text1(9))
Text2(7) = hmin / ((R1 * R1 + R2 * R2) ^ 0.5)
```

```
lamda = Text2(7)
```

```
If lamda <= 1 Then
Text4 = "Sınır yağlama"
End If
```

```
If (lamda >= 1 And lamda <= 3) Then
Text4 = "Kısmi yağlama"
End If
```

```
If (lamda >= 3 And lamda <= 5) Then
Text4 = "Elasto hidrodinamik yağlama"
End If
```

```
If (lamda >= 5 And lamda <= 100) Then
Text4 = "Hidrodinamik yağlama"
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Hakkında_Click(Index As Integer)
Dim i As Integer
i = MsgBox("Hazırlayan : Y.Müh. MUSTAFA SELÇUK KESKİN ",
vbOKOnly, "Dişli çarklarda yağ film kalınlığı hesaplaması")
End Sub
```

```
Private Sub kapat_Click(Index As Integer)
End
End Sub
```

```
Private Sub temizle_Click()
Dim i, j As Integer
```

```
For i = 0 To 9
Text1(i) = ""
Next
```

```
For j = 0 To 7
Text2(j) = ""
Next
```

Text3 = ""

End Sub

Private Sub varsayilan_Click()

Text1(0) = "128000000000" 'E

Text1(1) = "0.075" 'nü (mutlak viskozite)

Text1(2) = "0.000000022" 'alfa (Basınç viskozite katsayısı)

Text1(3) = "0.3" 'poisson

Text1(4) = "0.02" 'b

Text1(5) = "26.4" 'v

Text1(6) = "0.0061652" 'Ro (Eğrilik yarı çapı)

Text1(7) = "7094.518" 'Fn

Text1(8) = "2" 'R1(rms) (Pinyon yüzey pürüzlülüğü)

Text1(9) = "2" 'R2(rms) (Çark yüzey pürüzlülüğü)

End Sub

Diğer çıkışlarda minimum yağlı iskemeler katılığı hesaplı

Çıkış : Veriler

E(N/m²)	128000000000	V (m/s)	26.4
nü (Pa.s)	0.075	Ro (metre)	0.0061652
alfa (m²/N)	0.000000022	Fn (N)	7094.518
Poissons's ratio	0.3	R1(rms)mikro.m	2
b (metre)	0.02	R2(rms)mikro.m	2

BUL varsayılan değerler

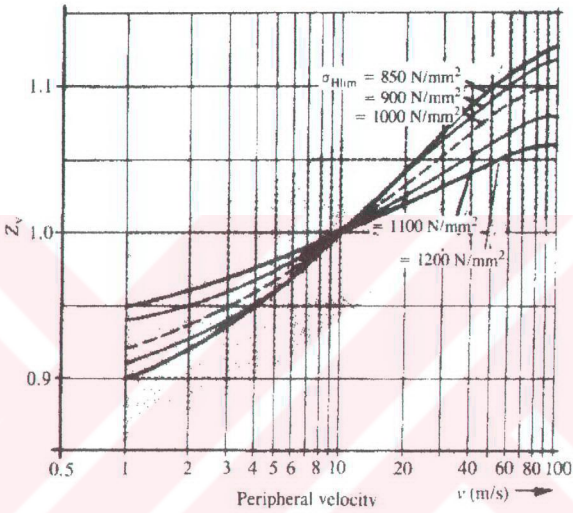
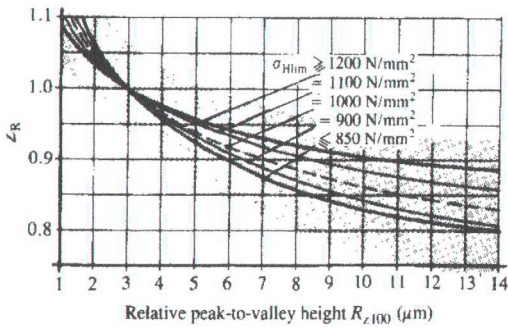
w (N/m)	354725,9	W (birimsiz)	4.09049673470627E-04
E' (N/m²)	140659340659.341	hmin (mikro.m)	3.08720910753676
G (birimsiz)	3094.505494498	Ph (N/mm²)	1134.92370792518
U (birimsiz)	2.28322884902900E-09	Lamda	1.09149324744006

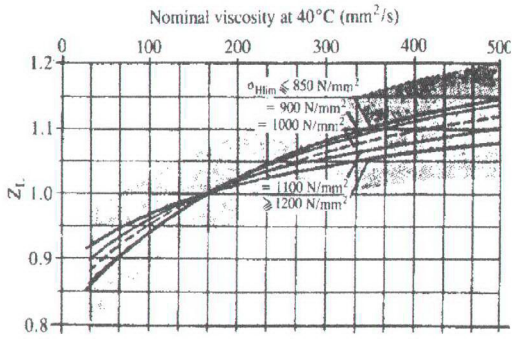
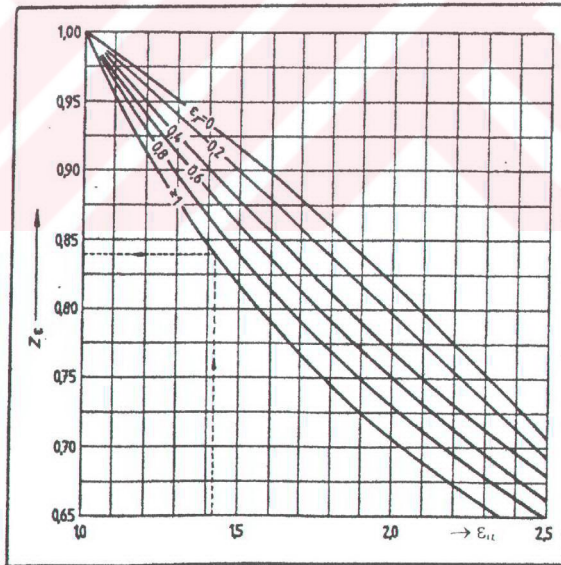
TEMİZLE Yağlama Durumu **Kısmi yağlama**

Cetvel 1. VISUAL BASIC de yazılmış programın her türlü hesaplama için pratik olarak tabloya dönüştürülmüş hali.

EK 5

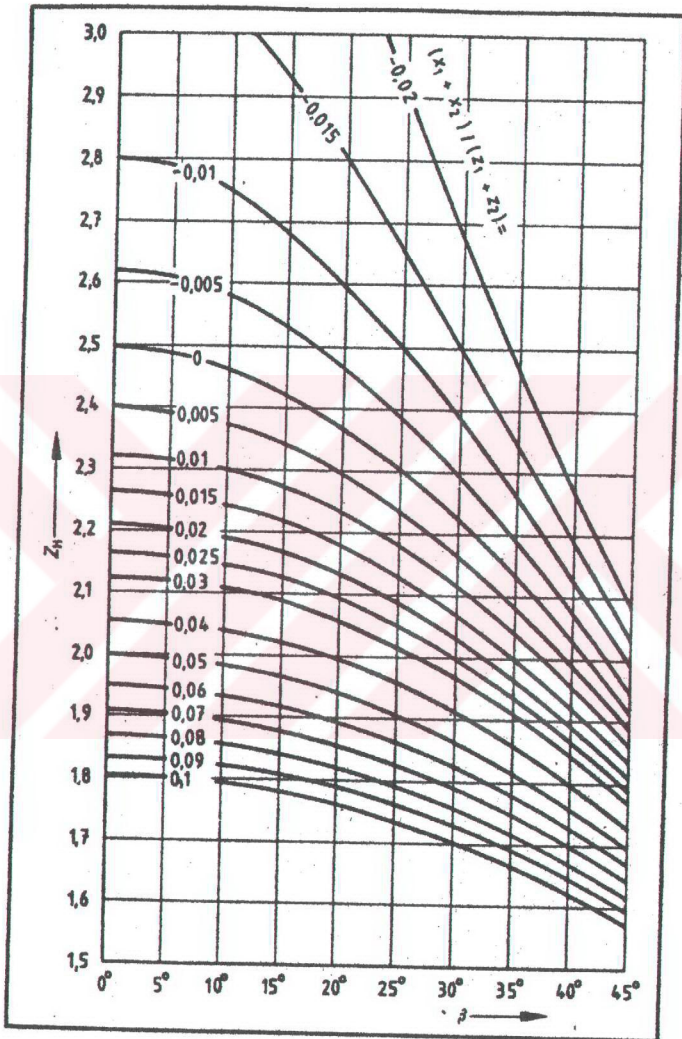
YÜZEY GERİLMESİ HESABINDA KULLANILAN PRATİK
DİYAGRAMLAR

Cetvel 2 Hız faktörü (Z_v)Cetvel 3 Yüzey pürüzlülüğü faktörü (Z_R)

Cetvel 4 Yağlama faktörü (Z_L)Cetvel 5 Bindirme faktörü (Z_E)

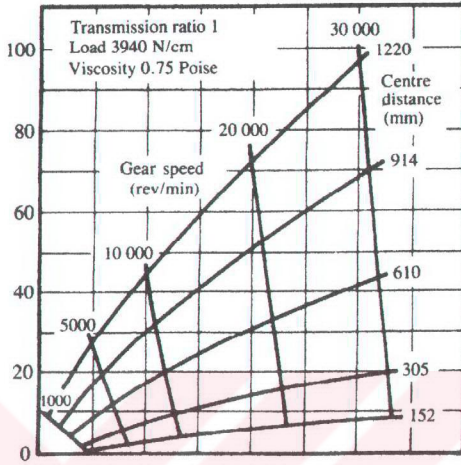
İŞLEME TARZI	TAHRİK ŞEKLİ		
Tahrik Edilen Makina	Sabit Elektrik Motoru Buhar Türbini Hidrolik Motor	Hafif Darbeli Çok Silindirli Yanmalı Motor	Orta Darbeli Tek Silindirli Yanmalı Motor
Darbesiz Jeneratörler, Bandlı Konveyörler, Levhalı Bandlar, Taşıma Helezonları, Hafif Asansörler, Elektrikli Trenler, Takım Tezgahlarının Kızakları, Aspiratörler, Turbo Kompresörler, Sabit Yoğunluklar için Karıştırıcı ve Yoğurucular, Maksimum Kesme Momenti Oluşturan Presler	1,0 (1,25)	1,25 (1,50)	1,5 (1,75)
Orta Derecede Darbeli Takım Tezgahlarının Ana Motorları, Ağır Yük Asansörleri, Vinçlerin Döndürücüler, Maden Ocaklarının Aspiratörleri, Yoğunluğu Değişik Maddeler İçin, Karıştırıcı ve Yoğurucular, Çok Silindirli Pistonlu Pompalar, Pompalar	1,25 (1,50)	1,5 (1,75)	1,75 (2,0)
Kuvvetli darbeliler için örneğin Presler, Makaslar, Kauçuk Yoğurucular, Haddehane ve Döküm Makinaları, Dozerler, Ağır Santrifüjler, Ağır Büyük Dağıtım Pompaları, Sondaj Makinaları, Briket Presleri	1,75 (2,0)	2,0 ve üzeri (2,25)	2,25 ve üzeri (2,5)

Cetvel 6 Çalışma faktörü (K_A)

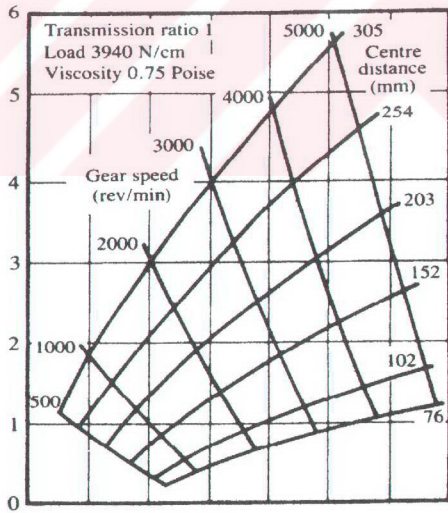
Cetvel 7 Alın faktörü (Z_H)

MALZEME CİNSİ	DİN	SİMGESİ	SERTLİK	$\sigma_{H\lim}$ N / mm ²	$\sigma_{H\lim}$ N / mm ²
Lamel grafitli dökme demir	1691	GG-20 GG-25	180 HB 220 HB	40 55	300 330
Temper döküm	1692	GTS-35 GTS-65	150 HB 220 HB	130 155	350 440
Küresel grafitli döküm (Sfero döküm)	1693	GGG-40 GGG-60 GGG-100	180 HB 250 HB 350 HB	140..190 165..220 260	390..470 490..570 700
Çelik döküm	1681	GS-52.1 GS-60.1	160 HB 180 HB	110 120	280 310
Yapı çelikleri	17100	St 37 St 50 St 60 St 70	120 HB 160 HB 190 HB 210 HB	125 140 150 200	320 360 380 450
İslah çelikleri	17200	Ck 45 N 34CrMo4 V 42CrMo4 V 34CrNiMo4 V 30CrNiMo8 V 34NiCrMo12.8 V	190 HB 270 HB 300 HB 310 HB 320 HB 350 HB	155..200 220..290 225..310 225..315 230..320 240....325	470..530 630..710 680..760 680..770 700..780 750..830
Endüksiyon veya alevle sertleştirilmiş ıslah çelikleri		Ck 45 34CrMo4 42CrMo4 34CrNiMo6	50....55 HRC	Diş dibi sertleştirilmiş 220....370 sertleştirilmemiş 140....200	1000..1230
İslah ve sementasyon çelikleri, nitrürlenmiş (gaz ortamda)		42CrMo4 V Rm > 800 N/mm ² 16Mn Cr 5 V Rm > 700 N/mm ²	48....55 HRC	300....370	780..1000
Nitrür çeliği (Nitrürlenmiş)		31Cr MoV9 V Rm > 900 N / mm ² 14CrMoV 6,9 V Rm > 900 N / mm ²	60....63 HRC	270....420	1000 1100
Sementasyon çelikleri (Semente edilmiş)	17210	16MnCr5 15CrNi6 17CrNiMo6	58....62 HRC	315..500	1300..1500

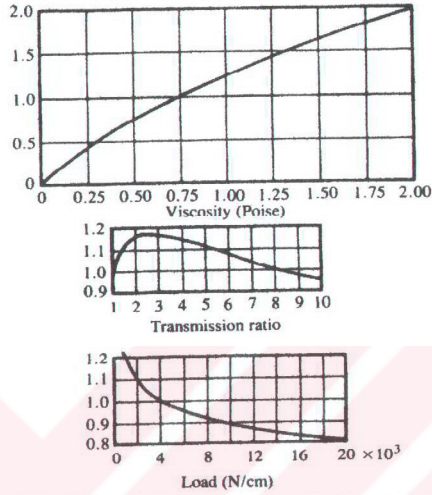
Cetvel 8 Dişli malzemelerinin değerleri



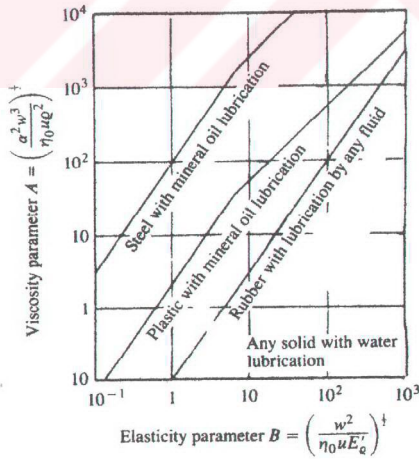
Çizelge 9 Kalın filmlerle film kalınlığının belirlenmesindeki diyagram (Dawson ve Higginson)



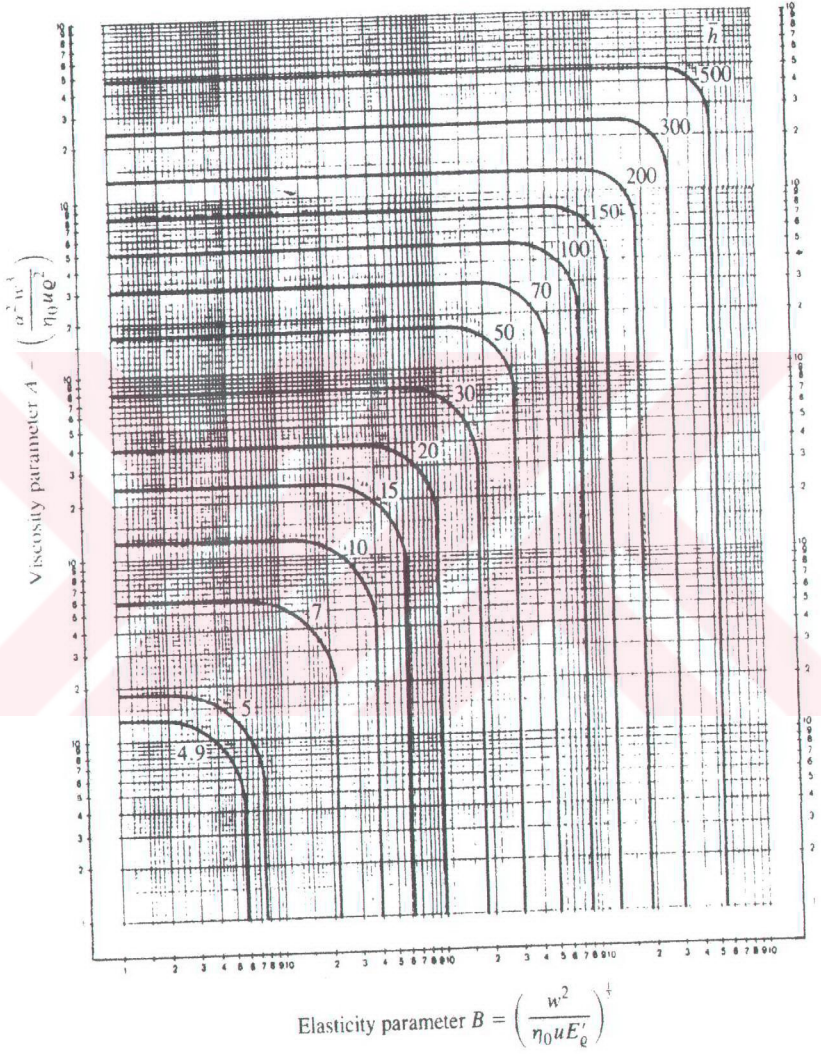
Çizelge 10 İnce filmlerle film kalınlığının belirlenmesindeki diyagram (Dawson ve Higginson)



Çizelge 11 Film kalınlığının belirlenmesi için düzeltme faktörü (Dawson ve Higginson)



Çizelge 12 Viskozite ve elastisite parametreleri için pratik çalışma aralığı



Çizelge 13 Viskozite ve elastisite parametrelerine karşı boyutsuz film kalınlığını verir

ISO VG Grades	15	22	32	46	68	100	150	220	320	460	680	1000	1500	2000	2200
Hidrolik Yağlar															
Kompresörler															
Türbinler															
Endüstriyel Dişli Yağları															
Sürüklesyonlu Sistem Yağları															
Tezgah Yağları															
Isı Transfer Yağları															

	ÇOK KULLANILAN
	AZ KULLANILAN

Çizelge 14 Endüstriyel uygulamalar için yaklaşık viskozite aralığı (ELF)

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Selçuk KESKİN 1.9.1971 yılında Diyarbakır'da doğdu. 1991 yılında Diyarbakır Ziya Gökalp Lisesini bitirdi. Lisans eğitime 1993 yılında Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde başladı ve 1997 yılında mezun oldu. Aynı yıl Akyıl Tekstil Fabrikasında işletme şefi olarak göreve başladı. Eylül 1998'de Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladıktan sonra Eylül 1999'dan itibaren Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansa başladı. Aynı yıl 35.inci maddeyle Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı; halen aynı göreve devam etmektedir.