

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

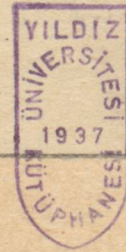
**Taşıma Şekillendirme Yöntemlerinde
Hidrodinamik Yağlama**

H. Derya Kuseybat

Yüksek Lisans Tezi

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

Kot : R 150
Alındığı Yer : ~~Fen Bil. Ena.~~ 90
Tarih : 8.12.1986
Fatura :
Fiatı : 2500 TL
Ayniyat No : 1/32
Kayıt No : 44645
UDC :
Ek :



K



Comp

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TALAŞSIZ ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİNDE

HİDRODİNAMİK YAĞLAMA.

YÜKSEK LİSANS TEZİ.

H. DERYA KUSEYBAT.

İÇİNDEKİLER.

<u>Bölüm.</u>	<u>Konu adı.</u>	<u>Sayfa.</u>
	İçindekiler.	
	Türkçe özet.	
	İngilizce özet.	
	Giriş.	
	METİN.	
1.	Sürtünme .	1.
1.1.	Genel tanım ve sınıflandırma.	1.
1.2.	Aşınma.	22.
1.2.2.	Adhezyon aşınması.	23.
1.2.3.	Abrazyon aşınması.	24.
1.2.4.	Yorulma aşınması.	25.
1.2.5.	Oksidasyon aşınması.	26.
2.	Yağlayıcı maddeler.	27.
2.1.	Genel ifadeler.	27.
2.2.	Katı yağlayıcı maddeler.	28.
2.3.	Sıvı yağlayıcı maddeler.	29.
2.4.	Yarı katı yağlayıcı maddeler.	30.
2.5.	Gaz yağlayıcı maddeler.	32.
2.6.	Yağlayıcı maddelerin genel özellikleri.	32.x
2.7.	Katıklar.	44.
2.8.	Yağların seçimini etkileyen faktörler.	46.
2.9.	Yağlama analizlerinde yararlanılan temel esitlikler.	47.
3.	Metallerin şekillendirilmesinde hidrodi- namik teori.	54.
3.1.	Elastohidrodinamik teori.	54.
3.2.	Plastohidrodinamik teori.	60.
3.3.	Magnetohidrodinamik.	61.
3.4.	Hidrodinamik yağlamanın temel prensipleri.	65.
3.6.	Yük kaldırmaya elverişli yağ filmi.	88.
3.6.1.	Eğik düzlem tarzındaki yağ tabakası.	93.
3.6.2.	Parabolik yarım silindir şeklindeki yağ tabakası.	99.

3.6.3.	Parabolik tam silindir şeklindeki yağ tabakası.	102.
3.7.	Maksada en uygun film şekli.	107.
3.8.	Hidrostatik yağlamanın temel prensipleri.	118.
3.8.1.	Hidrostatik yağlama sistemlerinin genel denklemleri.	121.
3.8.2.	Dikdörtgen cepli sistemler.	122.
3.8.3.	Dairesel cepli sistemler.	130.
4.	Plastik şekillendirmede sürtünme kabulleri.	139.
4.2.	Tel çekme, haddeme ve ekstrüzyonda sürtünme katsayısının ölçülmesi.	141.
4.2.2.	Konik matrizen akışta sürtünme katsayısının belirlenmesi.	143.
4.2.3.	Haddeme için sürtünme katsayısının belirlenmesi.	145.
4.3.	Yapılan sürtünme kabulleri için sürtünme kayıplarının hesaplanması ve bu değerlerin karşılaştırılması.	155.
4.3.1.	Tel çekme ve ekstrüzyonda sabit sürtünme faktörü kabulü ile sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.	156.
4.3.2.	Tel çekme ve ekstrüzyonda Coulomb sürtünme reji-mi ile sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.	158.
4.3.3.	Tel çekme ve ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama uygulaması ile sürtünme gücü kayıplarının hesabı.	160.
4.3.4.	Haddeme prosesinde sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.	164.
5.	Haddeme prosesinde sürtünme enerji kayıpları.	169.
5.1.	Haddemede hidrodinamik yağlama analizleri.	173.
5.2.	Haddeme proseslerinde hidrodinamik yağlama olayının ısı eğriler yardımı ile analizi.	181.
5.2.1.	Teorik analiz.	182.
5.3.	Haddemede hidrodinamik yağlama modelleri.	197.
5.4.	Hız etkisi.	199.
5.5.	Uygulamada hidrodinamik yağlamanın haddeme proseslerine uygulanışı.	203.
5.6.	Çeliğin sıcak haddelenmesinde kullanılan yağlayıcıların araştırılması ve geliştirilmesi.	207.
5.7.	Çeliğin sıcak haddelenmesinde katı yağlayıcıların kullanılması.	213.

6.	Tel çekme proseslerinde hidrodinamik yağlama analizleri.	219.
6.1.	Hidrodinamik yağlama teorileri.	219.
6.2.	Hidrodinamik yağlamalı tel çekmede sürtünme gücü kayıplarının üst sınır çözümü ile bulunması, geliştirilen modelin incelenmesi.	223.
6.3.	Tel çekme proseslerinde elasto-plasto-hidrodinamik yağlama analizleri.	226.
6.4.	Sonuçlar.	238.
6.5.	Konu ile ilgili bilgisayar çalışması.	239.
6.6.	Konu ile ilgili deneysel çalışma.	244.
6.7.	Uygulamada tel çekme proseslerinde yağlayıcı olarak kullanılan yağlar.	246.
7.	Hidrostatik ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama analizleri.	249.
7.2.	Hidrostatik ekstrüzyonun uygulama alanları.	251.
7.3.	Hidrostatik ekstrüzyonda yağlama.	251.
7.4.	Yarı sürekli hidrostatik ekstrüzyon.	254.
7.5.	Sürekli hidrostatik ekstrüzyon.	255.
7.6.	Normal ekstrüzyonda ve hidrostatik ekstrüzyonda sürtünme gücü kayıplarının karşılaştırılması.	257.
7.7.	Hidrostatik ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama modelleri.	263.
7.8.	Hidrostatik ekstrüzyonda izotermal hidrodinamik yağlama modeli.	265.
7.9.	Analitik sonuçlar.	273.
7.10.	Teorinin deneyle karşılaştırılması.	279.
8.	Basma ile şekillendirmede hidrodinamik yağlama olayları.	285.
8.1.	Düzlem yüzeylerin basma ile şekillendirilmesinde hidrodinamik yağlama olayının izoviskoz modeller ile açıklanması.	285.
8.2.	Analizden elde edilen sonuçlar.	294.
9.	SONUÇLAR.	298.
	KULLANILAN SEMBOLLER.	304.
	YARARLANILAN KAYNAKLAR.	308.

ÖZET.

Araştırmamızın amacı, talassız şekillendirme yöntemlerinde hidrodinamik yağlama olayının uygulanışını incelemektir. Konunun teorik araştırmasına başlamadan evvel sürtünme olayları incelendi ve sürtünmenin çeşitli durumları için gerekli şartlar araştırıldı. Sürtünmenin etkilerini azaltabilmek için gerekli olan yağlama konusuna ve sürtünmenin neden olduğu aşınma olaylarına kısaca değinildi. Yağlama konusunu incelerken, hem yağlayıcılardan hem de akışkanlar mekaniğinin viskoz akışkanlar için tanımlamış olduğu temel teorik bilgilerden yararlanıldı. Her bir proses için Reynolds enerji denklemleri, Navier-Stokes denklemleri ve ısıl denge esitliklerinden yararlanıldı. Hidrodinamik yağlama olaylarının teorik incelenmesi konunun temelini oluşturduğundan detaylı bir araştırma yapma yoluna gidildi. Yağlama olayları esnasında ortaya çıkabilecek çeşitli film profilleri için kuvvet ve sürtünme gücü analizleri yapılarak, maksada en uygun film şeklinin nasıl belirlenebileceği araştırıldı. Bu arada, hidrodinamik yağlama olayının ortaya çıktığı yöntemlerden, hidrostatik ekstrüzyondaki durumu inceleyebilmek amacıyla hidrostatik yağlama konusuna da değinildi. İncelemeler talassız şekillendirme yöntemleri ile ilgili sürtünme kabulleri ve bunların farklı yönleri ele alınarak sürdürüldü.

Daha sonra hidrodinamik yağlamanın oluşabildiği talassız şekillendirme yöntemleri olarak belirlenen; haddeme, tel çekme, hidrostatik ekstrüzyon ve basma ile şekillendirme konularındaki basınç ve yağ filmi geometrisi ile ilgili analizler incelendi.

Bu sırada analizlerden elde edilen teorik sonuçlar ve bunları etkileyen faktörler üzerinde durulup, pratikle karşılaştırmalara gidildi. Özellikle konunun en geniş biçimde uygulandığı, haddeme ve tel çekme konularında; Nasaş³⁹, Ereğli Demir Çelik⁴⁰ İşletmeleri, Metalsan⁴¹ gibi firmalarda deneysel çalışmalarda ve gözlemlerde bulunularak araştırmaya devam edildi. Her bir yöntemin sonunda analizlerle ilgili sayısal uygulamalar yapılarak çalışma tamamlandı.

SUMMARY.

The purpose of our research was to find out the application of hydrodynamic lubrication in the deformation processes. Before we began with the theoretical research of our subject, we examined the friction phenomenon and we tried to find out suitable framework for different frictional conditions, we also mentioned the wear phenomenon, which was a result of the friction and the lubrication. Which was necessary to decrease the effect of the friction while we examine the lubrication. We utilized both lubricants and the basic theoretical knowledge which might be defined in fluid dynamics for viscous fluids for each process we used, Reynolds, Navier-Stokes and thermal equilibrium equations. Since the theoretical research of hydrodynamic lubrication was the departure point of the subject we tried to examine it very carefully. For different film profiles which could be come in to during the hydrodynamic lubrication we analysed the force and the friction stress to determine the most appropriate film shape. To examine the hydrostatic extrusion which was of the important phenomenon in which hydrodynamic lubrication came in to being we mentioned the hydrostatic lubrication very briefly.

After completing the requirement of the basic theoretical research we tried to find out the assumptions, which was made about the friction, with their common results and the differences for plastic deformation processes. The main purpose of our investigation was to analyse a different hydrodynamic lubrication for each plastic deformation process, but since the subject was quite deep we could work with a little application for each processes.

We analysed the hydrodynamic lubrication; in strip rolling, wire drawing, hydrostatic extrusion and plane strain forging. While we examine those subjects we tried to find out the application of the phenomena in practice and we also researched the differences between the practice and the theory. To determine the position of those phenomena in practice we observed and obtained knowledge from different factories; Nasas. Ereğli Demir Çelik, Metalsan. Although the subject was not very appropriate for experiments, we made an experimental comparison about wire drawing and strip rolling.

TEZ YÖNETİCİSİ: Doç.M. EMİN YURCI.

Doç. NURULLAH GÜLTEKİN.

Doç. NURULLAH GÜLTEKİN.
Yard.Doç.Dr. HÜSEYİN SÖNMEZ.

Talaşsız şekil verme yöntemleri yaşadığımız yüzyılda büyük gelişmeler göstermiştir. Bu usul binlerce yıldan beri kullanılan bir imal usulü olmakla birlikte, geçen yüzyılın ortalarına kadar tecrübeye dayanılarak uygulanmış, daha sonraları ise hızla artan önemi ile birlikte bu konuda bilimsel araştırmalar başlatılmış ve geliştirilmiştir. Cisimlerin plastiklik özellikleri hakkındaki teoriler yirminci yüzyılın ortalarında ortaya çıkmış, bunların tekniğe uygulanmasına ise ancak son zamanlarda başlanılmıştır. Plastik şekil verme olaylarının bilimsel esasları henüz tam bir gelişme göstermemiştir.

Hızların ve güçlerin arttığı modern teknikte, özellikle plastik şekillendirme proseslerinde; hidrostatik ve hidrodinamik yağlama uygulamaları gittikçe daha fazla kullanılmaya başlamıştır. İnceleme ve uygulama bakımından kolaylık sağlamak amacıyla, talaşsız şekil verme yöntemleri ayrı ayrı ele alınıp, herbirindeki hidrodinamik yağlama olayları analiz edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların pratikle karşılaştırılması yapılmış, uygulamaya yönelik bilgiler, pratik sonuçlardan yararlanılarak derlenmiştir. Konuların sonunda oluşturulan tartışma bölümü çerçevesinde, teorik ve deneysel sonuçlar da irdelenmiştir.

Gerek talaşsız şekil verme olayları üzerine teorik ve deneysel çalışmaların başlangıç tarihinin yeni olması, gerekse şekillendirme esnasında proses akısını etkileyen faktörlerin çok çeşitli olması, araştırmacıların olayları sık sık amprik bağıntılarla ifade etmesine neden olmaktadır. Çalışmamızda biraz teorik olmakla birlikte, bu bağıntıların nasıl çıkarıldığını inceleme fırsatı bulduk.

Araştırdığımız bu önemli konuda bana yardımcı olan yol gösteren, değerli hocam Doçent M. Emin Yurci'ye, gerek tezimi yönettiği için ve gerekse öğrenciliğim sırasında kendisinden öğrendiklerim için şükranlarımı arz ederim. Ayrıca araştırmamda bana yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Sönmeze de tesekkürü borç bilirim.

1.-SÜRTÜNME.

1.1.GENEL TANIM VE SINIFLANDIRMA.

Sürtünme genel anlamda,temasta olan ve izafi hareket yapan iki cismin,temas yüzeylerinin,harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir.Birbiriyle temas eden hareketli parçalar arasında,kayma,yuvarlanma veya her ikisinin birleşimi şeklinde bir hareket söz konusudur.Böylece sürtünme kinetik bakımdan,kayma,yuvarlanma veya kayma yuvarlanma sürtünmesi şeklinde oluşur.Elastik malzeme yüzeyleri arasında.tam bir yuvarlanma hareketi meydana getirmek esasen mümkün değildir.Mevcut elastik ve bazı hallerde plastik deformasyonlar neticesi,daima bir kayma hali de mevcuttur.

İzafi hareket hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde bulunması veya bulunmaması bakımından sürtünme olayları üç kısımda incelenebilir.

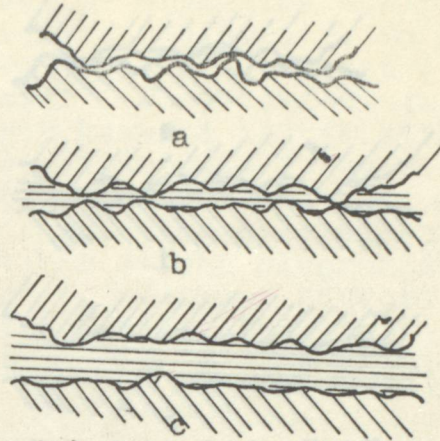
- 1- Kuru sürtünme.
- 2- Sıvı sürtünme.
- 3- Her ikisi arasında bulunan karma sürtünme.
(Karma sürtünme için çeşitli yazarlar sınır veya yarı sıvı sürtünmesi deyimini kullanmaktadırlar.)

Genel anlamda kuru sürtünme,birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir.

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir.Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme,yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur,bu duruma sıvı sürtünmesi denir.İkinci durumda,yani yüzeyler tamamen ayrılmadığı takdirde sınır sürtünmesi hali vardır.

Aslında söz konusu edilen sürtünme hallerinden sadece sıvı sürtünmesi hali,teorik ve analitik bakımdan tam olarak tarif edilebilmektedir.Kuru ve sınır sürtünmesine gelince,bunlar fiziksel bakımdan birbirinden farklı olan geniş sürtünme bölgelerini kapsarlar.Bu iki bölge arasında belirli bir sınır olmamakla beraber,aşağıdaki gibi bir ayırım yapılabilir.Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde istenilerek konur ve sıvı sürtünmesi hali oluşturulmazsa,sınır sürtünmesi,yağlayıcı madde konulmadığı takdirde kuru sürtünme hali ortaya çıkar.

Şekil(1) de muhtelif sürtünme halleri şematik olarak gösterilmiştir.

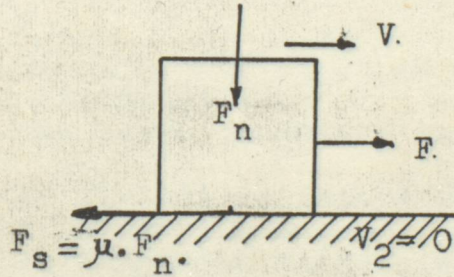


Şekil(1). Muhtelif sürtünme halleri. (Ref 1)

- a-Kuru sürtünme.
- b-Yarı sıvı sürtünme.
- c-Sıvı sürtünme.

1.1.1- KURU SÜRTÜNME:

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için şekil (2) de gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi



Şekil(2). Kuru sürtünmenin şematik modeli . (Ref 1)

hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan 2 cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı

$$F_s = \mu \cdot F_n. (1.1.1)$$

değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ sürtünme katsayısıdır.

Genel ifadeye göre sürtünme, izafi hareket yapan veya hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Sürtünme bir direnç olayıdır. Bu direnç, hareket halinde, harekete ters yönde bir hareket direnci şeklinde kendini gösterir. Şekil (2) deki cisimlerin herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse 2 durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda F kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar, yani sükun halinde bulunurlar. Bu halde yüzeyler arasında statik veya sükun sürtünmesi denilen bir direnç oluşmaktadır. Bu durumda Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetine tam olarak eşit ve ters yöndedir. Böylece;³

$$F_s = F.$$

yazılır. İkinci durumda F kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Kinetik veya doğrudan doğruya sürtünme denilen bu halde F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yöndedir. Aslında pratikte sürtünme denilince akla gelen bu sürtünmedir ve aşınma, enerji kaybı ve sıcaklık yükselişigibi olaylar bunun sonucunda oluşur. Bu ifadelere göre teknişte sürtünme hem istenilen hemde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkar.

Coulomb-Amontons³ kanunu olarak tanınan $(\mu \frac{F_s}{F_n})$ bağıntısına göre;

- Sürtünme kuvveti nominal temas alanına bağlı değildir.
- Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır, böylece sürtünme katsayısı

$$\mu = \frac{F_s}{F_n}.$$

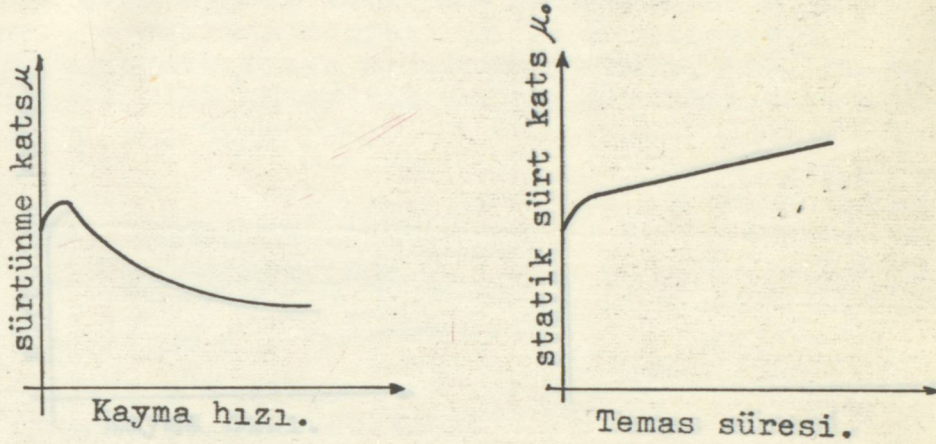
şeklinde ifade edilir.

- Sürtünme kuvveti nominal kayma hızından bağımsızdır.

Genellikle birinci ve ikinci hususların gerçeğe uygunluğu tamdır. Birinci hususun istisna hallerini yüzeyleri çok temiz ve yumuşak malzemeler teşkil eder. İkinci hususun istisna hallerini ise; elmas gibi çok sert veya teflon gibi çok yumuşak malzemeler teşkil eder.

Üçüncü hususa gelince durum biraz daha değişmektedir. Bu defa statik sürtünme katsayısı (μ_0) genellikle dinamik sürtünme katsayısından (μ) daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça dinamik sürtünme katsayısında olsa azalır. Buna karşılık normal kayma hızlarında hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit sayılabilir. Şekil (3) de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Sonuç olarak şu söylenebilir dinamik sürtünme sayısı kayma hızının bir fonksiyonudur, buna karşılık

statik sürtünme katsayısı temas süresinin bir fonksiyonudur. Şekil(3)



Şekil(3).Sürtünme katsayısının,kayma hızı ve temas süresine bağlı olarak değişimi. (Ref.3)

Sürtünme olayı incelenirken, yani bir kuru sürtünme teorisi kurulurken modeldeki, temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz olmadıkları göz önüne alınmalıdır.

Temas yüzeylerinin pürüzlülüğü nedeniyle, hakiki temas alanı A_h pürüzlülük mertebesinde küçük ve kısmi alanlardan ibaret olup temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden geometrik alandan (A) çok daha küçüktür. Yapılan deneyler, hakiki temas alanının $A_h (1/500 \dots 1/1000) A$ arasında olduğunu göstermektedir. Hakiki yüzey, pürüzlülüğe bağlı olduğundan, bunun büyüklüğü yüzey işleme yöntemlerine bağlıdır. Bunun yanı sıra, hakiki yüzeyin büyüklüğü üzerinde F_n yükleme kuvveti büyük rol oynamaktadır. Kuvvet büyüdükçe pürüzlerin deformasyonu nedeniyle temas yüzeyleri artar. Bowden³ ve Tabor³'a göre temas yüzeylerini oluşturan pürüzlerin plastik deformasyon yaptıkları kabul edilirse, hakiki yüzey

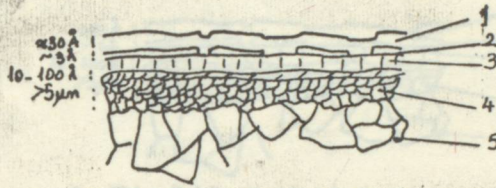
$$A_h = \frac{F_n}{HB}$$

olarak bulunur. Burada HB- temasta olan en yumuşak malzemenin yüzey sertliğidir.

Bazı fizikçiler sürtünme halinin hareketle kendini belli eden bir olay olduğunu öne sürmüşlerdir. Çok küçük hızlar mertebesinde yapılan bazı deneylerde, bu bölgede sürtünme durumunu karakterize eden sürtünme katsayısının sıfır

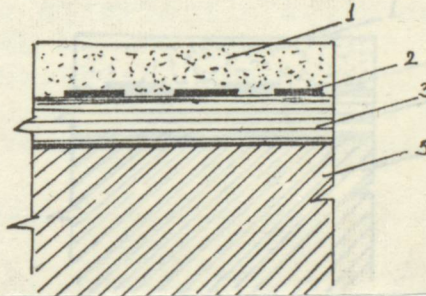
hızda sıfıra giden bir karakteristik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sınır haller bir tarafa bırakılırsa daima bir ilk hareket sürtünmesi diyebileceğimiz halden bahsedilebilir.

Yüzeylerin durumuna gelince yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında, ortamın atmosferinin ve bu atmosferi teşkil eden elemanların etkisinde olduğundan oksit, yağ, su buharı, pislik v.b gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır. Şek (4)



- 1-Pislik tabakası.
- 2-Adsorpsiyon tabakası.
- 3-Oksit tabakası.
- 4-Soğuk şekillendirilmiş tabaka.
- 5-Metal içi.

Şekil-4.
(Ref. 2.)

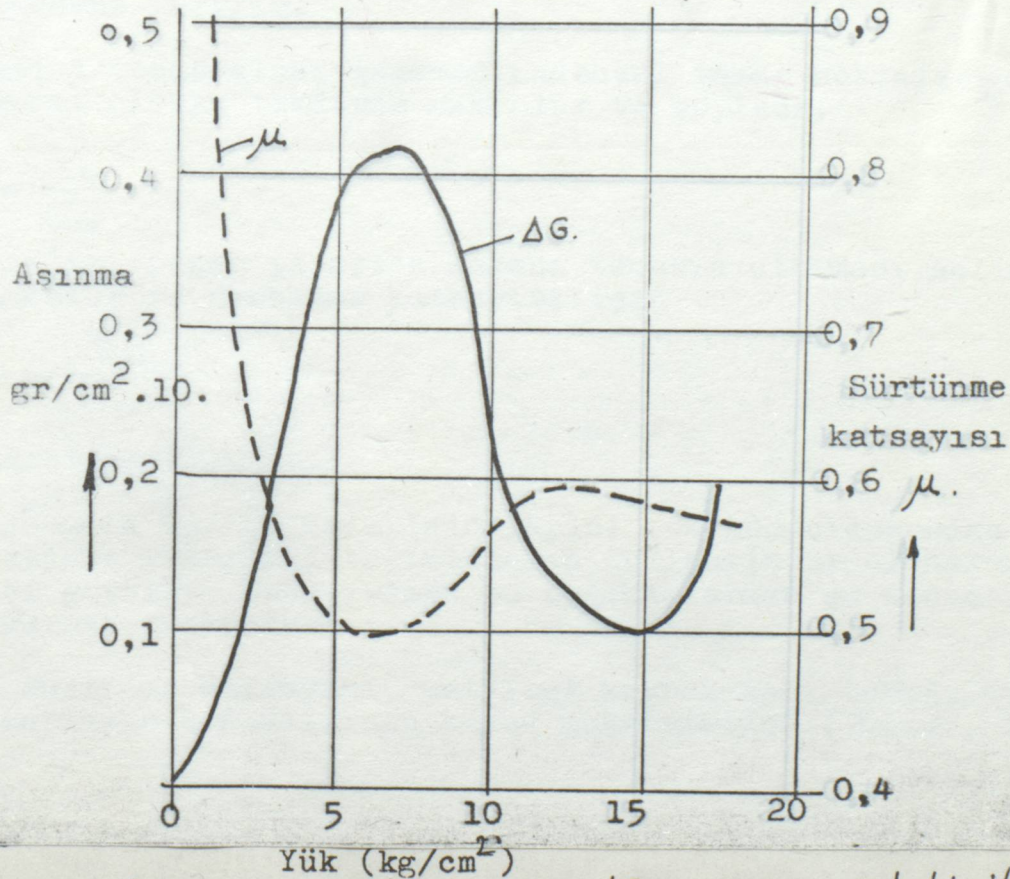


Adsorpsiyon yoluyla oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel veya kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Teknik kuru sürtünmede yüzeyler madensel temiz değildir, arada yüzeylere absorbe edilmiş gaz tabakaları ve bu gazların malzemeye meydana getirdikleri oksitler gibi kimyasal bileşikler mevcuttur. Kuru sürtünmenin mekanizması hayli karışıktır. Sürtünme direnci yüzey pürüzlerinin karşılıklı tesirlerine, küçük temas alanlarındaki metalik kaynama ve bunların tekrar koparılması için gereken dirence, atmosferdeki gazlar tesiriyle meydana gelen oksit tabakalarının kopma direncine bağlı olmaktadır. Yüzeylerin tam madensel temiz olmaları halinde, malzemelerin aynı veya affin olmaları halinde direnç çok büyümektedir. Malzemeler birbirleriyle az alakalı ise bu transfer azalmaktadır, ($\sim \%40$) buna mukabil sürtünme katsayısında incelenen değişiklik aynı mertebede olmamaktadır.^{1,4}

Kuru sürtünmeyi moleküler kuvvetler yoluyla izaha kalkmak, abzorbe tabakalardan ötürü ve teknik cisimlerde üst yüzeyin pürüzlü olması dolayısıyla pek uygun değildir. En düz yüzeyler bile birkaç yüz atom kalınlığı mertebesinde yükseklik farkları arzeden tepelerden teşekkül eder. Yaklaşık olarak iki atom kalınlığında bir etki alanı olan moleküler kuvvetler bu duruma göre etkili olamazlar.

Kuru sürtünmeye ait eski bir izah tarzında cisimlerin üst yüzeyleri ince diş şeklinde birtakım çıkıntılarla dolu olarak tasavvur edilmekte ve bu çıkıntıların karşılıklı birbirlerine takılmak suretiyle cisimlerin birbirlerini engellediği, kenetlendiği düşünülmektedir. Cisimlerin üst üste kayması sırasında pürüzler elastik deforme oldukları müddetçe Coulomb kanunu yürürlüktedir. Bu sebepten sürtünme katsayısı (μ_0) esas itibarıyla kayma yüzeylerinin yüzey yapısına tabidir.

Herhangi bir çıkıntıda yumuşak malzemenin, elastiklik sınırını aşacak kadar yüzey basıncı yükseltildiği takdirde kalıcı (plastik) deformasyonlar meydana gelir; malzeme çizilir ve aşınır. Pürüzler farklı yükseklikte ve yüzeye heterojen yayılmış olduğundan genel olarak çıkıntıların bir kısmı elastik diğerleri plastik deforme olur. Bu son durumda da Coulomb kanunu geçerlidir. Ancak sürtünme katsayısı daha da yüksektir. Ara durumlarda sürtünme katsayısı yüzey basıncına ve kayma hızına tabidir. Şekil (5) de yükle aşınma ve sürtünme arasındaki bağıntı görülmektedir.⁴



Sonuç olarak sürtünme mekanizması şu şekilde ifade edilebilir. Yük tatbik edilmeden önce temas halindeki tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yük tatbik edildikten sonra tabakanın bir kısmı kopar. Ve buradaki küçük temas alanlarında metal kaynaması meydana gelir. İzafi hareket yapan yüzeylerde, sürtünme; metalsel kaynak bağları ile tabii tabakalar arasındaki bağlantıların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti hem kaynak bağlarını hem de bağlantıları koparan kuvvettir. Yükü taşıyan A_h alanının metal kaynak bağı teşkil eden yüzdesi, α ; metal kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kayma mukavemeti τ_{km} ve tabii tabakalar arasındaki bağlantıların kayma mukavemeti τ_{ko} ile ifade edilirse, sürtünme kuvveti,

$$F_s = \alpha \cdot A_h \cdot \tau_{km} + (1 - \alpha) \cdot A_h \cdot \tau_{ko}$$

olarak yazılır. Sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} = \alpha \frac{\tau_{km}}{HB} + (1 - \alpha) \frac{\tau_{ko}}{HB}$$

olarak bulunur. Yüzey sertliği HB yerine tabakanın kopma mukavemeti σ_{ko} konursa

$$\mu = \alpha \frac{\tau_{km}}{\sigma_{ko}} + (1 - \alpha) \frac{\tau_{ko}}{\sigma_{ko}}$$

sonucuna varılır.

Hakiki temas alanı tamamen madensel temas noktalarından ibaret olduğu takdirde $\alpha=1$ olur ve böylece,

$$\mu = \frac{\tau_{km}}{\sigma_{ko}}$$

yazılır. Diğer taraftan, madeni temasın olmaması halinde $\alpha=0$ olur ve sürtünme katsayısı için

$$\mu = \frac{\tau_{ko}}{\sigma_{ko}}$$

bağıntısı bulunur.

α , τ_{km} ve τ_{ko} değerlerinin tayini çok güç olduğundan pratikte yukardaki bağıntıların kullanılması olanaksız gibi görülür. Buna rağmen bu bağıntılardan şu sonuçları çıkarmak mümkündür:

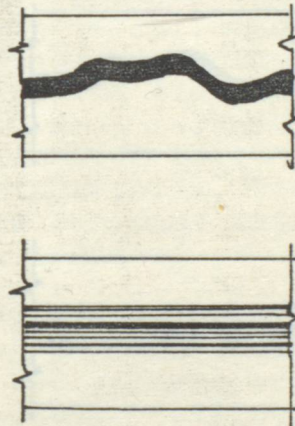
a) Sürtünme katsayısı, metalsel kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kayma mukavemetine (τ_{km}), ta-

bakanın kopma mukavemetine (σ_{ko}) ve bağlantıların kayma mukavemetine (τ_{ko}) bağlıdır. τ_{km} ve τ_{km} küçük, σ_{ko} in ise büyük olması halinde sürtünme katsayısıda küçük olur.

b) Metalsel kaynak bağı teşkil etmiş olan temas halindeki noktalarının kayma mukavemeti, temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır. Bu bakımdan;

— Birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen, demir-krom ve nikel gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağları oluşmaktadır. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişmekte, yüzeyler üzerinde izler ve bu yüzden diğerine malzeme transferi görülmektedir. Bazı hallerde kaynama noktaları o kadar şiddetli olurki yüzeyler birbirine kilitlenir, hareket sağlansa bile yüzeyler tamamen bozulmuş olur. Buna yenme (yalama) denir.

— Benzemeyen ve birbirleriyle ilgili (afin) olmayan malzemeler arasında daha hafif ve düzenli bir sürtünme oluşmakta ve yüzeyler üzerinde çok ince izler görülmektedir. Bu şekil (6) de görülmektedir.



Şekil(6)-Yüzeyler üzerindeki izler.

(Ref.2)

— Birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert diğeri yumuşak olduğu takdirde, yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile derhal kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi olur. Yani yumuşak malzeme bir yağlayıcı madde gibi rol oynar. Bunun sonunda sürtünme katsayısı (μ) azalır ve yüzeyler arasında yenme olayı meydana gelmez.

Şu halde küçük sürtünme katsayısı elde etmek için malzemeler aynı veya birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen türden olmamalıdır. Ayrıca malzemelerin birinin yumuşak, diğerinin sert olması gerekir.

c) Tabakanın kopma mukavemeti sürtünme katsayısını geniş ölçüde etkiler. Bu bakımdan a ve b maddelerinde belirtilen hususlara göre çeşitli kimyasal bileşikler kapsayan tabii tabakada esas olarak oksit tabakasının mukavemeti önemlidir.

d) Aslında sürtünme katsayısı şu değerler arasında değişir. Böylece,

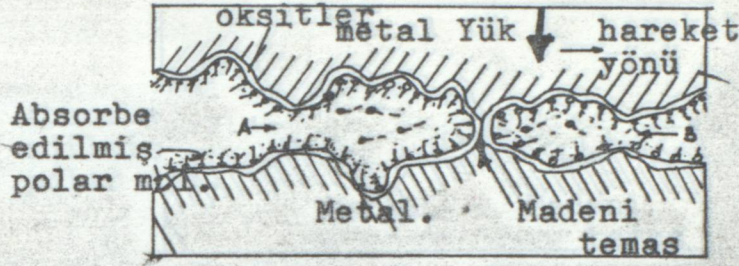
$$\frac{\tau_{ko}}{C_{ko}} \ll \mu \ll \frac{\tau_{km}}{C_{ko}}$$

ifadesi yazılır. Pratikte sürtünme katsayıları deney ile tayin edilir.

1.4.2- SINIR SÜRTÜNMESİ:

Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde sürtünme direncinin büyük miktarda azaldığı bilinmektedir. Yağlayıcı madde yüzeylere alakası nispetinde bu yüzeyler üzerinde adeta bir manto teşkil etmekte ve madensel teması kısmen ve tamamen önliyebilmektedir. Eğer yüzeyler yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış ve madensel temas önlenmişse, bu halde sıvı sürtünmesi hali denmektedir. Sıvı sürtünme ile kuru sürtünme arasında ise kısmen madensel temasında bulunduğu geniş bir bölge vardır. Bu bölgeyede yarı sıvı sürtünmesi bölgesi veya sınır sürtünme bölgesi adı verilir. Pratikte ençok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,03 ila 0,1 arasında değişir.

Sıvı sürtünmesi sadece yağın vizkositesi ile izah edildiği halde az yağ ile yağlamada tecrübelerden bilindiği üzere başka bir yağlama özelliği ön plana geçer. Yağın bu özelliğine ıslatma (oiliness) kabiliyeti denir. Yalnız vizkosite ile izah edilmeyen sürtünme olayları bu özelliğe verilmekte ve buna sınır tabakalarında moleküler kuvvetlerin etkilerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil gurupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır. Şek (7.). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Ancak moleküller kuvvetler büyüklüğü mertebesi molekül çapına eşit olan bir alanda etkilidir. Halbuki pratikte rastlanan en küçük film kalınlığı (0,001mm) dahi molekül çapının 10^4 katıdır. Bu nedenle sınır sürtünmesinde moleküler kuvvetlerin sıvıyı yüzeye yapıştırmaktan başka bir tesiri olması ihtimali azdır.



Şekil(7).(Ref.2)

Yüzeyler üzerinde bir yağ tabakasının oluşturulmasında da, kuru sürtünmedeki tabii tabakanın oluşumunda olduğu gibi aynı olay rol oynamaktadır. Buna karşılık bu 2 olay arasında ufak bir fark vardır. Tabii tabaka esas olarak oksit tabakasından oluştuğundan çok az miktarda yağ molekülünü ihtiva eder. Bu sebepten yüzeyde yağ molekülleri ancak tesadüfen bulunabilir. Sınır sürtünmesinde esas olarak yağ tabakası söz konusu olduğundan yağlama görevini yapmak üzere yüzeyler arasında yağ konulur. Yağ tabakasının tabii tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti τ_{kf} ve kayma mukavemeti τ_{kf} ile ifade edilirse sürtünme katsayısı için,³

$$\mu = \alpha \frac{\tau_{km}}{\tau_{kf}} + (1 - \alpha) \frac{\tau_{kf}}{\tau_{kf}} \quad (1.1.2.1)$$

yazılır, iyi bir yağlama sisteminde α çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı

$$\mu \approx \frac{\tau_{kf}}{\tau_{kf}} \quad (1.1.2.2)$$

olarak bulunur. Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adi yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetlerini büyütmek ve kayma mukavemetlerini azaltmak için yağlara katık (aditif) denilen bir takım ek maddeler konur.

Olaya değişik bir açıdan yaklaşım sağlamaya çalışırsak sınır sürtünme bölgesinde çalışan iki yüzeyden, üstte hareket halinde bulunan yüzeyin yükü P_{nin} , P_e gibi bir kısmı temas yüzeylerinin sivri tepeleri pürüzler tarafından doğrudan doğruya taşınır. Yağda meydana gelen kaldırma kuvveti P_f ile gösterilirse o takdirde;

$$P = P_e + P_f$$

bağıntısı yazılabilir.

Burada da bütün kuvvetler kayma yüzeyinin birim genişliğine nisbet edilebilir. Kaydırma kuvveti R de benzer şekilde R_G ve R_F gibi 2 kısma ayrılabilir. Böylece sınır sürtünme:

$$\mu = \frac{R}{P} = \frac{R_F + R_G}{P_F + P_G} \quad (1.1.2.3)$$

şeklinde ifade edilir

Kayma yüzeylerinin doğrudan doğruya teması tektük noktalarda kaldığı sürece P_G/P ve R_G/P değerleri μ_f in yanında çok küçüktür. O takdirde sınır sürtünme sayısı i için:

$$\mu = \frac{R_F}{P_F} + \frac{R_G}{P} = \mu_f + \frac{R_G}{P} \quad (1.1.2.4)$$

ifadesi yazılabilirse bunun sıvı sürtünme katsayısı μ_f den, R_G/P kadar küçük bir miktar kadar farkettiği görülür. (Bu küçük miktar, başlıca; malzemeye ve kayma yüzeylerinin yüzey durumuna tabidir.)

$$\mu \cong \mu_f.$$

Aşınma ilerledikçe kayma yüzeylerinin doğrudan doğruya teması ve dolayısıyla R_G/P ve P_G/P payları artar. Bunun sonucu olarak (1.1.23) numaralı denklemi çıkarırken yaptığımız sadeleştirmeye artık müsaade edilemez. Denklem birleştirilmesinden;

$$\mu = \frac{R_f}{P_f} \cdot \frac{P_f}{P} + \frac{R_G}{P} = \mu_f \cdot \frac{P_f}{P} + \frac{R_G}{P_G} \cdot \frac{P_G}{P} \quad (1.1.2.5)$$

$$\mu = \mu_f \cdot \frac{P - P_G}{P} + \mu_G \cdot \frac{P_G}{P} \quad (1.1.2.6)$$

veya

$$\frac{\mu}{\mu_G} = \frac{\mu_f}{\mu_G} \left(1 - \frac{P_G}{P} \right) + \frac{P_G}{P} \quad (1.1.2.7)$$

yazılır. Denklem sağında birinci terim gittikçe küçülür ve limitte sifıra yaklaşır. Bu terim gittikçe büyüyen ikinci terimin yanında ihmal edilebildiği takdirde:

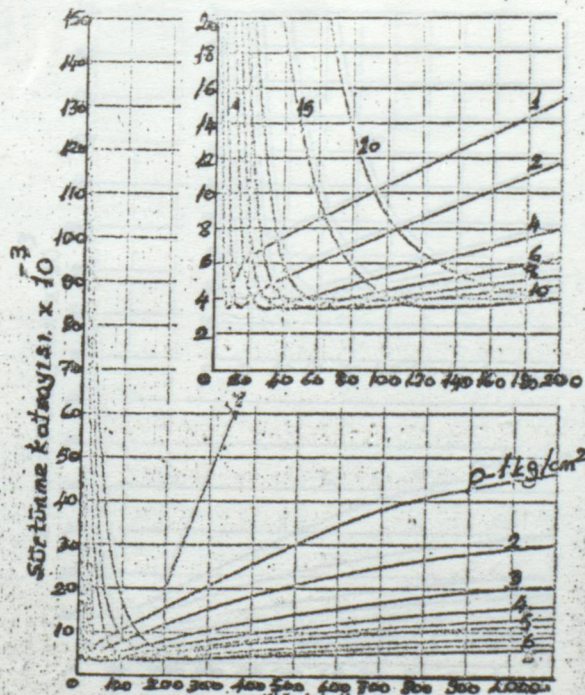
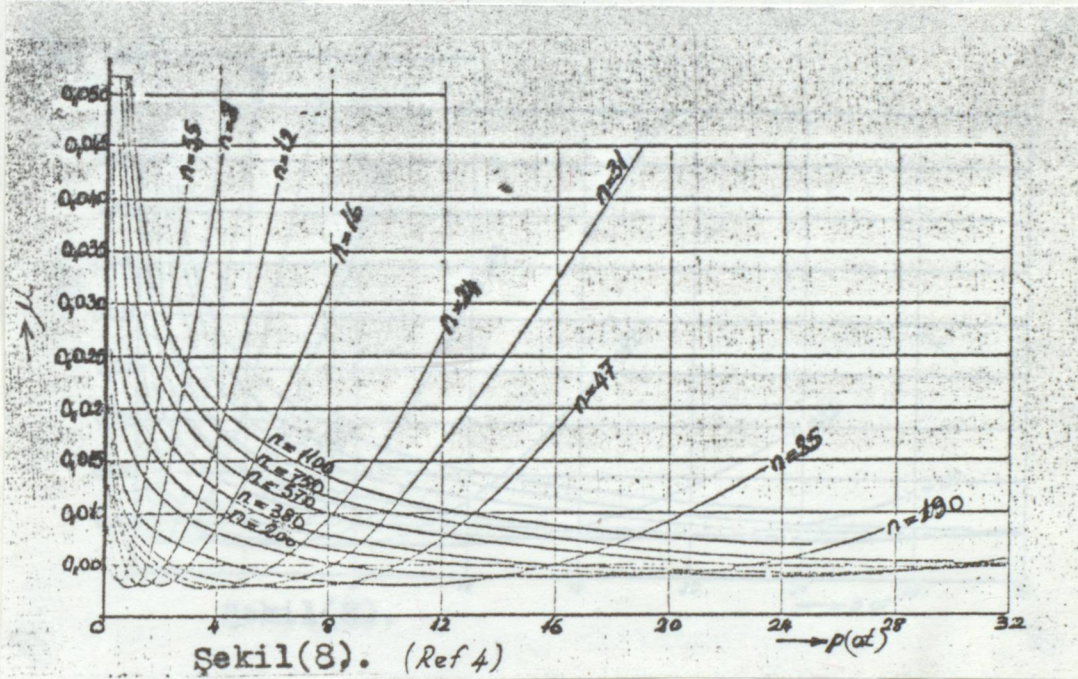
$$\mu = \mu_G \cdot \frac{P_G}{P} = \mu_G \cdot \left(1 - \frac{P_f}{P} \right) \quad (1.1.2.8)$$

bağıntısı bulunur.

P_f kayma hızı U ile orantılı olduğundan,

$$\mu = \mu_0 (1 - K \cdot U)$$

(1.1.25) ve (1.1.24) ifadeleri ile belirtilen sınır durumlarının birinden diğerine geçiş yavaş yavaş olur. U nun çok fazla olan etkisi Stribeck ve Köhler gibi araştırmacıların deneylerinde sürtünme katsayısının bu bölgedeki dik (hemen doğruya yakın) gidişinde açıkça görülür. Şekil (8).



Şekil(9). (Ref 4) Dönme sayısı (d/dak)

Yine Stribeck³ tarafından yapılan bir deneye göre Şekil (9) den görüldüğü gibi. Muayyen bir yük tesiri olan bir yağ tabakasında hız arttıkça ve gereken yağ miktarı sağlandıkça sürtünme katsayısı küçülmekte ve belirli bir minimum değerden sonra tekrar büyü mektedir. Bu ikinci bölgedeki değerler kuru sürtünme hali diyebileceğimiz hızın sıfır olduğu noktaya nazaran çok küçük kalmaktadır.

Paralel yüzeyler arasında: yük kaldırmaya elverişli yağ filmi oluşmaz. Bununla beraber yağ her iki yüzeye yapıştığı takdirde, kaydırma hareketi esnasında⁴ gibi bir takım kayma gerilmelerini yenme zorunluğu vardır. Bu takdirde; $P_F=0$, $P_G=P$, $R_G=P=\mu_G$, temas yüzeylerinin sürtünme katsayısı $R_f=F \cdot \tau_0$ olup, $P/F=p$ değeri ile;

$$\mu = \mu_G + \frac{\tau_0 \cdot F}{P} = \mu_G + \frac{\tau_0}{p} \quad (1.1.2.3)$$

bağıntısı bulunur.

Basınç yükselmediğinden, yani $\frac{dp}{dx} = 0$ olduğundan ve film kalınlığı h_0 , kayma yüzeylerinin pürüzleri toplamına eşit olduğundan.

$$\tau_0 = \eta \cdot \frac{U}{h_0} \quad (1.2)$$

yazılabilir.

Böylece sınır sürtünmedeki sürtünme katsayısı ;

$$\mu = \mu_G + \frac{\eta \cdot U}{p \cdot h_0} \quad (1.2.1)$$

olarak bulunur. Buna göre η ve U ne kadar büyük ve P ile h_0 ne kadar küçük olursa μ okadar büyük olur.

(1.1.2 Sınır Sürtünmesi): Olayların izahında aşağıdaki deneylerin gözden geçirilmesi faydalıdır:

1— Yüklü, düzlem bir kayma yüzeyi, (2-3 mm kalınlığında yağ tabakası ile örtülü) taban plağına doğru el ile birkaç mm sağa sola hareket ettirilirse, ilk anda kaydırma-ya karşı direncin pek az olduğu görülür. Ancak bir süre sonra bu direnç hızla artar ve nihayet kayma yüzeyi âni olarak (bir çarpma ile) yapışır kalır. Kayma yüzeyi üzerindeki basma kuvveti kaldırıldıktan sonrada kaydırma, oldukça büyük kuvvetlere ihtiyaç gösterir. Bu yapışma yağlamanın bir sınır halidir. Kayma yüzeyi, plak üzerinde yapışmıştır.³

Her iki yüzeyi birbirinden ayırmak için bir çekme veya kesme kuvvetine (dolayısıyla çekme gerilmesi σ_z veya kayma gerilmesi τ ya) ihtiyaç vardır. Bu kuvvet, yağın viskozitesi ile orantılı olduğu gibi, kuvvetin etki süresi olan t_z veya t_s e de tâbidir. Bunun kanunu:

$$\sigma_z \cdot t_z = \text{Sabit} = \eta_z \quad \text{veya,} \quad \tau \cdot t_s = \text{sabit} = \eta_s$$

şeklinde ifade edilir.

η_z ve η_s sabiteleri viskozite boyutunda olup, bunların değerleri ile yağın viskozitesi arasında sabit bir orantı faktörü bulunduğu deneylerden görülmektedir.

$$\frac{\eta_z}{\eta} = \psi_z \quad \text{ve} \quad \frac{\eta_s}{\eta} = \psi_s$$

Deneyde kullanılan yağ türlerinde ψ_z/ψ_s oranı, 15 ile 16 arasında sabit bir değer arz etmektedir.

Heidebroek³ ve Pietsch³ bir yağın yağlama kabiliyetini tayinde bu basit ölçme metedunu teklif etmektedir. Metodun avantajı, viskozite ile birlikte yağlama kabiliyetinde etkisi olan (dış yüzey yapısı, malzeme vesaire gibi) diğer faktörleri de sayısal olarak değerlendirebilmesindedir. Çelikte, aynı bir yağ için:

kaba eğe ince eğe kaba zımbara ince zımbara ile işlenmiş yüzeylerde.

$\eta_z = 20.$	30.	70.	$105 \cdot 10^3 \text{ kg.s/m}^2$
----------------	-----	-----	-----------------------------------

olarak bulunur.

2— Küçük, parlak madeni bir takosun hareket yüzeyine hassas tartılmış bir miktar yağ homogen bir şekilde (0,15 ilâ 0,8 mg/cm²) fırça ile sürülür. Bu takos, keza parlak olan ve dönmekte olan bir çelik disk üzerine basılır. Viskozitenin etkisini elimine etmek için bütün yağ cinslerinde aynı viskozite ile deney yapılmıştır. Bu maksadla da dönen diskin sıcaklık derecesi, söz konusu yağda belirli viskoziteyi veren derece olarak ayarlanmıştır. Takosçuğun sürtmesi, başlangıçta pek yavaş olarak yükselir. Ancak bu süre geçtikten sonra sürtme sayısı birden bire, hemen hemen âni denecek şekilde yükselir. Bu süre içinde gidilen yol yağın yağlama kabiliyetine bir ölçü olarak alınmaktadır. W.Büche nin yaptığı deneyler göstermiştir ki, çeşitli yağ cinslerinde (fakat aynı şartlar altında: $\eta = 0,0043 \text{ kg.s/m}^2$, $P = 4,55 \text{ kg/cm}^2$, yağ miktarı 0,8 mg/cm²) kritik kayma mesafeleri birbirinden hayli farklıdır. Örneğin katran yağında (45° C-de) bu mesafe 180m olduğu halde ceviz yağında (22° C-de) mesafe 4479m bulunmuştur.

Moleküler kuvvetlerin etkisi ancak olayın sonunda (yapışma sırasında) açıkça belli olmaktadır. Viskozite azaldıkça kritik kayma mesafesi de azalmaktadır. Böylece sınır sürtmesinde viskozitenin apaçık bir etkisi olduğu görülür. (1.2.) numaralı denklem sınır yağlamasına uygulanırsa, yağın ısınmasının ve dolayısıyla buharlaşma tehlikesinin (C.8) ya tâbi olduğu görülür. İlk defa olarak Vogelpohl⁴, yağ muayene makinalarındaki ölçmelere uygun olarak $b/c.8$ büyüklüğünün, bir yağın yağlama kabiliyetine ölçü teşkil ettiğine işaret edilmiştir. (Burada b - viskozite eğrisinin dikliğini gösterir.) Sınır yağlamasının bu yönden incelenmesinde moleküler etkiler göz önünde bulundurulmaktadır. Buharlaşma sıcaklığının da bir rol oynaması, ihtimal içindedir.

Çeşitli yağ cinslerinin çok uzun ve ince (iki atom kalınlığında) moleküller teşkilindeki kabiliyetlerinin de önemi vardır W. Büche nin deneylerine nazaran Voltol yağının yağlama kabiliyeti (kayma mesafesi), piyasada kullanılan madeni yağlarınkinden çok daha yüksektir.

Kuru sürtme yakındaki sınır durumu özellikle sürtme mekanizmalarında önemlidir. Kayma hızının pek açık etkisi yanında sürtme sayısına etkisi olan faktörlerden başlıca biri de kayma yüzeylerinin durumudur. Yüzey basıncının etkisi bu söylediğimiz iki faktör yanında ikinci derecede kalır. Bununla birlikte kayma hızı ve yüzey durumu aynı kalmak şartıyla yüzey basıncı azaldığı takdirde sürtünme sayısı artar. Önlenmesi imkânsız olan aşınma, oksidasyon ve kirlenme sonucunda yüzey durumu zamanla değiştiğinden buna tâbi olarahtan sürtme sayısının da zamanla değişmesi gerekmektedir; ki bu durumun hesaplarda göz önüne alınması gerekir. Bu sebeptendir ki sürtme sayılarını verirken ancak bir takım sınır değerleri verilebilir, ki bu değerler de birbirinden hayli farklıdır.

Örneğin: Ref(3)

Dökme demir, dökme demir üstünde.	$\mu=0,1-0,15$.
Dökme demir, kösele üstünde.	$\mu=0,15-0,30$.
Dökme demir, tahta üstünde.	$\mu=0,2-0,4$.
Dökme demir, amyant üstünde.	$\mu=0,3-0,5$.

Bilindiği üzere dökme demirin kayma özelliği pek elverişlidir ve yeter derecede yağlandığı takdirde sarmaya istidadı azdır. Fren sürtme yüzeyi olarak bugün tahta ve kösele yerine hemen hemen yalnız amyant kullanılmaktadır. Amyant hem çok daha yüksek sıcaklıklara dayanır ve hem de aşınması hiç denecek kadar azdır. Uzun amyant elyafı,

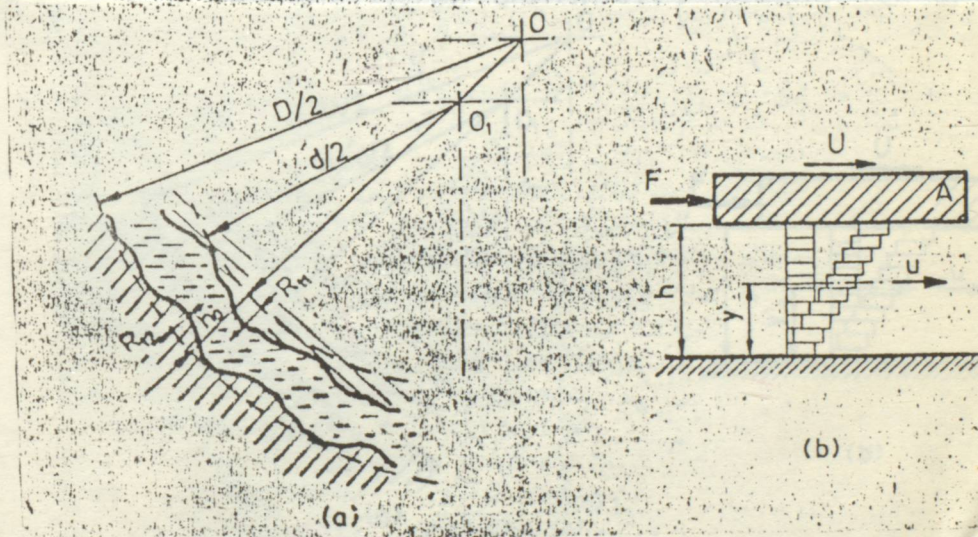
prinç teller ile birlikte şerid halinde dokunur. Kısa elyaf ise, madenî talaş ve sun'î reçine tozu ile karıştırılarak karton şeklinde işlenir veya özel şekillere pres edilir. Bu kabil kayma yüzeylerinin sürtme sayılarını tayin etmek üzere çok sayıda deneyler yapılmış bulunmaktadır. Bunlara karma sürtme kanunları geçerlidir.

1.1.3. SIVI SÜRTÜNMESİ:

Sıvı sürtünmesinde madeni yüzeyler arasında bulunan yağ tabakasındaki basınç, dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığı takdirde yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur. Şekil (10). Yüzey pürüzlülüğü göz önüne alınırsa geometrik bakımdan sıvı sürtünmesi

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2}$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada R_{t1} ve R_{t2} her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür.



Şekil(10). Sıvı sürtünmesinin şematik gösterilişi. (Ref3)

Madensel yüzeylerde doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakalarının adsorpsiyon dolayısıyla her iki yüzey boyunca tamamiyle yapışmış olduğu görülür, şöyle ki U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan tabakanın hızı U , sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır. Ara tabakalarının hızı y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişir. Böylece sıvı sürtünmesi halinde sürtünme esas itibarıyla birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır. Viskoz bir akışkanda meydana gelen kayma gerilmeleri Newton varsayımına göre,

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}$$

şeklinde belirtilebilir. Burada (η) yağın viskozitesi, (du/dy)-y mesafesine göre hız değişimi (gradyanı) veya kayma oranıdır. Kayma gerilmelerine bağlı olan sürtünme kuvveti

$$F_s = \eta \cdot \frac{du}{dy} \cdot A. \quad (1.2.1)$$

olarak yazılır. Burada A- hareketli madensel yüzey ile yağ tabakası arasındaki temas alanıdır. Böylece kuru ve sıvı sürtünmesi hallerinde olduğu gibi burada da sürtünme katsayısı;

$$\mu = \frac{F_s}{F}$$

şeklinde ifade edilir.

Sıvı sürtünmesinin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Basınç oluşumu Hidrodinamik ve Hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

1. Hidrodinamik sıvı sürtünmesinde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basıncılı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde gerçekleşir.

Hidrodinamik sıvı sürtünmesi kinematik ve dinamik şartlara bağlı olduğundan uygulama alanı sınırlıdır. Genellikle bu sürtünme hali, izafi hareketin sürekli olduğu ve yağ tabakasının hareket yönünde daraldığı sistemlerde oluşur. Öteleme hareketi yapan paralel yüzeyler arasında bir basınç alanı oluşamaz. Öteleme hareketi sırasında hareket yönünde daralan bir yağ tabakası olduğu takdirde, çok süreli bir sıvı sürtünmesi hali gerçekleşebilir; ancak bu sürtünme hali hiç bir zaman sürekli olamaz.

Alan içerisinde bulursa, bu sistemler sıvı sürtünmesinin etrafına göre Magnetohidrodinamik, Magnetogazodinamik, Magnetohidrostatik ve Magnetogazostatik gibi yönleriyle elemlenir.

Sıvı sürtünmesi hallerine ait çeşitli yöntemler Şekil (11) de gösterilmiştir.

Yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilir. Buna göre sıvı sürtünmesi halleri Hidrodinamik, Gazodinamik veya Reodinamik olarak isimlendirilir.

2. Hidrostatik sıvı sürtünmesi halinde, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç bir pompa vasıtası ile sağlanır ve yağ basınç ile yüzeyler arasında gönderilir. Bu takdirde:

— İzafi hareket yapan bütün sistemlerde yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olmaksızın statik sıvı sürtünmesi sağlanabilir.

— Statik sıvı sürtünmesinde sükûnet halinde bulunan yüzeyleri birbirinden bir yağ tabakası ile ayırmak olasıdır. Böylece bu gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında sıvı sürtünmesi hali vardır. Şekil (3) statik sıvı sürtünmesinde sürtünme katsayısının hız ile değişimini göstermektedir. Kuru veya sınır sürtünmesinin bulunmadığı bu en mükemmel yağlama durumunda aşınma da yoktur.

Bu üstünlüklerine rağmen statik sıvı sürtünmesi ile çalışan sistemlerin mahzurları şu şekilde özetlenebilir:

— Tesisat bakımından (motor, pompa, süzgeç, dirençler) oldukça karışık ve pahalı bir sistemdir.

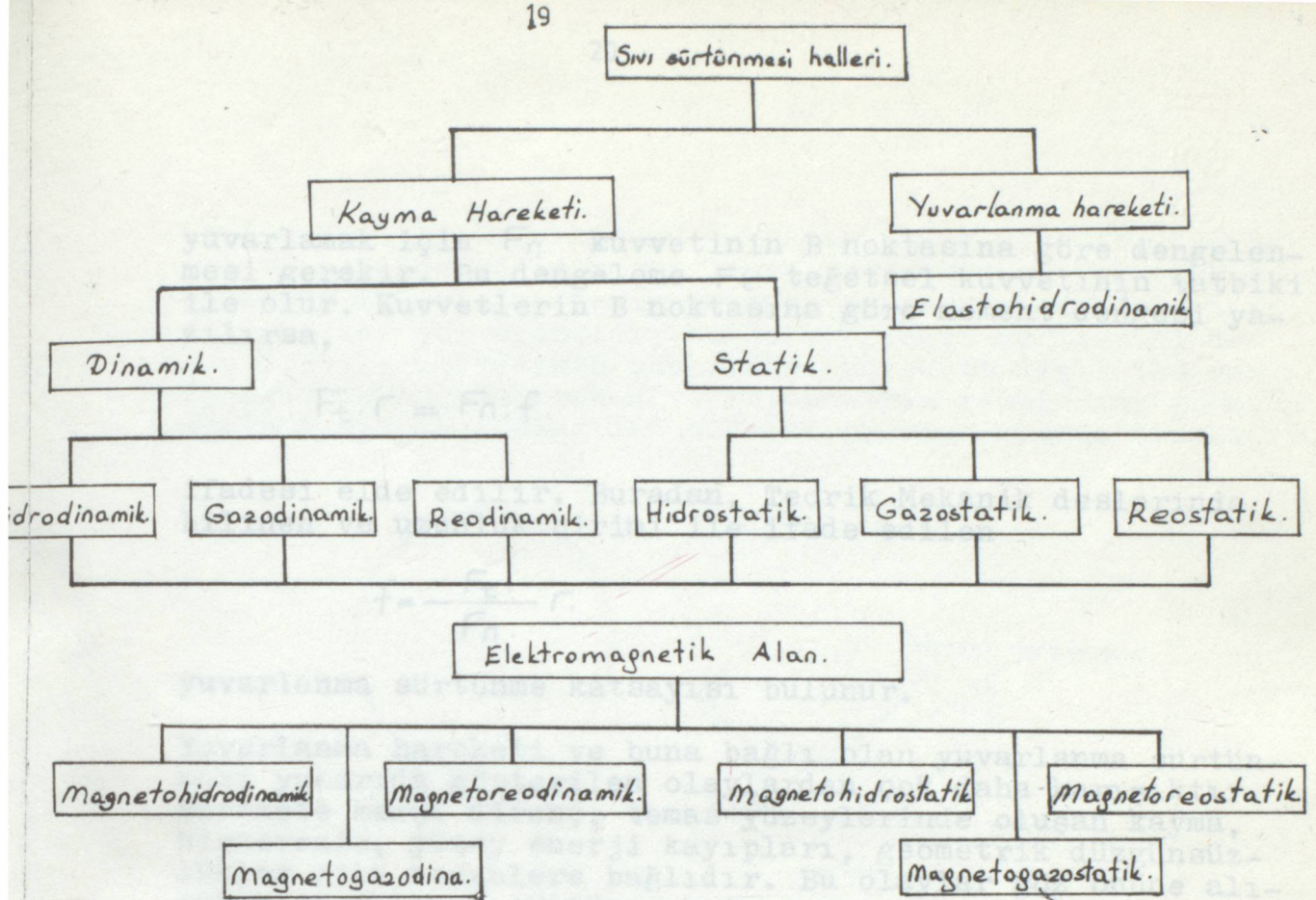
— Bu tesisat, arızaların daha sık olarak meydana gelmesine yol açar.

Yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilir. Buna göre sistem Hidrostatik, Gazostatik veya Reostatik olarak isimlendirilir.

Teknolojinin gelişmesi ile yağlama alanında da yeni yön-

temler uygulanmaya başlanmıştır. Örneğin sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerdeki yağlayıcı elektromagnetik alan içerisinde bulunursa, bu sistemler sıvı sürtünmesinin cinsine göre Magnetohidrodinamik, Magnetogazodinamik, Magnetohidrostatik ve Magnetogazostatik gibi yöntemlerle yağlanabilir.

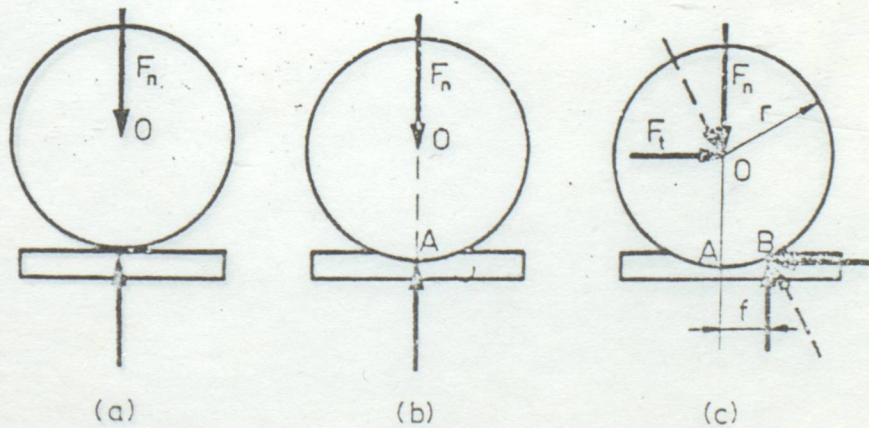
Sıvı sürtünmesi hallerine ait çeşitli yöntemler Şekil(11) de gösterilmiştir.



Şekil(11).Sıvı sürtünmesi halleri. Ref(1)

1.1.4-YUVARLANMA SÜRTÜNMESİ

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında Şekil (12-a), hiç bir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerin elastik ve daha az olarak da plastik deformasyonlar oluşur Şekil (12-b): şöyle ki, temas yüzeyleri doğru veya nokta değil de alan şeklindedir. Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelmektedir Şekil (12-c). Buna göre dönel elmanı



Şekil(12).Yuvarlanma sürtünmesi. (Ref.1)

yuvarlamak için F_n kuvvetinin B noktasına göre dengelenmesi gerekir. Bu dengeleme F_t teğetsel kuvvetinin tatbiki ile olur. Kuvvetlerin B noktasına göre moment dengesi yazılırsa,

$$F_t \cdot r = F_n \cdot f.$$

ifadesi elde edilir. Buradan, Teorik Mekanik deslerinde bilinen ve uzunluk birimi ile ifade edilen

$$f = \frac{F_t \cdot r}{F_n}.$$

yuvarlanma sürtünme katsayısı bulunur.

Yuvarlanma hareketi ve buna bağlı olan yuvarlanma sürtünmesi yukarıda gösterilen olaylardan çok daha karışıktır. Harekete karşı direnç, temas yüzeylerinde oluşan kayma, histerezis, yüzey enerji kayıpları, geometrik düzgünsüzlükler gibi nedenlere bağlıdır. Bu olaylar göz önüne alınarak yuvarlanma sürtünme katsayısı;

$$\mu_r = \frac{F_t}{F_n}.$$

şeklinde ifade edilir. Tam geometrik şekle yakın bir eleman için $\mu_r = 0,005$ ile $0,00001$ arasındadır. Elastik deformasyon nedeniyle, temas yüzeylerinde tam yuvarlanma çok az sayıda belirli noktalarda meydana gelir.

Ekseriya yuvarlanma, elastik deformasyon ve kaymadānoluşan bir sürtünme olayı şeklindedir.

Bunların yanı sıra, yuvarlanma sürtünmesinde en çok rastlanan dişli çarklar ve rulmanlar gibi sistemlerde temas yüzeylerindeki kayma, başka faktörlere bağlı olarak oluşmaktadır. Örneğin dişli çarklarda kavrama özelliği, rulmanlarda Coriolis kuvvetleri gibi etkenler kaymayı meydana getirir.⁷

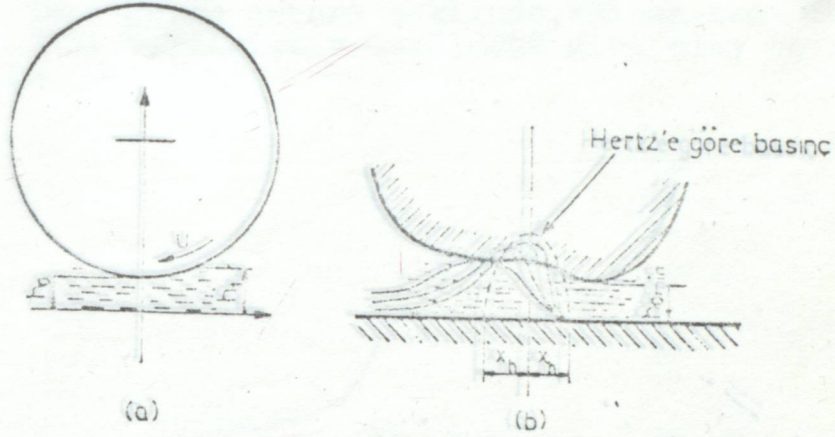
Sonuç olarak yuvarlanma sürtünmesinde sürtünme kuvveti, normal kuvvetin çok küçük bir payıdır.

Yuvarlanma hareketinde bulunan cisimlerin temas yüzeylerinde, elastik deformasyonlara neden olan Hertz yüzey basınçları oluşur. Ayrıca yüzeylerin arasında yağ bulunduğu takdirde, sıvı sürtünmesi oluşabilir. Bu olaya, elastik deformasyon ve hidrodinamik etkilerinden dolayı Elastohidrodinamik sıvı sürtünmesi denir. Şekil (43.) bu konudan daha sonra bahsedilecektir.

1.1. AŞINMA

1.1.1. Genel ifadeler.

Problemle ilgili şu hususu da hatırlatmak gerekir; basınç etkisi altında yağın viskozitesi artmaktadır. Çok yüksek basınçlarda, viskozitenin artması yağın sıvı karakterinin değişmesine yol açabilir; bu da problemin verilerini değiştirebilir. Pratikte yuvarlanma hareketi dişli ile kam (yürek) mekanizmalarında ve rulmanlarda rastlanır. Bu nedenle yukarıda gösterilen olaylar bu sistemlerde önemlidir.



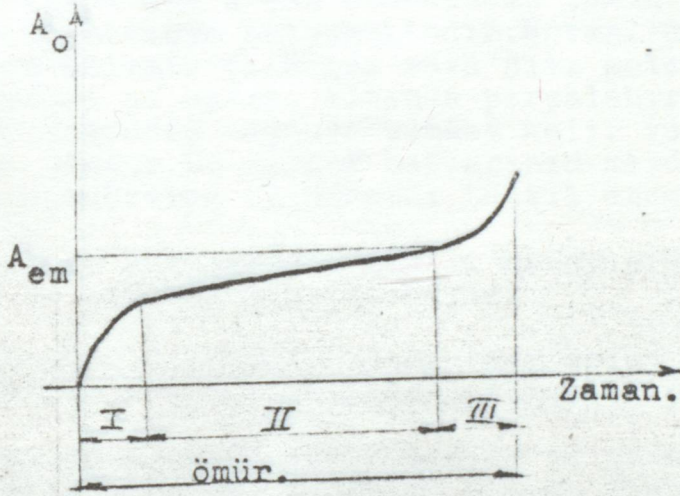
Şekil(13).Elastohidrodinamik teoride Hertz yüzey basınçları. (Ref.1)

1.2.AŞINMA.

1.2.1 Genel ifadeler.

Aşınma ,birbiriyle sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin mekanik etkilerle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır.Bu şekilde yüzeyler ilk şekillerini kaybederler. Parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyonlarını yerine getiremezler.Pratikte aşınma olayları zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Zamanla meydana gelen aşınma şeklinde,aşınma-zaman bağıntısı şekil(14) de verilmiştir.Görüldüğü gibi olay üç safhadan ibarettir.



Şekil(14).Aşınma zaman bağıntısı (Ref2)

Birinci safhada (I) yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir.Rodaj denilen bu safha parçaların birbirine alışma safhasıdır.Bu alışma olayının kısa sürede tamamlanması için bu safhaya ait özel yağlar kullanılmalıdır.

İkinci safhada (II) temas bölgelerinde esas çalışma sırasındaki aşınma kendini gösterir.Aşınma hızı oldukça artan üçüncü safhaya şiddetli aşınma bölgesi denir.

Elemana ait çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı (A_{em}) tayin edilirse,aşınma zaman diyagramından elemanın normal çalışma zamanı tespit edilebilir.

Aniden meydana gelen aşınmada, parçaların yüzeyleri birdenbire bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışmaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olmasından meydana gelen bu aşınma şekli, mukavemet alanında statik zorlamanın etkisi altındaki kopmanın benzeridir.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil, birçok aşınma halleri vardır.

1.2.2. Adhezyon aşınması.

Daha önce belirtildiği gibi yüzeyler arasındaki gerçek temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları büyük bir basınç altında bulunmaktadır. Normal olarak yüzeylerde absorbe edilmiş olan gaz veya sıvı molekülleri ile oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır, malzemelerin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel kaynak bağları oluşur. Bu kaynak bağlarının meydana getirdiği malzeme kaybı, adhezyon aşınmasını teşkil etmektedir.

Adhezyon aşınmasıyla ilgili deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Adhezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
- Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir.
- Adhezyon aşınması, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir. Kaynak noktalarının aşınmaya katılan kısmı k_a ile gösterilirse, aşınan malzeme hacmi:

$$V_a = k_a \cdot A_h \cdot L.$$

olarak ifade edilir. Bu bağıntı şöyle de yazılabilir.

$$V_a = k_a \cdot \frac{F_n}{HB} \cdot L.$$

veya,

$$V_{aL} = \frac{V_a}{L} = k_a.$$

şeklinde yazılabilir. Burada F normal kuvvet, HB yumuşak malzemenin sertliği veya akmaⁿ sınırı ve L kayma yoludur.

-Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hızlarda ve yüklemelerde cereyan eder. Çalışma ortamında bulunan gazların etkisi de önemlidir. Örneğin, azot atmosferinde aşınmanın hava içinekinden daha az olduğu, karbondioksit atmosferinde ise, çok daha az olduğu deneylerle gösterilmiştir.

-Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhezyon aşınmasını önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katı (aditifli) bir yağ konursa, aşınma önlenir.

-Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme, sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.

-Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrazyon aşınmasını meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde adhezyon aşınması oluşmaz. Bu nedenle adhezyon aşınması, yüzeyler arasında abrazif bir etkinin bulunmaması halinde oluşan bir aşınma türü olarak ifade edilmektedir.

Ani aşınma olayı, özellikle adhezyon aşınmasının türüne bağlıdır. Yenme denilen bu aşınma türünde, yağlama yetersizliğine bağlı olarak yüzeyler arasında aniden kuvvetli bir kaynama meydana gelir. Bazı hallerde yüzeyler birbirine kilitlenir. Hareket olanağı sağlansa bile yüzeyler bozulmuş olur. Yenmede görülen şiddetli kaynama, o noktanın sıcaklığının artmasından ileri gelir. Sıcaklık arttıkça, yapışmış tabakanın düzeni bozulmaya başlar ve belirli bir sıcaklıkta kopar. Bu sıcaklığa tabakanın kopma sıcaklığı da denilebilir.

Adhezyon aşınmasını önlemek için alınması gereken önlemler şöyle özetlenebilir.

-Eş çalışacak malzeme çiftleri uygun seçilmelidir.

-İyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katıklar kullanılmalıdır.

1.2.3. Abrazyon aşınması.

Çok önemli olan abrazyon aşınmasında yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert

parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıkların bir zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğilemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine neden olurlar.

Abrasyon aşınmasında önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Burada dikkat edilecek husus, ısıtma işlemi uygulanan yüzeylerin alabileceği maksimum sertliktir.

Abrasyon aşınmasını önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir:

-Yüzeyler sertleştirilmelidir.

-Dışardan sert maddelerin yüzeyler arasına girmesi önlenmelidir.

1.2.4. Yorulma aşınması.

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulman, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makina elemanlarında yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucunda meydana gelir. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde hertz yüzey basınçları meydana gelir, yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma nedeniyle malzemede bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte iken yüzeyler arasındaki yağın etkisiyle, yüksek basınç altındaki yağ çatlaklara girmektedir. Diğer bir açıklama tarzında ise, çukurcukların plastik deformasyonları nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına doğru yayıldığı ileri sürülmektedir.

İki türlü pitting vardır. İlkel pittingde çukurcuklar çok küçük olup büyümeyizler ve yüzeye yayılmazlar. Tahripkar pitting de ise, çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar. Birinci tipteki pitting, elemanın normal çalışmasını genellikle engellemez. Tahripkar pitting, elemanı işe yaramaz hale getirir.

Deney ve tecrübe göstermiştir ki, pitting oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynar. Doğal sertlikteki

malzemelerde ,örneğin çeliklerde,pitting meydana gelmektedir.Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Abrasyon veya adhezyon aşınması meydana gelen yüzeylerde, pitting oluşumuna neden olan koşulların bulunduğu durumda bu tür aşınma olmaz.

Yorulma aşınmasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir.

1.2.5.Oksidasyon aşınması.

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler.Bununla beraber,özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makina elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar.Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir.Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler.Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu tekrar bir sert tabaka oluşur,yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder.Henüz kesin olarak bilinmemekle beraber,hava rutubetinin de bu olay üzerinde etkisi önemlidir.

Oksidasyon aşınmasını önlemek için yüzeyler fosfat veya sülfite ile işlem görür veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler(molibden disülfite) kullanılır.

2.YAĞLAYICI MADDELER

2.1.GENEL İFADELER

Sürtünme hallerini incelerken birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasına gaz, sıvı veya katı haldeki maddelerin girmesiyle sürtünme durumunun değiştiğini incelemiştik. Araya giren maddelerin özellikleri uygun olarak seçilirse sürtünme direncini azaltmak ve bununla ilgili diğer olayları daha uygun bir hale sokmak mümkündür. Yağlayıcı maddelerden genel olarak şu özellikler istenir.¹⁶

- Yağlayıcı yüzeylere mümkün olduğu kadar iyi bağlanmalıdır.
- Kendi molekülleri ve kristalleri arasında küçük bir sürtünme direnci göstermelidir.
- Yağlayıcı yüzeyleri kimyasal olarak etkileyip bozmamalıdır.
- Sıcaklık ve atmosfer etkilerine karşı yeterli dayanıklılık göstermelidir.

Yağlayıcı maddeler

- Sürtünmeyi azaltmak.
- Aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek,
- Sıcaklığın yükselişini önlemek,

için kullanılmaktadır. Sürtünme bakımından, çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı maddenin fonksiyonu farklıdır. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından burada önemli olan husus yağın viskozitesidir. Bu nedenle sıvı sürtünmesi halinde genellikle sıvı ve bazı hallerde gaz yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Sınır sürtünmesi halinde yağlayıcı maddenin ıslatma kabiliyeti ve buna bağlı olarak kimyasal bileşimi önemlidir. Bu nedenle sınır sürtünmesi halinde katı ve katıkları sıvı yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır.

Adhezyon, abrazyon ve korozyon aşınmalarının önlenmesinde yağlayıcı maddeler önemli rol oynamaktadır.

Sıcaklığın emniyet sınırları içinde kalması, bir yandan yağın sürtünmeyi azaltması, diğer yanda da yüzeyler arasında oluşan ısının yağ ile dışarıya taşınması sonucunda mümkün olmaktadır.

Yağlayıcı maddeler fiziksel hallere göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılabilir.

2.2. Katı Yağlayıcı Maddeler.

Daha önce belirtildiği gibi, sınır sürtünmesi halinde sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek için madensel yüzeylere kuvvetli olarak yapışan bir tabaka oluşturmak gerekir. Bunu en iyi şekilde katı yağlayıcı maddeler yapabilmektedir. Sınır sürtünmesinin karakteri göz önüne alınırsa, katı yağlayıcı maddelerin şu özelliklere sahip olması gerekir.¹⁶

- Madensel yüzeylere karşı büyük bir yapışma eğilimi göstermesi,
- Düşük bir kayma mukavemetine (sürtünmeyi azaltmak için) sahip olması,
- Sertliğin az olması,
- Madensel yüzeylerin doğrudan doğruya temasını ortadan kaldıran sürekli bir yağ tabakasını oluşturması,
- Yağ tabakasının kopması halinde, bu yağ tabakasının kendi kendine aniden oluşması,
- Sıcaklık ve çevre etkilerine karşı yeterli dayanıklılığı göstermesi,
- Temiz olması ve içinde katı parçacıkların bulunmaması.

Katı yağlayıcılar yalnız başlarına veya sıvı yağlar veya greslerin içine karıştırılarak kullanılır. Bu son durumda katı yağlayıcılar katık rolünü oynamaktadır. Pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit ve molibden disülfittir. Bunların yanısıra mika, talk, asbest ve plastikler kullanılmaktadır.

Toz veya ince ve düzgün levhacıklar şeklinde kullanılan grafit, yüksek sıcaklıklarda (500 °C'nin üstünde) yalnız başına yağlama fonksiyonunu görmektedir. Diğer hallerde sıvı yağ veya gres grafitin karıştırılmasıyla kolloidal bir süspansiyon oluşturulmakta ve böylece yağlama sağlanmaktadır. Grafitin başlıca yağlama özelliği, madensel yüzeylerin üzerinde kayma gerilmesi küçük ve kopmaya karşı dayanıklı olan bir tabaka oluşturulmasıdır. Bu özellikler hava veya suyun bulunduğu ortamda ortaya çıkar. Hava veya suyun bulunmaması halinde, örneğin vakumda grafit, yağlama özelliği bir yana, çok kuvvetli bir aşındırma elemanıdır.

Molibden disülfid, madensel yüzeylerin üzerinde grafit benzer olarak bir tabaka oluşur. Bu tabakanın oluşması hava veya suya bağlı değildir. Bu nedenle vakumda ve oda sıcaklığında molibden disülfid çok iyi bir yağlama özelliğine sahiptir.

Grafit ve molibden disülfitin ısı stabiliteleri çok iyidir. Grafit havada 350 Ca, vakumda 1000 Ca kadar stabildir. Molibden disülfid, havada 350 Ca kadar stabil olmasına rağmen, vakumda 600 Cda stabibitesini kaybeder. Grafitin özgül ağırlığı daha küçük olduğundan sıvı ile grafitin karıştırılmasıyla elde edilen karışım, molibden disülfitinkinden daha stabildir.

2.3. Sıvı Yağlayıcı Maddeler

Sürtünme halinde bulunan yüzeyler arasına sıvı yağlar kolayca girip çıktığından ve bunun sonucu olarak ısı dışarıya taşınmış olduğundan sanayide daha çok kullanılır. Sıvı yağlayıcı maddeleri organik (hayvansal ve bitkisel), madensel (mineral) ve sentetik yağlar olmak üzere üç gruba ayırmak kabildir. "

a. Hayvansal ve bitkisel yağlar iyi yağlama özelliklerine sahiptirler; ancak ömürleri çok kısadır. Bundan başka gıda maddeleri olarak kullanıldıklarından ve fiyatları da çok yüksek olduğundan sanayide çok az kullanılırlar. Ayrıca kimyasal bakımdan metallere karşı madensel yağlar kadar etkisiz değildirler. Hayvansal esaslı kemik ve mafsalsal yağları cihazlarda kullanılmaktadır.

b. Ençok kullanılmakta olan sıvı yağlayıcılar madensel (mineral) yağlardır. Bu yağların geniş bir uygulama alanı bulmalarına neden olan hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İzafi harekette bulunan yüzeyler arasına kolayca yayılabilirler.
- Akış olması koşuluyla yüzeyler arasında oluşan ısıyı dışarı taşırlar.
- Çeşitli metaller ve lastik gibi malzemelere karşı kimyasal bakımdan etkisizdirler. Örneğin, metalleri oksitlemezler, aksine oksitlenmeye karşı koruyucu olarak etkiler.
- Bir yerden diğer bir yere (bazı tertibatlarla) kolayca iletilebilirler.
- Büyük ölçüde üretilebilirler (bu husus, dünyadaki petrol rezerveleri gözönünde tutulursa, sınırlı bir süre için geçerlidir).
- Diğer yağlayıcı maddelere göre nispeten ucuzdurlar.

Ham petrolden elde edilen madensel yağlar esas olarak bir hidrokarbonatlar bileşimidir. Her hidrokarbon molekülünde 20 ila 70 veya daha fazla karbon atomu bulunur.

Ham petrol doğada üç grup halinde bulunur. Birinci grup parafin esasından olup içinde yağlayıcı niteliği olmayan vaks vardır. İkinci grup naften esasından olup en son buharlaşan kısımlarda asfalt bulunur. Üçüncü grup karışık ham petrol esasından olup içinde vaks ve asfalt vardır. Böylece madensel yağlar da ham petrolün esasına göre parafin, naften ve karışık ham petrol esaslı yağlar olmak üzere üç gruba ayrılır.

Naften esasından gelen ham petrolün vakum damıtılmasından kalan bitümdür. Bu maddenin yağlayıcı niteliği olmamasına rağmen viskoziteyi arttırmak için yüksek sıcaklıklarda çalışan yağ ve greslere katılır.

Damıtma yoluyla elde edilen yağların yağlama özellikleri düşüktür. Bu sebepten basit ve önemsiz yağlama işlerinde kullanılmaktadır. Yağlara daha yüksek özellikler kazandırmak için vakum damıtmasından önceki ve sonraki damıtma ürünleri ile bakiyeler tasfiye (rafine) edilir.

c. Sentetik yağlar genellikle ham petrolden elde edilmeyen, fakat ham petrol esaslı yağların yağlayıcı özelliklerine sahip olan yağlardır. Bu tür yağlar başlangıçta hayvansal, bitkisel ve özellikle madensel yağların içine sentetik ilâveler yapılarak elde edilmiştir. Teknolojinin gelişmesi, bu tür yağların tamamen sentetik yağlar olarak elde edilmesine olanak vermiştir. Bu yağların sınıflandırılması genellikle bu tür yağların imalinde kullanılan kimyasal maddelere göre yapılır. Örneğin dibazik asit esteri, fosfat esteri, silikon, silikat esteri, poliglikol ester karışımı yağlar gibi. Bazı teknolojik nedenlerle henüz nispeten az miktarda imal edilen bu yağlar, petrol bunalımı da göz önünde tutulursa, gelecekte yağlama alanında önemli rol oynayacaklardır.

2.4. Yarı Katı Yağlayıcı Maddeler (Gresler)

Gresler, içinde katılaştırıcı madde bulunan sıvı yağlardan oluşmuş olup yarı katı (plastik) haldeki yağlayıcı maddelerdir. Bazı istisnaî özelliklerin elde edilmesi için katılaştırıcı maddelerin yanısıra, bazı ek malzemeler bulunabilir. Katılaştırıcı madde olarak genellikle alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum gibi madensel sabunlar ve bunların yanısıra bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddelerde kullanılabilir. Gres, katılaştırıcı maddeye, sıvı bileşene veya kullanılma alanına göre isimlendirilir. Bunlara göre isimlendirilen bu yağlayıcı maddelerin bazı özellikleri Cetvel (1) de verilmiştir. Gresler genellikle açıkta çalışan ve uzun yağlama süreleri olan orta hız ve yüklü sistemlerde kullanılırlar.

Cineli	Yüzdesi	etme 191	SUS	noktası	miktarı
			"P (°C) de	"P (°C)	%
Alüminyum sabunu.....	6 - 9	330 - 360	210 (98.9) 100	200 (93.3)	1z
	10 - 12	265 - 295	100 (37.8) 275	195 (90.6)	1z
Baryum sabunu.....	13 - 20	265 - 295	100 (37.8) 400	375 (190.6)	0.1
Kalsiyum sabunu.....	7 - 9	355 - 385	100 (37.8) 300	175 (79.4)	0.8
	10 - 12	310 - 340	100 (37.8) 300	180 (82.2)	1.0
	12 - 14	265 - 295	100 (37.8) 300	190 (87.8)	1.2
	14 - 16	220 - 250	100 (37.8) 300	195 (90.6)	1.5
	17 - 20	175 - 205	100 (37.8) 300	200 (93.3)	1.8
	21 - 25	130 - 160	100 (37.8) 300	205 (96.1)	2.3
	4 - 6	Yarı.sıvı	210 (98.9) 65	185 (85.0)	0.1
	6 - 7	370 - 390	210 (98.9) 80	190 (87.8)	0.3
	8 - 9	340 - 370	210 (98.9) 110	200 (93.3)	0.3
	9 - 11	265 - 295	100 (37.8) 500	280 (137.6)	1z
Lityum sabunu.....	5 - 7	355 - 385	100 (37.8) 300	340 (171.1)	1z
	7 - 9	310 - 340	100 (37.8) 700	360 (182.2)	1z
	9 - 11	265 - 295	100 (37.8) 700	360 (182.2)	1z
Sodyum sabunu.....	9 - 11	310 - 340	100 (37.8) 300	320 (160.0)	0.3
	11 - 13	265 - 295	100 (37.8) 300	330 (165.6)	0.4
	14 - 18	220 - 250	100 (37.8) 300	340 (171.1)	0.5
Sodyum-kalsiyum sabunu...	4 - 6	355 - 385	210 (98.9) 150	320 (160.0)	0.3
	7 - 9	310 - 340	210 (98.9) 150	330 (165.6)	0.5
	14 - 16	220 - 250	210 (98.9) 80	335 (168.3)	0.1
Bentonit.....	8 - 10	310 - 340	100 (37.8) 400	-	0.2
Kolloidal SiO ₂	9 - 11	310 - 340	100 (37.8) 400	-	1z

Cetvel(1).Gres yağlarının özellikleri.(Ref 1)

Cetvel(3). Ref (2)

Kinematik(v),Engler(E),Redwood-Saniye(R) ve Saybolt-Saniye(SS) viskoziteleri arasındaki bağıntı

v	E	R	S	v	E	R	S
1.0	1.00	28.5	28.9	25	3.46	105	119
1.2	1.03	29.0	29.6	26	3.58	109	124
1.4	1.05	29.5	30.4	27	3.70	113	128
1.6	1.08	30.0	31.2	28	3.82	117	132
1.8	1.10	30.5	31.9	29	3.94	120	137
2.0	1.12	31.0	32.7	30	4.07	124	141
2.2	1.14	31.5	33.4	31	4.19	128	146
2.4	1.16	32.0	34.1	32	4.32	132	150
2.6	1.18	32.5	34.8	33	4.44	136	155
2.8	1.20	33.0	35.4	34	4.57	140	159
3.0	1.22	33.5	36.1	35	4.70	144	164
3.2	1.24	34.0	36.7	36	4.82	148	168
3.4	1.25	34.5	37.4	37	4.95	152	173
3.6	1.27	35.0	38.0	38	5.08	156	177
3.8	1.29	35.5	38.6	39	5.21	160	182
4.0	1.31	36.0	39.2	40	5.33	164	186
4.2	1.32	36.5	39.8	41	5.46	168	191
4.4	1.34	37.0	40.5	42	5.59	172	195
4.6	1.36	37.5	41.1	43	5.72	176	200
4.8	1.38	38.0	41.7	44	5.85	180	204
5.0	1.39	38.5	42.4	45	5.98	185	208
5.5	1.44	39.8	44.0	46	6.11	189	213
6.0	1.48	41.1	45.6	47	6.23	193	218
6.5	1.52	42.4	47.2	48	6.37	197	223
7.0	1.56	43.7	48.8	49	6.50	201	227
7.5	1.61	45.0	50.4	50	6.62	205	232
8.0	1.65	46.4	52.1	52	6.88	213	241
8.5	1.70	47.8	53.8	54	7.14	221	250
9.0	1.74	49.1	55.5	56	7.41	229	260
9.5	1.79	50.6	57.2	58	7.67	237	269
10	1.83	52.0	58.9	60	7.93	245	278
11	1.92	55.0	62.4	62	8.19	254	287
12	2.02	58.1	66.0	64	8.45	262	296
13	2.12	61.3	69.7	66	8.71	270	306
14	2.22	64.6	73.5	68	8.97	278	315
15	2.32	68.0	77.4	70	9.23	286	324
16	2.43	71.4	81.3	72	9.50	294	333
17	2.53	74.9	85.3	74	9.76	302	343
18	2.64	78.5	89.4	76	10.02	310	352
19	2.75	82.1	93.5	78	10.28	318	361
20	2.87	85.8	97.7	80	10.54	327	370
21	2.98	89.5	101.9	85	11.20	347	390
22	3.10	93.3	106.2	90	11.86	367	417
23	3.22	97.1	110.5	95	12.51	388	440
24	3.34	100.9	114.8	100	13.17	408	463

2.5. Gaz Yağlayıcı Maddeler

Yüksek hız ve küçük yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde, gaz niteliğini taşıyan yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Bunların viskoziteleri sıvılara göre çok küçük olduğundan kullanıldığı sistemlerde oluşan sürtünme ve bunun sonucunda sıcaklık çok az olur. Ancak bu sistemlerin yük taşıma yetenekleri çok azdır. İlk zamanlarda hava, hidrojen ve azot gaz yağlayıcıların ana malzemeleri olduğu halde günümüzde kükürt heksafloridler, sıvı nitrojenler, buhar ve organik buhar kullanılmaktadır. Böylece ultrasantrifüjlerde, yüksek hızlı taslama tezgâhlarının ana millerinde, jiroskoplarda, elektrik motorlarında uygulanan bu yağlama usulü, gaz türbinleri, jet motorları, roketler, nükleer reaktörler gibi sistemlerde kullanılmayabasmıştır.

2.6. Yağlayıcı Maddelerin Özellikleri

2.6.1. Genel İfadeler

Yağlayıcı maddelerin özelliklerini, yağlama kabiliyetine ve fiziksel davranışlarına bağlı olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Yağlayıcı maddelerin yağlama özelliğini tayin eden viskozite ve ıslatma kabiliyetidir. Bazı çalışma ortamlarında göz önüne alınan fiziksel davranışlarına bağlı olan özellikler, katılaşma noktası, ısı özellikleri, oksidasyon, alevlenme noktası, damlama noktasıdır.

2.6.2. Viskozite

Genel olarak viskozite, herhangi bir akışkanın harekete karşı gösterdiği direnç veya başka bir deyimle, akma sırasında sıvı tabakalar arasındaki iç sürtünmeyi ifade eden bir özelliktir. Newton kanununa göre hareket halindeki sıvı tabakalar arasında oluşan kayma gerilmeleri

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dn}$$

şeklinde gösterilebilir. Bunada η ; viskozite katsayısı veya basit olarak viskozite, dv/dn - hız gradyanı veya kayma oranıdır.

Denkleminde görüldüğü gibi, τ ile η arasında doğrusal bir bağıntı vardır. Bu kanuna uyan akışkanlara Newtoniyen Şekil (15.) akışkanlar denir. Bazı akışkanlarda τ , η ile orantılı değildir. Bu tür akışkanlara Newtoniyen olmayan akışkanlar adı verilir. Su, madensel yağlar gibi basit akışkanlar Newtoniyendir. Bunların kayma oranları nispeten azdır. Şekil (15) de görüldüğü gibi, Newtoniyen olmayan akışkanlarda τ ile η arasında çeşitli bağıntılar vardır. D şeklindeki bağıntıya uyan malzemeler, kayma gerilmeleri belirli bir τ_0 değerini aştığı taktirde kaymaya başlar. Gresler böyle bir davranış gösterirler. Teorik bakımdan hesapları basitleştirmek amacıyla bu tür malzeme-

ler için τ ile Γ arasındaki bağıntı.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{dv}{dn} \cdot (\tau > \tau_0).$$

şeklinde ifade edilir Şekil (45) deki D hali). Burada η_0 ; plastik viskozitedir. Bu tür akışkanlara Bingham akışkanları denir.

Viskozitenin boyutları üç şekilde ifade edilir.

a. $\tau = \eta \cdot dv/dy$ bağıntısına göre ifade edilen viskoziteye, dinamik viskozite denir. Dinamik viskozite, Poise(P) veya bunun yüzde biri olan Centipoise ($1cP = 0,01P$) ile ölçülür. Şöyle ki;

$$1P = 0,1 \frac{Ns}{m^2} = 0,0102 \frac{Kp.s}{m^2} = 0,1 \frac{Kg}{m.s} = 1 \frac{dyn.s}{cm^2} = 14,5 \mu reyn.$$

dır. Poise, Fransız ilim adamı Poisseuille'un ismine hürmeten verilmiştir. İngiliz-Amerikan sisteminde dinamik viskozitenin boyutu lb/in dir.

$$1 lb.s/in^2 = 1 reyn = 10^6 \cdot \mu reyn,$$

olarak isimlendirilir. Reyn, İngiliz fizikçisi Reynolds'un ismine hürmeten verilmiştir. Cetvel (2) dinamik viskozite birimleri arasındaki bağıntıları göstermektedir.

b. Diğer bir viskozite tarifide kinematik viskozite şeklinde olup

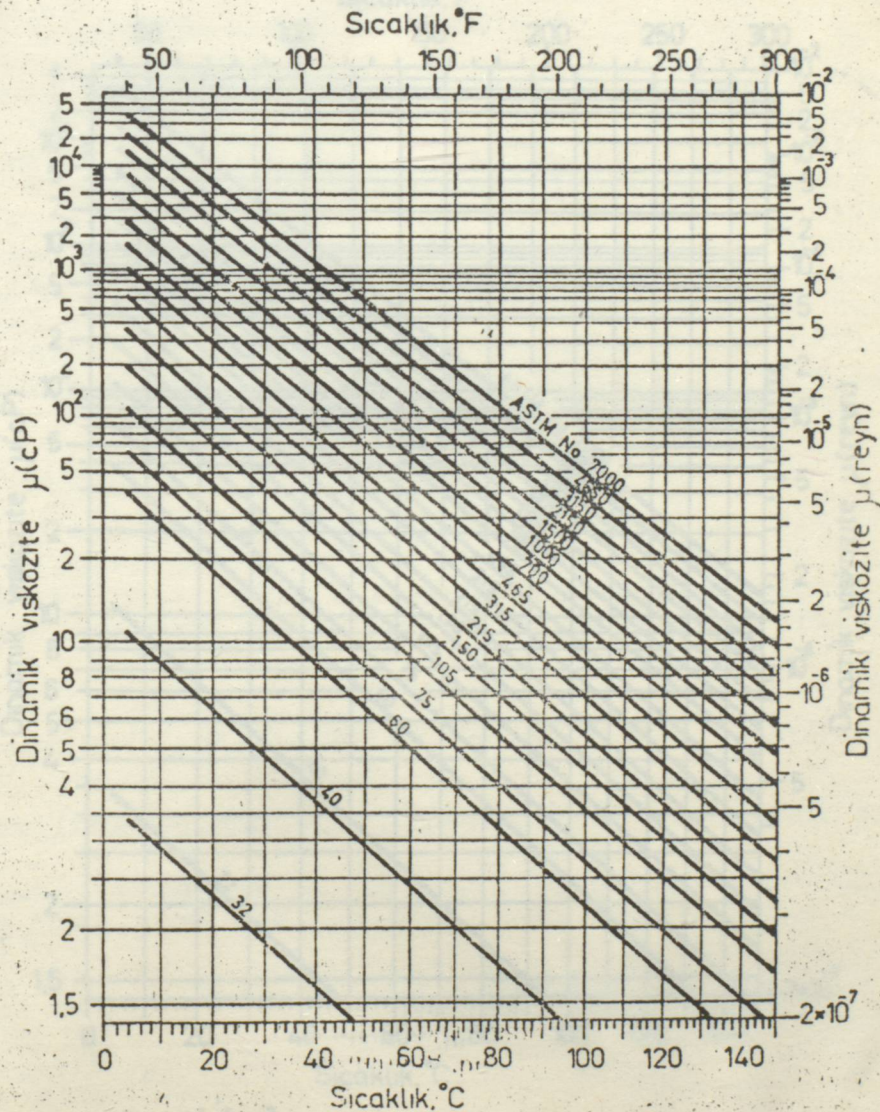
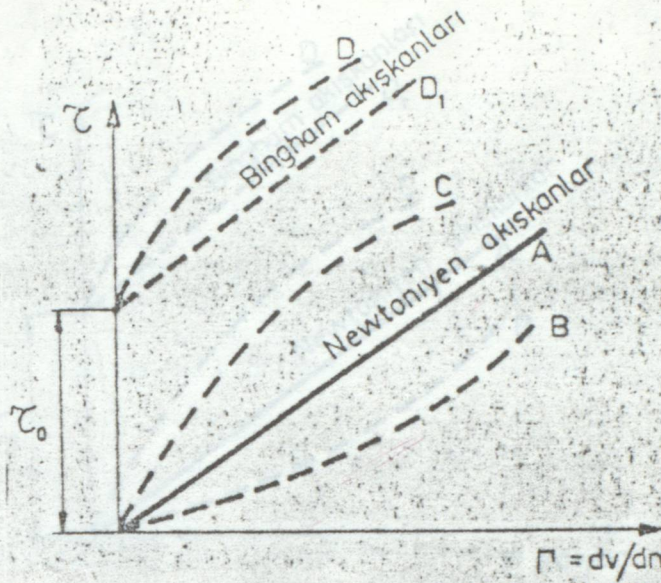
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta \cdot g}{\gamma}.$$

olarak ifade edilir. Burada η ; dinamik viskozite, ρ ; kütle yoğunluğu, g - yerçekimi ivmesi ve γ ; özgül ağırlıktır. Kütle yoğunluğu ile özgül ağırlık arasında ($\rho = \gamma/g$) bağıntısı vardır. Kinematik viskozitenin boyutu (cm^2/s) dir; şöyle ki,

$$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s. = 1/929 ft^2/s.$$

şeklinde ifade edilir.

c. Viskozite çeşitli ticari viskozimetrelerle de tayin edilir. Viskozimetreler kinematik viskoziteyi izafi bir



şekilde (örneğin, belirli hacimdeki sıvının kılcal bir delikten akma zamanı gibi) ifade ederler. Amerika'da Saybolt Universal saniyesi (SUS), İngiltere'de RedWood saniyesi, Fransa'da Barbey saniyesi ve Almanya'da Engler derecesi gibi izafi birimler kullanılır. Bu birimler arasında kesin bir bağıntı olmamakla beraber Cetvel (3) de çeşitli viskozite birimleri ile kinematik viskozite birimi arasındaki yaklaşık bağıntı verilmiştir. Engler derecesi ($^{\circ}E$) ile kinematik viskozite arasında

$$\nu = (7,32 E - \frac{6,31}{^{\circ}E}) \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

ampirik bağıntısı bulunmaktadır.

Viskozitenin önemli bir özelliği, sıcaklığın ve daha az olarak basıncın etkisi altında değişmesidir.

a. Viskozite-sıcaklık bağıntısı

Genellikle sıvılarda viskozite, sıcaklığın artmasıyla azalmakta, gazlarda ise hafif bir yükselme göstermektedir. Önemli olan husus sıvı yağların viskozitelerinin $30^{\circ}C$ ile $70^{\circ}C$ arasında büyük bir değişim göstermesidir ki, bu sıcaklık aralığı genellikle makinelerin sıcaklık bakımından normal çalışma bölgesi olmaktadır. Sıvı yağlarda, viskozitenin sıcaklıkla değişimini veren ve moleküller arasındaki kuvvetleri esas alan tam analitik bir bağıntı yoktur. Bu sebepten pratikte çeşitli ampirik bağıntıların mukayesesi yoluyla elde edilen ve Walther ismiyle tanınan

$$\log \log(\nu + a) = m \cdot \log T + b.$$

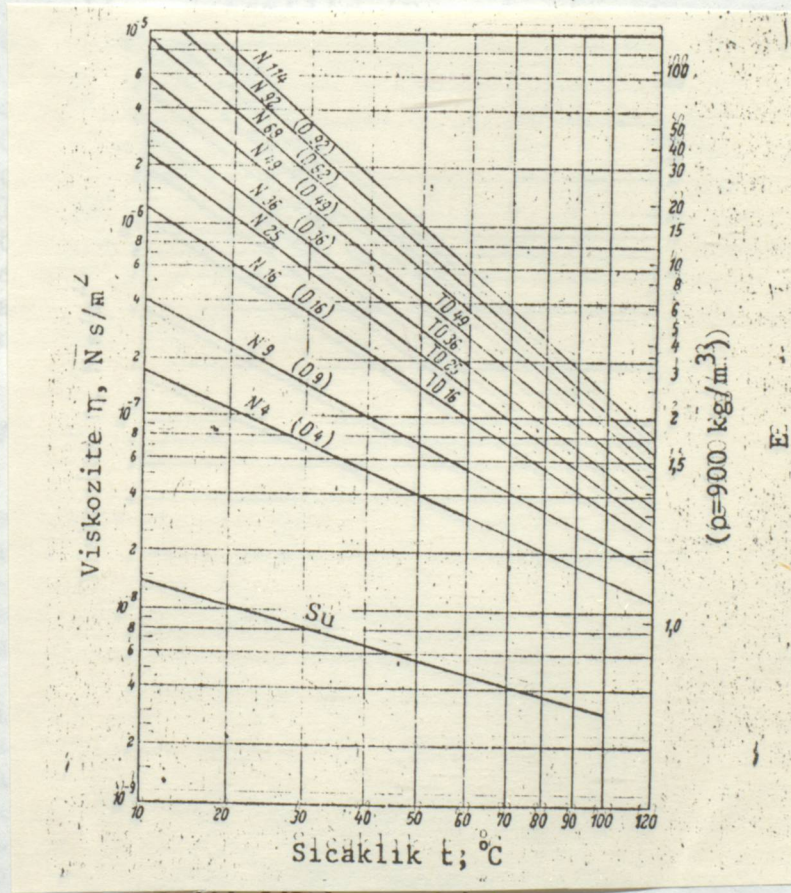
denklemini kullanılmaktadır. Burada T- Rankine derecesi cinsinden sıcaklık ve a,m,b-yağlayıcı maddeye bağlı sabit değerlerdir. ASTM nin öngördüğü gibi $a=0,6$ alınır ve Rankine derecesi Fahrenheit derecesine çevrilirse⁴, denklem

$$\log \log(\nu + 0,6) = m \cdot \log(T + 460) + b.$$

şeklinde yazılabilir. Bu denkleme dayanarak sıvı yağların viskozite-sıcaklık bağıntıları ASTMye göre Şekil (16)da ve DİNe göre Şekil (17.) de verilmiştir.

Verilen boyutlar	İstenilen boyutu elde edebilmek için çarpanlar					
	$N s/m^2$	$kgf s/m^2$	$poise = \frac{dyn s}{cm^2}$	centipoise	$reyn = \frac{lb s}{in^2}$	mikroreyn
$1 N s/m^2$	1	0,102	10	1000	0,000145	145
$1 kgf s/m^2$	9,81	1	98,1	$98,1 \cdot 10^2$	0,001422	1422
$1 poise = 1 dyn s/cm^2$	0,1	0,0102	1	10^2	$14,50 \cdot 10^{-6}$	14,50
1 centipoise	0,001	0,000102	10^{-2}	1	$0,1450 \cdot 10^{-6}$	0,145
$1 reyn = 1 lb s/in^2$	6895	703,01	$6,895 \cdot 10^4$	$6,895 \cdot 10^6$	1	10^6
1 mikroreyn	0,006895	$7,0301 \cdot 10^{-4}$	0,06895	6,895	10^{-6}	1

Tablo(2). Ref.3.



Şekil (17). Ref (3)

Viskozitenin sıcaklıkla, bilhassa makinaların normal çalışma bölgesinde, değişmesi sakıncalıdır. Örnek olarak, herhangi bir sistemin çalışmaya başladığı anda, özellikle alçak sıcaklıklarda, sıcaklık düşük olduğundan yağın viskozitesi yüksektir. Çalışma sırasında sistemin sıcaklığı yükselir ve bu yüzden yağın viskozitesi azalır; söyle ki, yağ seçiminde viskozite esas alındığından yağın hangi viskoziteye göre seçilmesi sorunu ortaya çıkar. Viskozite, normal çalışma sıcaklığına göre seçilirse, sistemin ilk hareketinde yağlama güçleşir; sistemin harekete geçmesi sırasındaki sıcaklığa göre seçilirse, çalışma halinde yağlama yetersiz olur. Bu yüzden pratikte önemli olan yalnız belirli bir sıcaklıktaki viskozite değeri değil, aynı zamanda viskozitenin sıcaklıkla ne şekilde değiştiğidir. Bu bakımdan viskozitenin sıcaklıkla mümkün olduğu kadar az değişmesi istenir.

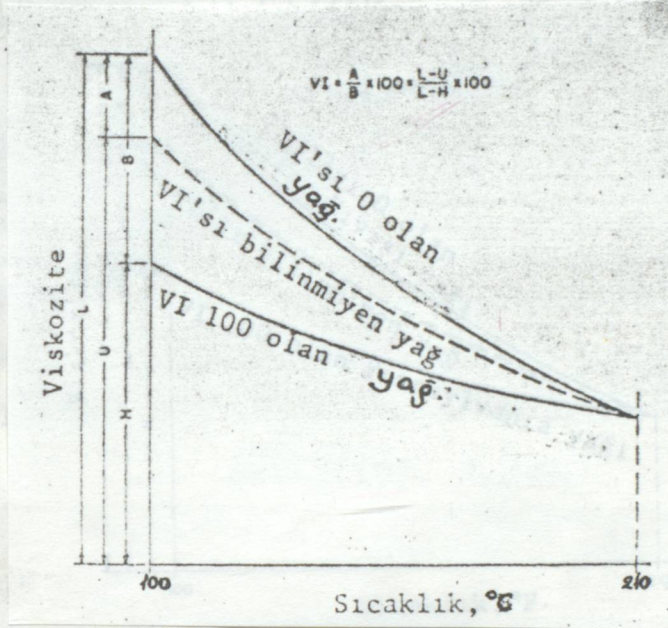
Viskozitenin sıcaklıkla değişimini gösteren birçok izafi yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan pratikte en çok kullanılan ve viskozite indeksi (VI) adıyla tanınan Dean ve Davis'in yöntemidir. (Dean-Davis viskozite indeksi)¹⁶. Bu yöntemde göre Pennsylvania eyaletindeki ham petrolden elde edilen ve sıcaklıkla viskozitesinde en az değişme gösteren parafinik distile yağın viskozite indeksine izafi olarak 100 (VI=100) denmiştir. Diğer taraftan körfez kıyısı (Gulf Coast), yani Texas'ın kıyı bölgelerindeki ham petrolden elde edilen ve sıcaklıkla viskozitesinde büyük değişme gösteren naftenik yağın viskozite indeksine de sıfır (VI=0) denmiştir. Buna göre 100°F (37,8°C) ve 210 F (98,9 C) standart sıcaklıklar arasında herhangi bir yağın viskozite indeksi Şekil (18.)

$$VI = \frac{A}{B} \cdot 100 = \frac{L - U}{L - H} 100.$$

şeklinde ifade edilir. Burada L-viskozite indeksi sıfır (VI=0) olan yağın 100°F (37,8°C) deki kinematik viskozitesi, H-viskozite indeksi 100 (VI=100) olan yağın 100°F (37,8°C) deki kinematik viskozitesi, U-viskozite indeksi bilinmeyen yağın 100°F (37,8°C) deki kinematik viskozitesidir.

Birçok mahzurlara rağmen Dean-Davis yöntemi iki üstünlüğe sahiptir. Birincisi, viskozite indeksinin basit olarak bir rakkamla gösterilmesi, ikincisi ise yağın kimyasal yapısı hakkında fikir vermesidir. Örneğin viskozite indeksi 100'e yakın olan yağlar (yüksek viskozite indeksli- YVI) daha çok parafinik, 0 civarında bulunan yağlar (alçak viskozite indeksli- AVI) naftenik yağlardır. Viskozite indeksleri 50 civarında olan yağların (orta viskozite indeksli- OVI) bünyesinde aromatik bileşimler üstün gelir. Bu yöntemin önemli mahzurlarına gelince, viskozitenin sıcaklıkla de-ği-

şimi farklı olan birçok yağların aynı viskozite indeksine sahip olması ve viskozite indeksleri 140ın üzerinde bulunan yağların viskozite indekslerinin anlamsız olmasıdır. Şekil(19) da çeşitli viskozite indeksleri için 100 F (37,8 C) ve 210 F(98,9 C) sıcaklıklardaki viskoziteler arasında bağıntılar verilmiştir.



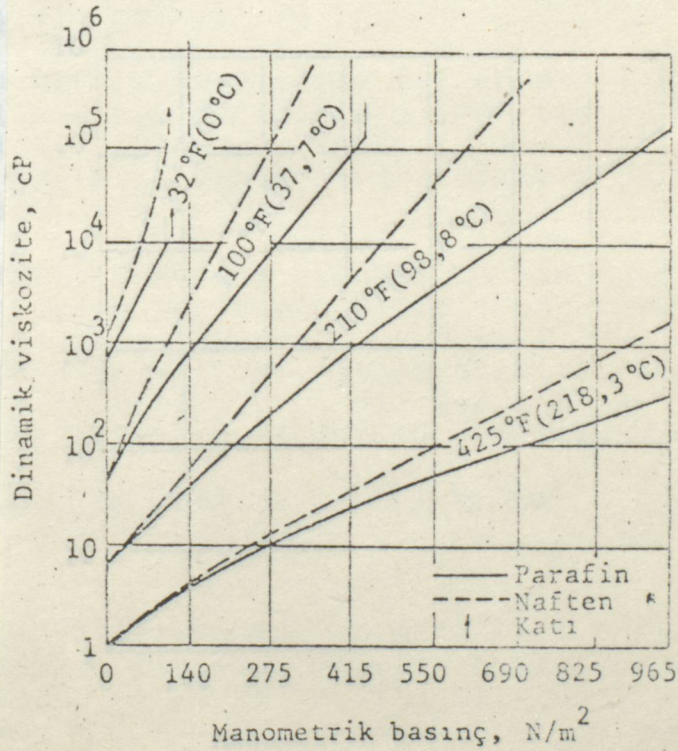
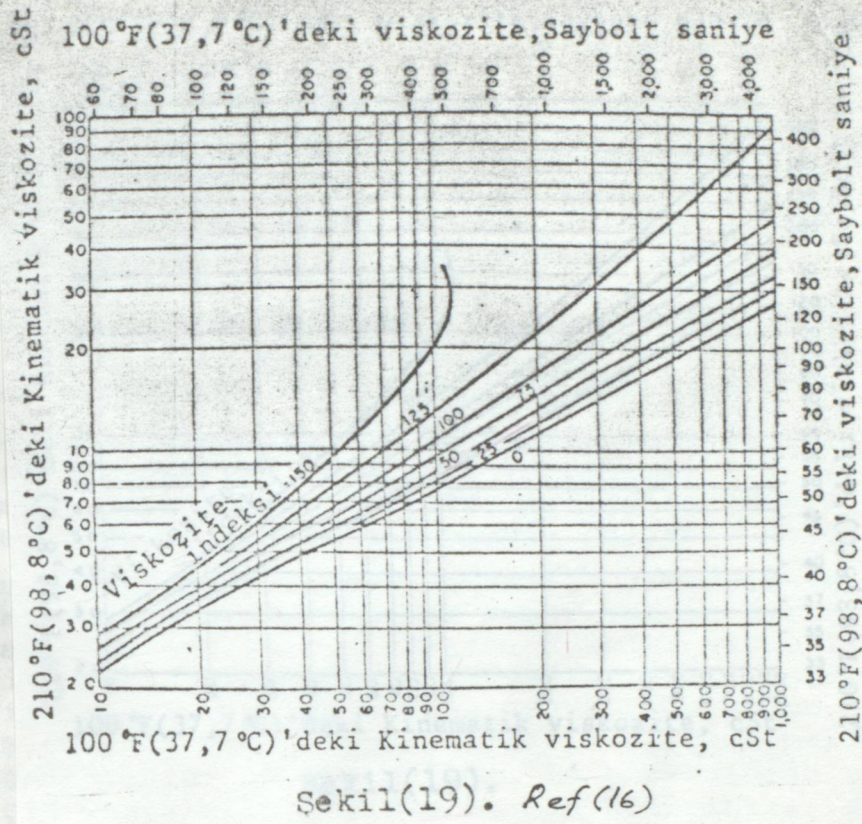
Şekil (18). Ref (2)

b. Viskozite-basınç bağıntısı

Genellikle sıvıların ve gazların viskoziteleri basınçla artmaktadır. Basıncın viskozite üzerindeki etkisi, yağlar için ancak çok yüksek basınçlarda (500daN/cm² üstünde) önemli olmaktadır. Şekil (20.). Bu sebepten kaymalı yataklar ve plastik şekillendirme proseslerinde basınçın 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. Genel olarak viskozitenin basınçla değişimi, ^{1,16}

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha p}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada η_0 -atmosfer basıncındaki yağın viskozitesi, p -basınç, α - yağa ait bir sabitedir.



2.43 Katılaşma Noktası

Yağların alçak sıcaklıklardaki davranışını gösteren katılaşma noktası yağın akışkanlığını kaybettiği en düşük sıcaklıktır. Bir deney kabında homogen olarak soğutulan yağın bünyesindeki iki olay meydana gelir.

— İçinde vaks bulunan parafinik yağlarda vaksın ayrışması kristaller şeklinde olur. Sıcaklık düştükçe bu kristaller birbirleri ile birleşerek yağın akmasına engel olurlar.

— Vaks bulunmayan naftenik ve sentetik yağlarda viskozite artar; yani yağ koyulaşır ve belirli bir sıcaklıkta akamayacak hale gelir. Bu olay, viskozite değeri yaklaşık olarak 100 000 centistoke olduğu hallerde meydana gelir.

Bu sebepten katılaşma noktası, parafinik yağlarda yağın akışkanlığını kaybedecek kadar vaksın ayrıştığını; diğer yağlarda ise yağın akamayacak kadar viskozitenin yükseldiğini gösterir. Naftenik yağların katılaşma noktası parafinik yağlarınkinden daha düşük olduğundan alçak sıcaklıkta çalışan makinalarda, örneğin soğutma makinelerinde naftenik yağlar tercih edilir. Bu makinalarda çalışma hali için kabul edilen viskozitenin üst sınırı, makinanın cinsine bağlı olarak 20 000 centistokes'a kadar erişebilir.

2.64 Isı Özellikleri

Makina sistemlerinde yağ bir soğutucu olarak görev yapması halinde ısı özellikleri önem taşır. Bunlar arasında özellikle yağın özgül ısısı c_o en önemli olanıdır. Genellikle yağların özgül ısısı, özgül ağırlık ve sıcaklığa bağlıdır.

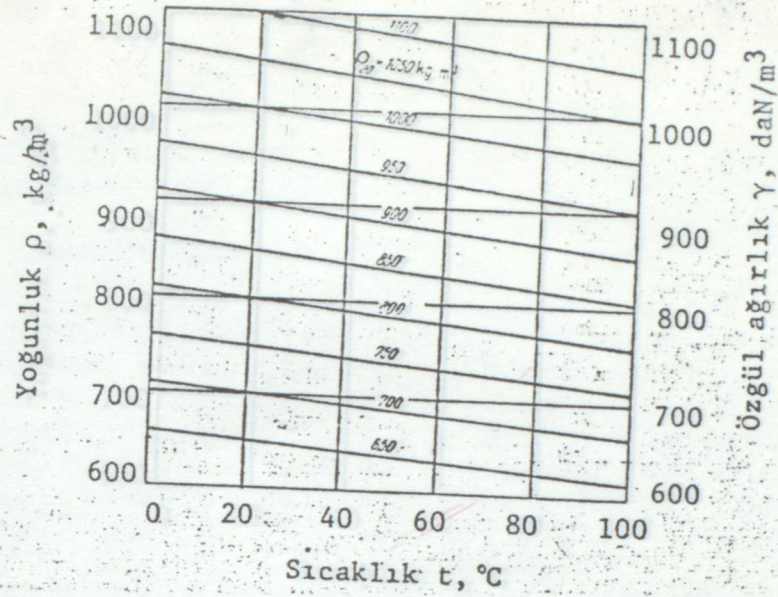
Genellikle yoğunluk sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bu sebepten yağın yoğunluğu belirli bir sıcaklığa göre verilir. Alman standartlarında bu sıcaklık 20 C (buna karşılık gelen yoğunluk ρ_{20} ile ifade edilir), Amerikan standartlarında ise 60 F (15,6 C) dir Şekil (24.). 20 C sıcaklıkta madensel yağların yoğunluğu ortalama olarak

$$\rho_{20} = (0,85 \dots 0,95) \text{ kg/dm}^3.$$

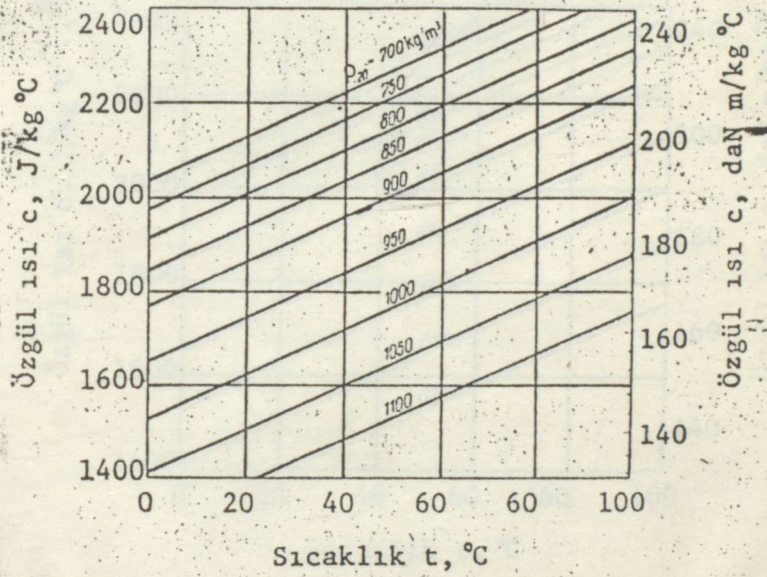
dir.

Çeşitli yağların, ρ_{20} ve sıcaklığa bağlı olarak c_o özgül ısıları Kraussold'a göre Şekil (22a.) ve $c_o \cdot \beta$ değerleri Şekil (22b) de verilmiştir. Görüldüğü gibi madensel yağlarda iyi bir ortalama olarak alınabilir.

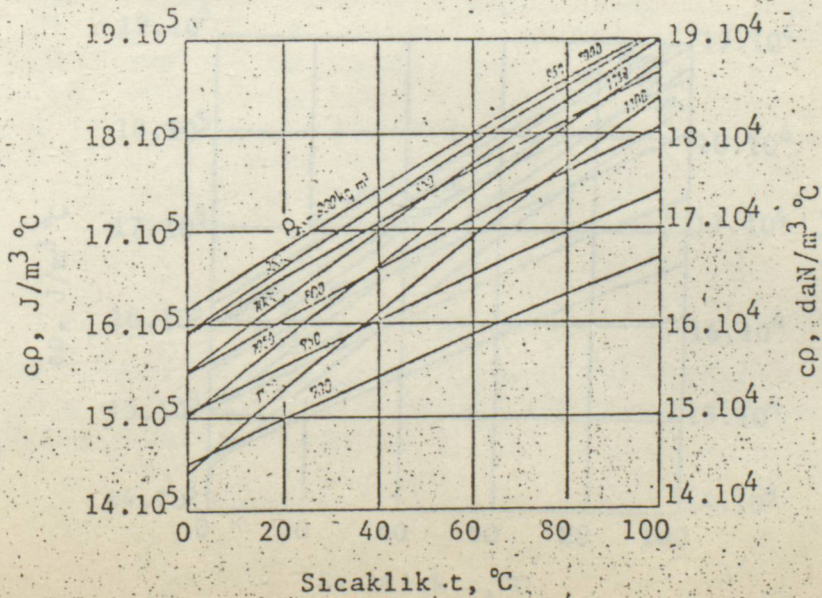
$$c_o \cdot \beta = 17 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} = 17 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}}.$$



Şekil(21). (Ref 3)



Şekil(22-a). (Ref 3)



265. Diğer Özellikler.

Oksidasyon

Oksijenle temas eden yağ, özellikle metal iyonlarının, yüksek sıcaklığın veya ışığın etkisi altında oksitlenir ve yağlama özelliklerini kaybeder. Oksidasyon olayı tam olarak bilinmemekle beraber, oksidasyonun sonunda yağdan ağır moleküller ayrılır ki, bunlar bir taraftan yağın viskozitesinin artmasına neden olurlar; diğer taraftan yağ içinde erimeyip dibe çamur gibi bir tortu olarak çökerler.

Yağın oksidasyona uğraması bir yandan temas ettiği malzemeler için bir tehlike yaratmakta, diğer yandan bizzat yağın bozulmasına neden olmaktadır. Oksidasyon yüzünde yağın rengi de değişmektedir. (genellikle siyahlaşır). Bu renk değişimi yağın değiştirilmesini gerektiren bir husus olarak kabul edilir.

Alevlenme Noktası

Standart bir kap içinde ısıtılan yağın üzerinde oluşan yağ buharı hava karışımının bir kızgın uçla teması halinde, parlamalar göstermeye başladığı sıcaklıktır. Esas itibarıyla alevlenme noktası, yağların buharlaşma yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bu sıcaklığın 30 C ile 60 C üstünde devamlı olarak yanmaya başlar ki, buna da yanma noktası denir.

Damlama Noktası

Daha çok gresler için önem taşır. Standart bir kap içinde homogen olarak ısıtılan gresin kap altındaki bir delikten damlamaya başladığı sıcaklıktır.

Emülsiyon Teşkili

Bu özellik emülsiyon halinde kullanılan yağlar için önemlidir. Bu özelliğin denemesi şöyle yapılır. 100cm su içine 50cm yağ konur ve beraberce kaynatılır. Sonra bunun içinden buhar geçirilir, tekrar kaynatılır. Soğumaya bırakılıp yağ ve suyun birbirlerinden ayrılan miktarları ve zaman ölçülür. Bazı hallerde yağdan istenen en önemli özellik olarak emülsiyon teşkili gösterilebilir. Örneğin tel çekme olaylarında kullanılan yağların en önemli özelliği budur.

Nötralizasyon Sayısı

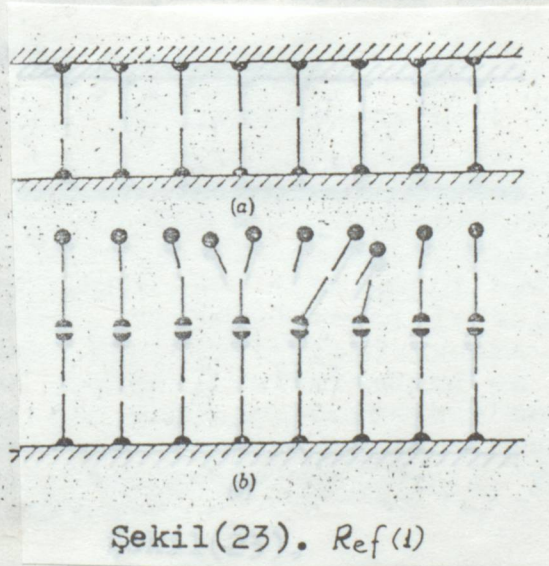
Yağın içinde zamanla ve çalışma sonu teşekkül eden ihtiyaralama mahsullerini ve buna bağlı olarak yağ değiştirme zamanını tespit eder.

Nötralizasyon sayısı, oda sıcaklığında 1 gram yağ içinde bulunan serbest asitleri nötrelize etmek için gerekli potasyumhidroksitin miligram olarak miktarıdır. Ayrıca bir de sabunlaşma sayısı tarif edilir. Bu halde 1gr yağ içinde bulunan serbest asitlerden başka, mevcut ester ve laktonları parçalamak için lüzumlu potasyum hidroksitin miktarıdır. Bu sayı daha ziyade içine organik yağlar ilave edilen madensel compound yağlar için önemlidir.

Islatma Kabiliyeti

Yağın kendine özgü bir özelliği olmamakla beraber, ıslatmakabiliyeti yağların madensel yüzeylere temas etmeleri halinde ortaya çıkar. Yağ moleküllerinin bu yüzeyler üzerinde düzgün bir şekilde yayılmaları ve yüzeylere yapışmaları madensel yüzey ve yağın karşılıklı etkilerine bağlı bir özelliktir Şekil (23 a.). Bu özellik yağın ve madensel yüzeyin cinsine bağlıdır. Sınır sürtünmesinde önemli rol oynayan ıslatma kabiliyeti esas itibarıyla adsorpsiyon olayına bağlıdır.

İyi bir adsorpsiyon tabakası meydana getirmek için, yağı oluşturan moleküllerin uzum zincirli yapılara ve polar gruplara Şekil (23.b.)



sahip olmaları gereklidir. Bu moleküllerin aktif uçları (polar grupları) madensel yüzeylere bağlanmakta ve bu

yüzeylerin üzerinde dayanıklı, bir çok molekül kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşturmaktadır. Bu tabakalar özellikle sınır sürtünmesinde madensel yüzeyleri harap olmaktan korur. Genellikle madensel yağlar polar gruplara sahip değildirler. Ancak oleik, stearik asidi gibi organik asitler bu yapıya sahiptirler. Yapılan deneylere göre, madensel yağların içine az miktarda (genellikle %1) ıslatmakabiliyeti iyi olan organik asitler ilâve edilirse, bu yağların ıslatma kabiliyetlerini iyileştirmek mümkündür. Olayla ilgili organik asitlerin olumlu davranışları, bunların madensel yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerek bir madeni sabun oluşturmalarına bağlanmaktadır. Sıcaklık, adsorpsiyon tabakaları üzerine önemli bir etki yapmaktadır. Kritik sıcaklık denilen belirli bir sıcaklığın üstünde, adsorpsiyon tabakasını oluşturan moleküllerin düzgün bir şekilde yayılmaları bozulur, tabaka parçalanır ve bu şekilde koruma özelliğini kaybeder.

Islatma kabiliyetini ifade etmek için kesin bir nicesel değer, sayı veya tarif mevcut değildir. Islatma kabiliyetini tespit etmek için kritik sıcaklık, sıvı ile madensel yüzey arasındaki yüzey gerilimi veya bunun birölçüsü olan kenar açısı, yüzey enerjisi gibi büyüklükler teklif edilmişse de, gerek bunların ifadelerindeki tutarsızlık ve gerekse deneysel yöntemlerdeki farklılık dolayısıyla bu büyüklükler yalnız nitesel olmaktan öteye gidememişlerdir.

2.7. Katıklar (Aditifler)

Katıklar, yağlarda aranan bazı özellikleri geliştirmek

veya yağlara yeni özellikler kazandırmak için içlerine az miktarda ilâve edilen kimyasal maddelerdir. Daha büyük güçlerin hacim ve ağırlık bakımından daha küçük makina ve mekanizmalarla iletilmesi eğiliminin gittikçe önem kazanması, çalışma sıcaklığı bölgelerinin artması, motor ve roket gibi sistemlerde yanma ile ilgili yeni olayların ortaya çıkması, yataklardaki ve dişli çarklardaki kayma hızlarının büyümesi sonucunda meydana gelen yeni yağlama problemlerini normal madensel yağlarla karşılamak mümkün olmadığından günümüzde katkılı yağlar geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Kullanılan katıklar ve istenilen amaçlar özet olarak Cetvel (4) de verilmiştir.

Kullanılan katıklar	Katığın amacı	Ref(16)
Oksidasyon önleyici	Yağın ve makinenin ömrünü uzatır, metalik yüzeylerde re- çine ve çamur tabakalarının teşkilini azaltır.	
Korozyon önleyici	Alaşımli yatakları ve metalik yüzeyleri kimyasal etki- lere karşı korur.	
Aşınmaya karşı düzeltici	Aralarında ince bir yağ filmi bulunan, sürtünme yüzeyleri- ni korur, sınır yağlaması	
Temizleyici(deterjan)	Yağlanan yüzeylerin temizliği	
Dağıtıcı(dispersan)	Erimeyen yanma ve oksidasyon malzemeleri süspansiyon haline getirir.	
Alkali ilaveler	Yağın oksidasyonundan doğan asitleri nötrale ederek bunların yağ veya motor ile reaksiyonunu önler.	
Pasa karşı koruyucu	Nem veya su etkisi olan yerlerde paslanmayı önler.	
Katılma noktası düşürücü	Alçak sıcaklıklarda kolaylıkla akar.	
Viskozite düzeltici(VI)	Viskozitenin sıcaklık ile değişimini azaltır.	
Islatma kabiliyetini arttırıcı	Sürtünme, sarma ve aşınmayı azaltır, kaypaklığı arttırır	
Yüksek basınç taşıyıcı(VB)	Filim mukavemetini ve yük taşıma kabiliyetini arttırır.	
Köpüklenme önleyici	Dayanıklı köpük teşkiline mani olur.	
Yapışkanlığı arttırıcı	Daha büyük kohezyon ve damlama özelliği için	
Sübyeleştirici	Yüzarasi gerilmeleri azaltarak yağın suya karışmasını sağlar.	
Organik yağlar	Nemlilik hallerinde daha büyük ıslatma özelliği için	
Katı yağlayıcılar	Yüksek sıcaklık veya basınçlara dayanır.	
Kalınlaştırıcı	Yağı katı veya yarı katı yağlayıcı haline çevirir.	
Suya karşı koruyucu	Gres veya diğer yağlayıcıların bileşenlerine suya dayanıklılık özelliği kazandırır.	
Metal deaktivatörleri(yatıştırıcıları)	Metallerin katalitik etkisini karşılar veya önler.	
Gümüş koruyucu	Gümüş yatakları için korozif değildir.	
Renk sabitleştirici	İstenilen rengi standartlaştırır ve istenmeyen rengin meydana gelmesini önler.	
Koku önleyici	Seğkin veya hoş koku sağlar veya istenmeyen kokuları önler.	
Bakteri öldürücü(antiseptik)	Bakterilerin çoğalmazından doğan kokuyu veya emülsiyonun çözülmelerini önler.	

Cetvel(4).Kullanılan katıklar ve amaçları.

2.3. YAĞLAMA ANALİZLERİNDE YAPARLANILAN TEMEL EŞİTLİKLER.

1. Visköz bir akışkanın hareketi.

2.3.-Yağların Seçimini Etkileyen Faktörler

Çeşitli şartlarda çalışan yağların yağlama özelliklerini etkileyen bir çok bilinen ve bilinmeyen faktörler vardır. Yağların seçiminde çalışma şartları ve kalite olmak üzere iki düşünce hakimdir.

Çalışma şartları adı altında dişli çarklar, yataklar ve kaymalı yüzeyler gibi kullanılma alanları ile hareketin cinsi, boşluklar, sıcaklık, hız ve yük gibi faktörler anlaşılmaktadır. Kalite özelliklerine gelince, bunlar da oksidasyona karşı dayanıklılık, aşınmadan koruma, yüksek basınç, temizleme yeteneği, korozyondan koruma ve köpüklenmeye karşı dayanıklılık gibi özelliklerdir.

Ancak bütün bu özellikler için kesin değerler bulunmadığından yağların seçimi genellikle viskoziteye göre yapılır.

Çalışma faktörlerine göre viskozitenin durumu şu şekilde özetlenebilir:

- | | |
|----------------|---|
| a. Hız | Viskozite hız ile ters orantılıdır. |
| b. Yük | Viskozite yük ile doğru orantılıdır. Sınır yağlaması hallerinde yüksek basınç (YB) katıkları gerekebilir. |
| c. Toleranslar | Viskozite genel olarak boşlukların ve toleransların büyüklüğü ile doğru orantılıdır. |
| d. Sıcaklık | Sıvı yağlayıcı maddelerin viskozitesi sıcaklık ile ters orantılıdır. |
| e. Basınç | Sıvı yağlayıcı maddelerin viskozitesi basınç ile doğru orantılıdır. |

ilave bir basitleştirme olarak, akışkan yoğunluğunun da düzgün olduğu kabulüyle, verilen bir deformasyon biriminden ileri gelen viskozite gerilmelerden dolayı, bir maddesel elemanın ivmesine yapılan katkı, yalnız viskozitesini değil aynı zamanda tanımlanan kinematik viskozitesini de etkiler. (v)

3 halde viskozite difüzyon katsayıları gibi (uzunluk) x (hız) boyutunda olup, 3 hız için difüzyon katsayısı verisi kullanılabilir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \dots + \nu \nabla^2 u$$

2.9-YAĞLAMA ANALİZLERİNDE YARARLANILAN TEMEL EŞİTLİKLER.

1.Viskoz bir akışkanın hareketi.

Akışkan bir sıvı tabakası içindeki moleküllerin, hareket miktarını iletme esaslarını açıklayabilmek için; yerel hız dağılımına bir kısıtlama koyarak, mesela belirli bir doğrultuda yalnız basit kayma hareketini gözönüne alarak araştırma yapabiliriz. Basit kayma hareketinde akışkan hızı, dik kartezyen koordinatlarda, koordinatları: x, y, z olan noktadaki bileşenleri: $U(y), 0, 0$ dır. (z, x) düzleminde bulunan bir yüzey elemanına tatbik edilmiş gerilmeyi öğrenmek istersek bu gerilmedeki teğetsel bileşen: birincisi akışkan hızının düzgün olmasının, ikincisi, ya elemanı geçen moleküllerin hareketinden veya eleman boyunca tatbik edilen moleküllerin karşılıklı etkisinin bir neticesi olarak, tamamiyle sıfırdan farklıdır. Moleküller arası etkiler yalnız küçük bir mesafeye kadar yazılır ve elemanı geçen hareket miktarının molekülseletimi, normal olarak du/dy yerel gradyanına bağıllık dolayısıyla, yalnız akışkanın hız dağılımına bağıllı olacaktır. (U hareketli eksenlerin kullanılmasından etkileneceğine göre U ya bağıllık imkansızdır.) Ayrıca beklenilirdi ki $|du/dy|$ nin yeter derecede küçük değerleri için yüzey elemanı boyunca gerilmenin teğetsel bileşeni, du/dy ile lineer olarak değişir. Bu kayma gerilmesi; ⁵

$$\tau_{xz} = \eta \frac{du}{dy}$$

şeklindedir. Burada η parametresi akışkanın viskozitesi olup, akışkanın yerel özelliklerine bağıllıdır. η pozitifdir ve akışkanın deformasyonuna karşı koyan iç sürtünmenin bir ölçüsüdür.

Viskoz bir akışkanın hareketi için, hareket denklemi, vektörel notasyonla şöyle verilebilir.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 U$$

ilave bir basitleştirme olarak, akışkan yoğunluğunun da düzgün olduğu kabulüyle, verilen bir deformasyon hızından ileri gelen viskoz gerilmelerden dolayı, bir maddesel elemanın ivmesine yapılan katkı, yalnız viskozitesini değil η/g oranıyla tanımlanan, kinematik viskozitesini de etkiler. (ν)

O halde ν : bütün difüzyon katsayıları gibi (uzunluk) $\times$ (hız) boyutunda olup, U hızı için difüzyon katsayısı terimi kullanılabilir.

$$\frac{du}{dt} = \dots + \nu \nabla^2 U$$

Plastik şekillendirme proseslerinin analizlerinde metallerin plastik akışı, akışkanın viskoz akışına benzetilerek sonuca gidilir. Viskoz bir akışkanın en önemli özelliklerinden biri olan gerilme deviatörü, gerinim hızı bağıntısı, metallerin plastiklik aralığı için akış karakteristiklerini belirleyen bir çok bağıntı arasında basitleştirilmiş en önemli ifadelerden biridir.

Konik matrislerden çekme işlemlerinde (tel çekme, ekstrüzyon, hidrostatik ekstrüzyon) ve haddedeleme malzeme akışı çeşitli sürtünme rejimi kabulleriyle çözümlenmektedir. Örnek olarak hidrodinamik yağlanmaya bir yaklaşım yapılabilmektedir. Burada yağlayıcının davranışını belirlemek için, sıkıştırılamayan, laminar, viskoz akış çözümlenmektedir.

Sıkıştırılamaz sıvının laminar akışı için yapılan kabulde, gerilme deviatörünün, gerinim hızıyla orantılı olduğu görülmektedir.

$$\sigma_{ij} = 2\eta \cdot \epsilon'_{ij}$$

Viskozite (η) de yağlayıcının skaler bir özelliği olduğuna göre gerinim hızı bileşenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir.

Çeşitli sıvıların viskoziteleri de değişik olmakta, arzu edilen viskozite, sıvı veya sıvı karışımlarının doğru seçimiyle sağlanabilmektedir.

2. Sukünetteki bir akışkanda, aniden harekete başlıyan düzlemsel sınır.

Farzedelim ki sukünetteki bir akışkanın yarı sonsuz bir bölgesi (mesela $y=0$ daki) rijit bir düzlemle sınırlanmış olup ona aniden kendi düzleminde bir U hızı verilmiş ve bundan sonra bu hızda tutulmuştur. Akışkan, levhadaki viskoz gerilmenin etkisiyle harekete getirilmiştir, hız dağılımı şöyledir.⁵

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

sınır şartları olarak;

$$y \geq 0 \text{ için } u(y, 0) = 0.$$

$$t > 0 \text{ için } u(0, t) = U.$$

dur. U parametresi u/U kullanarak problemten efektif olarak kaldırılabilir ve sonra boyut analizinden, u/U nun yalnız $Y/(\gamma t)^{1/2}$ nin bir fonksiyonu olması gerektiğini buluruz. Şimdi sınır şartları.

$y > 0$ için, $U(y, 0) = -U$.

$t > 0$ için, $U(0, t) = 0$.

olup, $y=0$ a göre antisimetriklikten $y=0$ daki hız daimi olarak sıfır olmak üzere $-U$ ve $+U$ hızlı iki akımın ortak sınırındaki basit bir süreksizlikten gelişen bir geçiş tabakasının yarısı için yazılmış sınır şartlarına eşdeğerdir. Levha üzerindeki akışkan tarafından tatbik edilen birim alan başına sürtünme kuvveti.

$$\eta \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} = - \pi^{-\frac{1}{2}} \cdot \rho \cdot U^2 \left(\frac{y}{U^2 \cdot t} \right)^{1/2}$$

olup, değişken hız bölgesinin kalınlaşmasının neticesiyle $t^{-1/2}$, parametresiyle azalır.

3-Aniden hareket eden bir sınır ile duran bir rijit sınır.

Şimdi farzedelimki akışkan $y=0$ la $y=d$ deki iki rijit sınırla sınırlandırılmış olup başlangıçta sükunettedir. ve akışkanın hareketi, önceki gibi, aniden kendi düzleminde daimi U hızına getirilmiş olan alt levhadan ileri gelmektedir. ve üst levha sabit tutulmaktadır. Hareketi yöneten denklem yine ⁵

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

olup sınır şartları;

$t > 0$ için, $U(0, t) = U$, $U(d, t) = 0$.

$0 < y \leq d$ için, $U(y, 0) = 0$.

dir. d boyutlu parametresi probleme girdiğine göre $y/(y \cdot t)^{1/2}$ artık mevcut parametrelerin yegâne boyutsuz kombinezonu değildir. Hareket denklemini çözümlemek için,

$$W(y, t) = U \left(1 - \frac{y}{d} \right) - U$$

değişken dönüştürmesi yapılır. Yeni değişken aynı diferansiyel denklemi sağlar ve $y=0$ ile $y=d$ de homojen sınır şartlarını gerçekler. Bu iki sınır şartlarını sağlayan W için özel bir çözüm, n bir tam sayı olmak üzere;

$$\exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{y \cdot t}{d^2} \right) \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{d}$$

Şimdi $t=0$ da, W üzerindeki şartı böyle çözümlerin bütün takımını kullanarak sağlamaya çalışacağız, yani,

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{d} = W(y, 0) = U \left(1 - \frac{y}{d} \right)$$

olacak şekilde An sabitlerinin değerini arıyoruz. Bu,

$$A_n = \frac{2}{d} \int_0^d U \left(1 - \frac{y}{d}\right) \sin \frac{\pi \cdot n \cdot y}{d} dy = \frac{2 \cdot U}{\pi \cdot n}$$

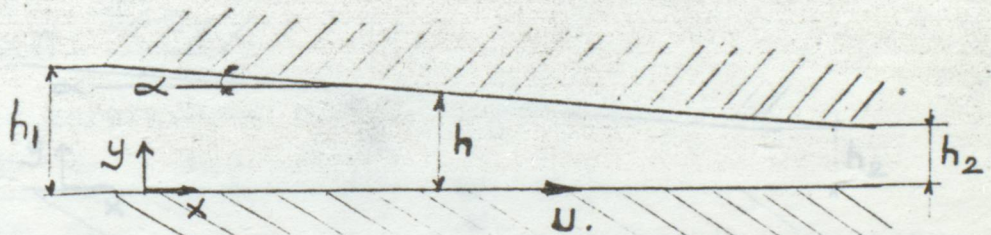
olmasını gerektirir. Şu halde hız dağılımı;

$$U(y, t) = U \left(1 - \frac{y}{d}\right) - \frac{2 \cdot U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \exp(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{y \cdot t}{d^2}) \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot y}{d}$$

ile verilir. Bu serinin terimlerinin sıfıra gitme çabukluğu n ile artar.

4-Reynolds yağlama teorisi

İki katı cisimden, aralarında ince bir akışkan tabakası olduğu zaman birinin diğeri üzerinde kayabildiği ve bazı şartlar altında akışkan tabakasında büyük bir basıncın meydana geldiği bilinen bir durumdur. Bu olayın esası şudur; iki katı sınır arasındaki akışkan tabakasının kalınlığının çok küçük olmasının sonucu olarak, akışkan tabakasındaki viskoziteden ileri gelen deformasyon hızı ve gerilme çok büyüktür, o zaman bu büyük gerilme, akışkan tabakasının şeklinin uygun bir seçimi ile, daha büyük bir basıncı geliştirmek için kullanılmaktadır. Bunun nasıl yapıldığını görmek için, hareket doğrultusunda sonlu uzunluğunda ve geniş kayıcı blokun yüzeyi üzerinde daimi olarak kayan düzlemsel bir yüzeyi olan katı bir cisme ait basit hali gözönüne alacağız. Olayı şekil (24) deki gibi tasarlıyabiliriz.^{5,6}



Şekil(24). Birbirine göre hareket eden düzlemsel iki yüzey arasındaki yağlama tabakası.
Ref(1).

Cismin x eksenine paralel sabit U hızıyla hareket ettiğini kabul ediyoruz. Cismin eğimini küçük kabul edersek, her noktadaki akımı yaklaşık olarak paralel iki düzlem arasındaki akım olarak düşünebiliriz. Akışkan tabakası kalınlığı (h), l'ye göre her yerde küçüktür. Bu sebepten dolayı, kalınlık ve basınç gradyanının belirli değerlere haiz olduğu tabakanın herhangi bir kesiti civarındaki hız dağılımının yaklaşık olarak her yerde aynı değerlere

sahip olduğu görülür. Burada yapılan ilk yaklaşım

$$\alpha \cdot \frac{\beta \cdot du}{\eta} \ll 1.$$

Bu özellik pratik yağlama şartlarında sağlanabilir. Yapılan kabullere göre $U_1=0, U_2=U$ olduğundan. Akışkan tabakasının kalınlığının h ve basınç gradyanının $-G$ olduğu herhangi bir yerin civarında bir kesitteki hız için.

$$u = U \cdot \frac{y}{h(x)} + \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y \cdot (y - h(x)).$$

$$u = \frac{G}{2\eta} \cdot y \cdot (h - y) + U \left(\frac{h-y}{h} \right).$$

yazabiliriz. Akışkan tabakasının birim genişliği başına hacim akısı,

$$Q = \int_0^h u \cdot dy = \frac{u}{2} h(x) - \frac{1}{12\eta} \frac{dp}{dx} h^3(x).$$

Kütlenin korunumu prensibini uygulayarak.

$$Q = \frac{G \cdot h^3}{12\eta} + \frac{1}{2} u \cdot h.$$

olup, Q' den bağımsız olmalıdır.

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta \cdot \left(\frac{u}{h^2} - \frac{2 \cdot Q}{h^3} \right) = 6\eta \cdot u \cdot \frac{h - h_0}{h^3}.$$

şeklinde yazabiliriz. Hareketli cismin eğimini çok küçük kabul ettiğimizden, cismin boyu l olduğundan.

$$h = h_1 - \alpha x,$$

$$\frac{dh}{dx} = \alpha \approx - \frac{h_1 - h_2}{l}.$$

Yan akım daralıyorsa $h_1 > h_2$ ve $\alpha < 0$ dır.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dx} \cdot \frac{dx}{dh} = \frac{6 \cdot \eta \cdot u (h - h_0)}{\alpha h^3}.$$

h_0 daha sonra belirlenecek bir parametredir. İntegrasyonla $h=h_1$ ve $h=h_2$ de $P=P_0$ sınır şartlarını kullanırsak, h_0 ve C integrasyon sabitleri belirlenir.

$$h_0 = 2 \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2}, \quad C = P_0 + \frac{6 \cdot \eta \cdot U}{\alpha (h_1 + h_2)}$$

$$P - P_0 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U}{\alpha} \cdot \frac{(h - h_1)(h - h_2)}{h^2 \cdot (h_1 + h_2)}.$$

Bu bağıntıya göre hacim akısı ve yağlama tabakasındaki basınç dağılımı, U kayma hızı ve kayma bloğunun eğimi bilindiği zaman hesaplanabilir. $p-p_0$ ifadesi yalnız $h_2 < h_1$ olduğu zaman pozitiftir. Şu halde tabaka, yalnız iki yüzeyin birbirine göre hareketinin, tabakanın geniş tarafından dar tarafına doğru (viskoz gerilmelerle) akışkanı sürükleyeceği şekilde tanzim edildiği zaman yağlama tabakası pozitif bir basınç meydana getirecektir. Ve tabakaya dik doğrultudaki bir yükü taşıma imkanına sahip olacaktır. Basınç artmasının tabaka içinde tek bir maksimumu vardır ve onun değeri $(h_1-h_2)/h_1$ oranını bir mertebesinde kabul edersek). $\mu \cdot l \cdot U / h_1^2$ mertebesinde olup, çok yüksek basınçların çok ince tabakalar içinde meydana gelebildiğini gösterir.⁵

Şimdi hareketli cisme etkiyen F itkisi ile R sürtünme kuvvetini hesaplayalım. Normal gerilme yalnız P den ibaret olduğu için hareketten meydana gelen itki.

$$F = \int_0^l (P-P_0) dx = \frac{1}{2} \int_{h_1}^{h_2} (P-P_0) dh = \frac{6 \cdot \eta \cdot U}{2^2} \cdot \left[\frac{2(h_2-h_1)}{h_1+h_2} - \log \frac{h_2}{h_1} \right]$$

veya $k = \frac{h_1}{h_2}$, koyarsak.

$$F = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot l^2}{(k-1)^2 \cdot h_2^2} \cdot \left[\log k - \frac{2(k-1)}{k+1} \right]$$

buluruz. Sürtünme kuvveti için.

$$R = \int_0^l \left(\frac{1}{2} \frac{dP}{dx} \cdot h + \frac{\eta \cdot U}{h} \right) dx = \frac{1}{2} \int_{h_1}^{h_2} h \cdot \frac{dP}{dh} + \frac{\eta \cdot U}{2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h}$$

$$R = \frac{3 \cdot \eta \cdot U}{2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{h-h_0}{h^2} dh + \frac{\eta \cdot U}{2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h}$$

$$R = \frac{2 \cdot \eta \cdot U \cdot l}{(k-1) \cdot h_2} \cdot \left[2 \log k - \frac{3(k-1)}{k+1} \right]$$

Sürtünme kuvvetinin normal itkiye oranı bu halde,

$$\frac{R}{F} = \frac{(k-1) h_2}{3 l} \cdot \frac{2 \log k - \frac{3(k-1)}{k+1}}{\log k - \frac{2(k-1)}{k+1}}$$

Maksimum itki için, $k=2,2$ bulunur.

$$F = 0,16 \frac{\eta \cdot U \cdot l^2}{h_2^2} \quad R = 0,75 \frac{\eta \cdot U \cdot l}{h^2}$$

$$\frac{R}{F} \approx 4,7 \frac{h_2}{l}$$

3. MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE HİDRODİNAMİK YAĞLAMA.

Genel olarak Bu sonuca göre kuvvetin iki bileşeninin oranı akışkanın Viskozitesinden bağımsızdır ve h_2/h_1 oranı sabit tutulmakla, h_1 küçültülerek, sonsuz olarak küçültülebilir. İyi bir yağlama yani küçük bir sürtünme kuvveti için h_2 yi L_y göre küçük yapmak zorundayız. L_y Christopherson tarafından gösterilmiştir ki, bir teli çevreleyen, etrafında az miktarda boşluk bulunan, uygunca düzenlenmiş bir tüple, çekim hızı yaklaşık 400 m/dak değerine çıkılabilir ve uygun bir yağlayıcı filmi geliştirilebilir.

Tel belirli bir hızla ulaştıktan sonra, matris ile tel arasındaki temas tamamen engellenir. Sabun gibi yumuşak katıklar, daha düşük hızlarda tam bir ayrışma sağlayacaktır. Sabun gibi katkı maddeleri malzemelerin plastik şekillendirilmesinde yağlayıcı olarak iyi sonuçlar verirler. Sabun Newtonien bir madde olmamasına rağmen, kayma ve basınç özelliklerine bağlı olarak rheodinamik yağlayıcılar olarak tanımlanabilirler.

3.1. ELASTO HİDRODİNAMİK TEORİ.

Bu incelemede amaç özellikle haddeleme teorisinde elasto ve plasto hidrokinamik yağlamanın sonuçlarını gerçeğe uygun olarak elde edebilmektir. Ayrıca dişli çarkların çalışmasında ortaya çıkan yüksek sürtünme olayları ilgi görmüş ve araştırılmıştır. Çizgisel temas noktalarındaki sınırlı basınca rağmen, hidrokinamik özelliklerin burada da önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Şaşırtıcı da olsa bu sonuç ortaya çıkmıştır ki, elastoplastik özellikler hariç dişli yağlayıcılarının iyi bir performansı, sıvıya zorunlu özellikleriyle, dişli yüzeyinin elastik deformasyonunun etkisindedir. Elastohidrokinamik teori henüz gelişme safhasında olmasına rağmen yağlama proseslerinin en önemli konularından birini oluşturmaktadır.

Teori, Reynolds eşitliklerinin, yüzeyin elastik deformasyonu ve basıncın viskozitenin değişimi üzerindeki etkisini temsil eden eşitliklerin birlikte çözülmesi esasına dayanır.

Diyelim z eksenini boyanmış, x yönünde U hızıyla döndürülen yarıçapları r olan iki silindiri gözönüne alalım.

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12} \frac{dp}{dx} \right) = 12 U \frac{dh}{dx}$$

Bu basıncının ortaya çıkarılmasında, parabolik tam silindir şeklindeki yağ tabakaları üzerine yapılan araştırmalardan yararlanılmıştır. Viskozite basıncın logaritmik bir fonksiyonudur.

$$\eta = f(p)$$

"3. MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE HİDRODİNAMİK YAĞLAMA.

Genelde bilinirki metallerin plastik şekillendirilmesinde kullanılan yüksek basınç $2000-4000 \text{ kgf/mm}^2$ dir ⁵, bu basınç iş parçası ile şekillendirme düzeneginin, hidrodinamik yolla kurulmuş ince bir yağ tabakası tarafından ayrılmasını sağlayabilmek için çok fazladır. Christopherson tarafından gösterilmiştir ki ⁵, bir teli çevreleyen, etrafında az miktarda boşluk bulunan, uygunca düzenlenmiş bir tüple, çekim hızı yaklaşık 400 m/dak değerine çıkılabilir ve uygun bir yağlayıcı filmi geliştirilebilir.

Tel belirli bir hıza ulaştıktan sonra, matris ile tel arasındaki temas tamamen engellenir. Sabun gibi yumuşak katıklar, daha düşük hızlarda tam bir ayrışma sağlayacaktır. Sabun gibi katkı maddeleri malzemelerin plastik şekillendirilmesinde yağlayıcı olarak iyi sonuçlar verirler. Sabun Newtonien bir madde olmamasına rağmen, kayma ve basınç özelliklerine bağlı olarak rheodinamik yağlayıcılar olarak tanımlanabilirler.

3.1. ELASTO HİDRODİNAMİK TEORİ.

Bu incelememizde amaç özellikle haddeme teorisinde elasto ve plasto hidrodinamik yağlamanın sonuçlarını gerçeğe uygun olarak elde edebilmektir. Ayrıca dişli çarkların çalışmasında ortaya çıkan yüksek sürtünme olayları ilgi görmüş ve araştırılmıştır. Çizgisel temas noktalarındaki sınırlı basınca rağmen, hidrodinamik özelliklerin burada da önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Şaşırtıcı da olsa, şu sonuç ortaya çıkmıştır ki, elastoplastik özellikler hariç dişli yağlayıcılarının iyi bir performansı, sıvının yoğunluk özellikleriyle, dişli yüzeyinin elastik deformasyonunun etkisindedir. Elastohidrodinamik teori henüz gelişme safhasında olmasına rağmen yağlama proseslerinin en önemli konularından birini oluşturur. ¹³

Teori, Reynolds eşitliklerinin, yüzeyin elastik deformasyonu ve basıncın viskozitenin değişimi üzerindeki etkisini temsil eden eşitliklerin birlikte çözülmesi esasına dayanır.

Dikey z eksenini boyunca, x yönünde U hızıyla döndürülen yarıçapları r olan iki silindiri gözönüne alalım.

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 12 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx}$$

Bu bağıntının ortaya çıkarılışında, parabolik tam silindir şeklindeki yağ tabakaları üzerine yapılan araştırmalardan yararlanılmıştır. Viskozite basıncın logaritmik bir fonksiyonudur. ¹³

$$\eta = f(p)$$

h değerinin radyal yönde değişimi şu bağıntıyla verilebilir.

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R} + V.$$

olayın başlangıcında minimum mesafelerin (disliler arası uzaklık), h_0 olduğunu kabul edelim. Ayrıca elastik deformasyon V hızının artmasına neden olur, bu olay sabit elastiklik modülüne (E) ve basınca (P) bağlıdır.

Bu konuyla ilgili analitik çözüm henüz bulunamamıştır. Fakat boyut analizi sonucu h değerine, ölçüsüz oranın tesir ettiğini ortaya çıkarmıştır.

$$\frac{h}{R} = f \left(\frac{W}{E.R.}, \frac{\eta_0 \cdot U}{E.R.}, \gamma.E \right).$$

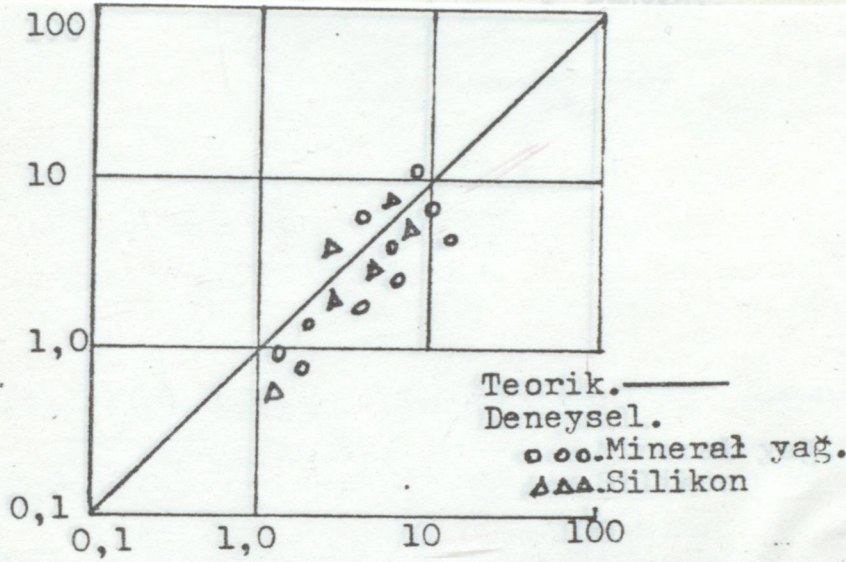
Burada W, birim genişlik için ağırlıktır. Viskozite için bulunmuş en etkili terim $[\eta_0 \cdot U / E.R.]$ dir.

Reynolds eşitliklerinin integrasyonu için, hesaplanmış geometrik yüzeylerde basınç dağılımını belirlemek amacıyla girişteki düşük basınçlı bölgelerden yararlanılır. Fakat düşük basınçlı bölgelerde elde edilen sonuçlar yüksek basınçlı bölgelerde elverişli sonuçlar vermediğinde Reynolds eşitliğinin ters çözümünden yararlanılır, yani işlem terstengidilerek yürütülür. Bu da basınç dağılımının özellikle incelenmesini gerektirir. Daha sonra yüzeylerin yer değişimi hesaplanır ve sonuçlar değerlendirilir.

Bu hesaplamalar minimum yağ filmi kalınlığının beklenenden daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca elastik deformasyonlar ön plana geçtiği zaman yağlayıcı film kalınlığının sadece ağırlıa bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Malzemeye bağlı özellikler ($\gamma.E$) de önemlidir. Fakat pratikte dışarı çark malzemeleri çok fazla değişmezler. Şekil (25) elastohidrodinamik teori konusundaki deneysel ve teorik sonuçların uygunluk içinde olduğunu göstermektedir.¹³

Genel yağlama açısından yağ tabakası kalınlığının ağırlıkla birlikte teorik değerden daha az değişmesi önemli bir sonuçtur. Gerçekten de Archard ve Kirk'un¹³ yaptığı deneyler, elastohidrodinamik rejimin, çevresel yağlamayla ilgili kayma sürtünmesinin olduğu durumlar için genişletilebileceğini öne sürmektedir. Böylece sonuç olarak 1 cm/sn ye kadar yüksek hızlar için temas noktalarında aynı sürtünme katsayısı geçerlidir. 100 cm/sn lik daha

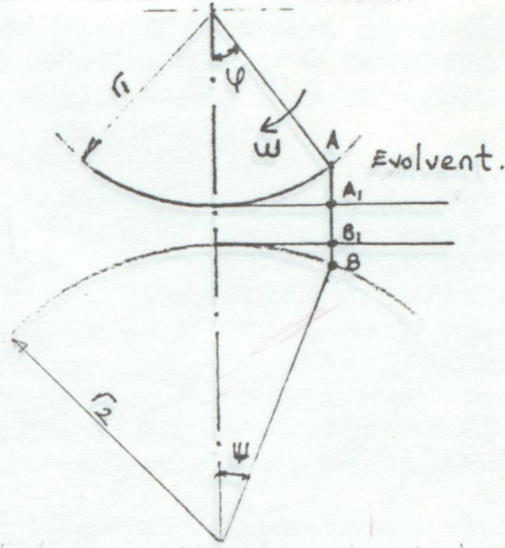
yüksek hızlar için, sınır arttırıcı özelliği olmayan bir yağ kullanıldığında, ağırlık yağlamaya zarar vermeden ve ya çevre yağlanışının bir karakteristiği olarak, hızdan bağımsız sürtünmeye doğru bir geçiş ile plastik deformasyona neden olacak kadar yüksek olabilir.



Şekil(25).Deneysel ve teorik sonuçlar.
Ref(13)

Yakın zamanlarda yağlanmış temas noktasında yağ tabakasının kalınlığının haritasını çıkarmak için Newton'un eğrilerinden yararlanılmıştır. Bütün hidrodinamik ve rheodinamik yağlamalarda, elastohidrodinamik teoride olduğu gibi yağlayıcının özellikleri, basınç, ısı ve kayma oranından etkilenir. Elde edilen sonuçlar sınırlı bir basınç ve malzeme alanı için uygundur. Bu kanunun temelini teşkil eden viskozitenin çeşitli parametrelere bağlı olarak değişimi daha sonra detaylı olarak incelenecektir.

Yapılan incelemeler genişletilir ve kendi eksenleri etrafında W_1 ve W_2 açısal hızlarıyla dönen r_1 ve r_2 yarıçaplı 2 daire silindrine uygulanırsa. Şekil (26).



Şekil (26). Yaşlanma durumu elverişsiz kayma yüzeyleri. (Ref 6)

Yağlayıcı film kalınlığı (h) şöyle tarif edilir.

$$h = h_0 + \overline{AA_1} + \overline{BB_1}.$$

Burada.

$$\overline{AA_1} = r_1 \cdot \frac{\varphi^2}{2}.$$

$$\overline{BB_1} = r_2 \cdot \frac{\psi^2}{2} \quad \text{ve} \quad r_1 \cdot \varphi = r_2 \cdot \psi.$$

denklemleri geçerlidir. Tarifte AA_1 ve BB_1 i düşey ordinatlar olarak almayıp ilgili evolvent kavislerinin uzunluğu olarak almak suretiyle yapılan bu kabul gerçeğe daha fazla uygunluk göstermektedir.

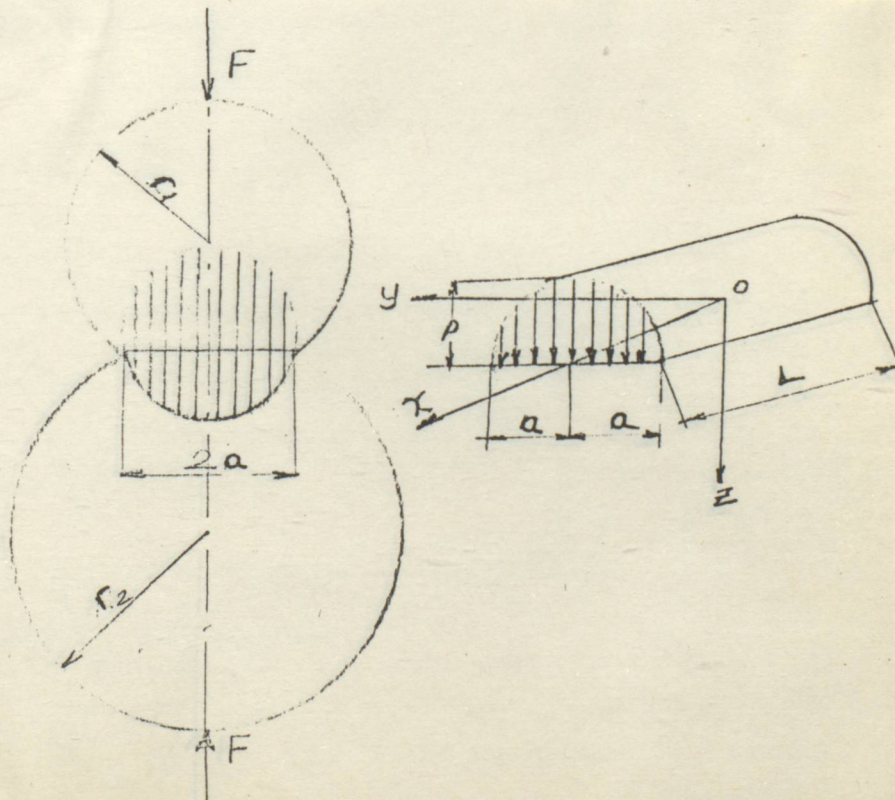
$$\frac{h}{h_0} = 1 + \frac{r_1 \cdot \varphi^2 + r_2 \cdot \psi^2}{2h_0} = 1 + \frac{r_1^2 \cdot \varphi^2}{2h_0} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = 1 + (\beta \cdot \varphi)^2.$$

yazılabilir. $\frac{x}{a} = \varphi$ alındığı takdirde, parabolik yarım silindirler için elde edilen, yağ filmi kalınlığını veren bağıntıyla aynı olur. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan bağıntılar iki silindir içinde, dişli çark dış yüzeylerinin ve yuvarlanma mekanizmalarının yağlanması da ($U = U_1 + U_2$.) geçerli kalır.

Bu teorik esasların pratik önemi ilk bakışta makaralı yataklarda aşınmayı azaltmada görülür. Dişli çarklarda eş dişlerin, kavramaya başlamasından sonuna kadar eş yüzeyleri arasında yük kaldırmaya elverişli bir yağ filmini teşkil etmek mümkün olsa, o takdirde ağır yük altında dönen çarkların iki temel kusuru (gürültü ve aşınma) büyük ölçüde azaltılmış olur.

2 eleman arasındaki teorik temas noktasal ve çizgisel olduğu takdirde, dış kuvvetlerin etkisi altında meydana gelen deformasyon sonucunda teorik nokta daire veya elips, teorik çizgi ise dikdörtgen şeklini alır. Şekil (27.) Bu incelememizde amaç, özellikle haddemele teorisinde elastik ve plasto hidrodinamik yağlamanın sonuçlarını gerçeğe uygun olarak elde edebilmektir. Yüzeydeki basınçlar ve deformasyonlar Hertz teorisine göre hesaplanır. Bu teorisinin incelenmesinde şu kabuller yapılır.

- Temas yüzeylerinin boyutları, elemanların diğer boyutlarına oranla çok küçüktür.
- Deformasyonlar, malzemenin orantı sınırının altındadır.
- Deformasyon bölgesinde Hooke kanunu geçerlidir.
- Temas yüzeylerinde hiç bir kayma gerilmesi yoktur.



Şekil(27).Yarıçapları farklı iki silindirin elastik şekil değiştirmeler. (Ref 7)

Yarıçapları r_1 ve r_2 olan silindirik şekilde iki elastik cisim, birbirine doğru F kuvveti ile bastırılırsa, deformasyon sonucunda b yarıçaplı dairesel bir temas yüzeyi meydana gelir. Bu basma yüzeyinin yarı çapı,

$$b = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{(1-\nu^2) \cdot F \cdot r}{E}}$$

olarak bulunur. Burada r , $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} \mp \frac{1}{r_2}$ bağıntısı ile her iki basma yüzeyinin temas noktasındaki r_1 ve r_2 eğrilik yarıçaplarından hesaplanan eşdeğer bir eğrilik yarıçapıdır. (Eğrilik merkezi cismin içinde bulunursa eğrilik pozitif sayılır, diğer hallerde eğrilik negatif kabul edilir.) E ise;

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right).$$

bağıntısı ile her iki malzemenin E_1 ve E_2 , elastiklik modüllerinden hesaplanan eşdeğer bir elastiklik modülüdür. Her iki cismin temas yüzeyindeki basınçlar yarımküre şeklinde bir yayılım göstermektedir. En büyük gerilme, basınç yüzeyinin ortasında olup değeri.

$$P_{H_{max}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi \cdot b^2}.$$

dir veya b yerine değeri konursa.

$$P_{H_{max}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot E^2}{\pi \cdot 3 \cdot r^2 (1-\nu^2)^2}}$$

bağıntısı elde edilir. 2 çelik cisim için basma yüzeyinin yarıçapı deformasyon sonucunda iki cismin, teması sürdürebilmek için birbirine yaklaşması gereken yassılma miktarı δ_k ve yüzey basıncı (ν ; Poisson oranı=0,3 alınarak) bağıntıları elde edilir.

$$b = \sqrt[3]{\frac{1,364 \cdot F \cdot r}{E}}$$

$$\delta_k = 1,23 \sqrt[3]{\frac{F^2}{E^2 \cdot r}}$$

$$P_{H_{max}} = 0,388 \sqrt[3]{\frac{F \cdot E^2}{r^2}}$$

iki silindirin birbiri üzerine basması halinde temas yüzeyi, eni $2a$ ve uzunluğu L . (silindirin uzunluğu) olan bir dikdörtgen olur. Bu dikdörtgenin a genişliği,

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot F \cdot r}{\pi \cdot L} \cdot \frac{1 - \nu^2}{E}}$$

olarak yazılır. Yüzey basıncı;

$$P_{Hmax} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a \cdot L} = \sqrt{\frac{F}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2}}$$

bağıntısı ile verilir. Bu bağıntılar iki çelik cisim için ($\nu = 0,3$) hesaplanırsa

$$a = 1,52 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{E \cdot L}}$$

$$P_{Hmax} = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E}{L \cdot r}}$$

denklemleri elde edilir. Bland-Ford¹²'un haddelenme teorisinde olduğu gibi yarıçap büyümesi şöyle belirlenebilir.

$$R' = R \cdot \left[1 + \frac{C \cdot P_{Hmax}}{b(h_0 - h_1)} \right]$$

$$C = 16 \cdot \frac{1 - \nu^2}{\pi \cdot E}$$

Çelik haddelerde $C = 3,34 \times 10^{-4} \text{ in}^2 / \text{ton} = 2,15 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 / \text{kp}$. Soğuk haddelenme teorilerinde R' yarıçap büyümesi dikkate alındığı halde sıcak haddelenmede bu göz önüne alınmaz. Yarıçapı a olan bir silindirin düzlem bir cisme basması halinde eş değer eğrilik yarıçapı R' olarak elde edilir.

3.2. PLASTOHİDRODİNAMİK TEORİ

Bu kanunun teorik incelemesinde, elastohidrodinamik teorisinde olduğu gibi; hidrodinamik eşitliklerin, viskozitenin ısı ve basınçla değişimi ve metallerin plastik şekil değiştirme eşitlikleriyle birlikte düşünülmesi esassından yararlanıldı. Cheng¹³ termal elastohidrodinamik teorideki gibi boyutsuz guruplar kullanarak; basınç dağılımı, yağ

tabakası kalınlığı, yağlayıcı ısısı ve yüzey sürtünmesi için değişik çözümler sağlayan ince yağ tabakasının hadeden geçirilmesi teorisini geliştirdi. Oldukça karmaşık bir teori olmasına karşılık özellikle metallerin plastik şekillendirilmesinde, yüksek çalışma hızlarında uygun teorik neticeler vermesi bakımından önemlidir.

3.3. MAGNETOHİDRODİNAMİK

Magnetohidrodinamik, elektiriksel iletkenliği olan bir akışkanın bir magnetik alanının etkisi altında hareketini inceler. Akışkanın hareketi sebebiyle indüklenen elektrik akımları alanı değiştirir, aynı zamanda, Bu akımların alan içinde akışı, hareketi değiştiren mekanik kuvvetleri ortaya çıkarır. Magnetohidrodinamiğin güçlüğü ve ilgi çekiciliği; alan ile hareket arasındaki karşılıklı etkiden ileri gelir.

Magnetohidrodinamik ile ilgili denklemlerin çıkarılışında, gözönüne alınan akışkanın sürekli olduğu farzedilmiştir; onu meydana getiren bireysel taneciklerin özellikleri, yalnız viskozitesine, termik ve elektiriksel iletkenliklerine etkileri dolayısıyla gözönüne alınmıştır. Bunun yanında elektronların atalet etkileri ihmal edilmiştir.¹⁴

Magnetohidrodinamiğin denklemleri, magnetik alan ile hareket arasındaki karşılıklı etki gözönüne alınarak değiştirilmiş elektromagnetinin ve hidrodinamiğin denklemleridir. Yüksek frekanslı titreşimler dışında iletkenlerle ilgili birçok elektromagnetik problemdeki gibi Maxwell, yerdeğiştirme akımları göz önüne alınmaz. Şu halde elektrik yüklerinin yayılması; yük için süreklilik denkleminde ihmal edilir. Böylece elektirik akımlarında kapalı devrelerde akıyorlarmış gibi bakılır. Bu, yük yayılmalarının elektrostatik etkileri önemsiz demek değildir, gerçekte çok önemlidir. Fakat elektrik yükünün sürekliliği denkleminde, yük yoğunluğunun değişme hızını gösteren terim, diğer terimlere göre ihmal edilebilir bir mertebededir.

$\vec{J}$; akım yoğunluğu, H ; manyetik alan ise;

$$\text{rot } H = 4 \cdot \pi \cdot \vec{J}, \quad \text{div } \vec{J} = 0.$$

yazılabilir.

E ; elektiriksel olan şiddeti ise;

$$\text{rot } E = -\varphi \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right), \quad \text{div } H = 0.$$

φ ; Akışkanın permeablitesi.

$\partial H / \partial t$; Manyetik alanın zamana bağlı değişimini gösteren bir ifadedir.

Madde V hızındaysa, onu etkileyen elektriksel alan ;
 $(E + \varphi V \wedge H)$ şeklindedir.

γ ; elektriksel iletkenlikse;

$$\vec{J} = \gamma (E + \varphi V \wedge H).$$

olur.

ρ ; yoğunluksa, hidrodinamik süreklilik denklemi

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \text{div}(\rho V) = 0.$$

olur. Hareket denkleminde, elektromanyetik kaynaklı, birim hacim başına $\varphi \vec{J} \wedge H$ kütle kuvveti görülür. Eğer yegane kütle kuvveti ağırlıkça g vektörel ivme olmak üzere, Hareket denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) = -\text{grad } P + \rho g + F + \varphi \vec{J} \wedge H.$$

olur. Burada P ; basınç, F ; birim hacim başına viskozite kuvvetidir. Buradaki $\partial/\partial t$ operatörü.

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \text{grad}.$$

dır. Bir sıvı içersinde F .

$$F = \rho \cdot \nabla^2 V.$$

ile verilebilir. ν ; kinematik viskozitedir.

Bizim yağlama olaylarında esas olarak ele alacağımız gibi; madde hareket halindeyse;

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot}(V \wedge H).$$

yazılabilir. Bu bağıntı alan değiştirmelerinin, manyetik kuvvet çizgilerinin maddeyle harekete zorlanıyormuş gibi olmakla özdeş olduğunu gösterir. H in zamanla değişmesi esnasında kuvvet çizgileri hareket eden maddeyle taşınacak ve aynı zamanda onun içine sızacaktır. L , alanın boyutlarıyla mukayese edilebilir bir uzunluk ve V hız ise.

$$R_m = \frac{L \cdot V}{\nu}.$$

Şeklinde bir katsayı tanımlanır. Bu denkleme magnetik Reynolds sayısı denir.

Genel bağıntıları inceledikten sonra yağlama olaylarına temel teşkil etmek üzere; sabit paralel iki levha arasındaki iletkenliği düzgün bir sıvının laminar hareketini gözönüne alalım. Düzlemleri $z=0$ ve $z=L$ olarak alalım, farzedelim V hızı x - doğrultusunda ve H_0 manyetik alanı çevre cıdarlara dik olarak yani Oz ye paralel olarak uygulanmıştır.

$z=0$ ortay düzlemi, civarındaki sıvının cidara yakın alandan daha hızlı hareket etmesi sebebiyle, hareketinin doğrultusunda kuvvet çizgileri çekmeye eğilim gösterir. Böylece alanın harekete paralel bir bileşeni ortaya çıkar. Aynı zamanda genel halde y - doğrultusunda etkileyen düzgün bir elektrik alanında doğar.

Viskoziteyi gözönüne alarak, fakat ağırlığı bir kenara bırakarak daimi hareketin denklemi;

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \varphi \cdot J_y \cdot H_0 + f \cdot V \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

olur, aynı zamanda,

$$J_y = \gamma (E - \varphi \cdot V \cdot H_0) \quad , \quad 4\pi \cdot J_y = \frac{\partial H_x}{\partial z}$$

dir. Bu denklemlerde V, J_y, H_x yalnız z nin fonksiyonlarıdır.

Basınç gradienti $-\frac{\partial P}{\partial x} = P$, sıvının bütün noktalarında aynıdır. Böylece;

$$0 = P + \varphi \cdot \gamma \cdot H_0 (E - \varphi \cdot V \cdot H_0) + f \cdot V \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

bağıntısı elde edilir. Cidarda $V=0$ olduğunu hatırlayarak, bu denklemin çözümü olarak,

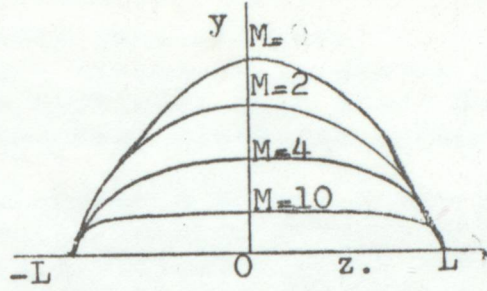
$$V = \left(\frac{E}{\varphi \cdot H_0} + \frac{P}{\varphi^2 \cdot \gamma \cdot H_0^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\cosh(M \cdot \frac{z}{L})}{\cosh M} \right)$$

bulunur, burada.

$$M = \varphi \cdot H_0 \cdot L \cdot \left(\frac{\gamma}{f \cdot V} \right)^{1/2}$$

yazılırsa.

M nin çeşitli değerlerine karşılık gelen hız profilleri Şekil (28.) de gösterilmiştir. M küçükse, viskozite, indüksiyon sürüklenmesine hakim olur, ve hız profili hemen hemen parabolik olur. Diğer taraftan M büyükse viskozite, cidara bitişik ince bir sınır tabaka dışında önemsiz olur.



Şekil(28). M sayısının çeşitli değerleri için hız profilleri. Ref (14)

Buradan elde edilen ortak sonuç, kuvvetli manyetik alanlar türbülanslı akışa mani olan büyük bir manyetik viskozite meydana getirirler. Böylece vasat bir manyetik alan, indüksiyon sürüklenmesine rağmen verilen bir debiyi hasıl etmek için gerekli basınçta bir azalmaya sebep olur. Buna bağlı olarak vasat bir manyetik alanın harekete karşı direnci azalttığı sonucu ortaya çıkarkı bu vaşlama teorisinin yararlandığı temel sonuçtur."



Şekil(29). Akışkanın viskozite etkisiyle oluşan hız profili.

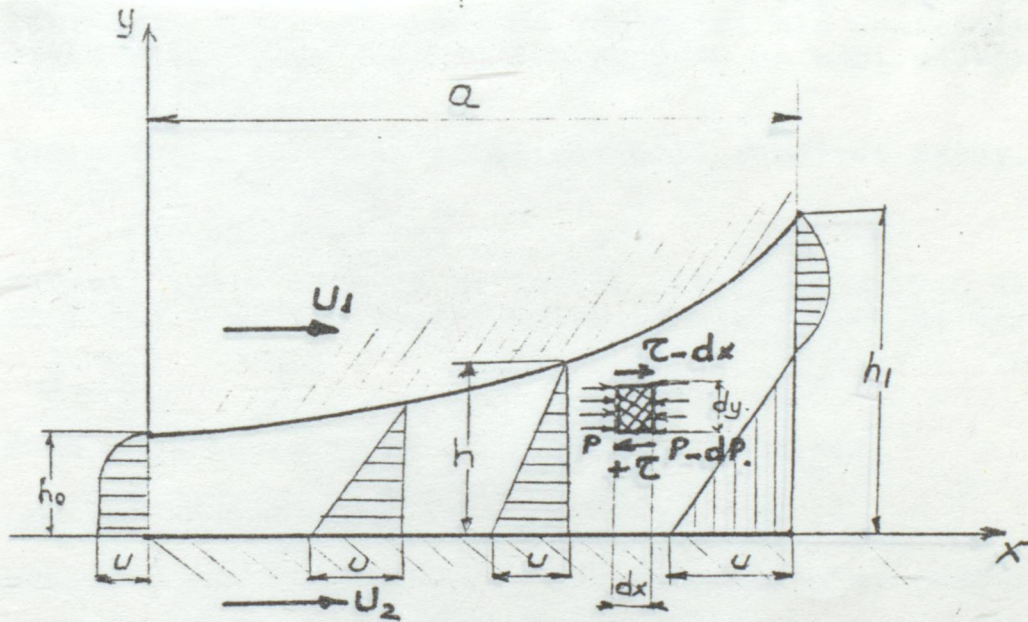
3.4. HİDRODİNAMİK YAĞLAMANIN TEMEL PRENSİPLERİ

Hidrodinamik yağlama; yüzeyler arasındaki boşluğun şekline ve izafi hızına bağlı olarak yüzeylerin birbirinden tamamiyle ayrılması için yeterli derecede basınca sahip bir yağ tabakası oluşturan yağlama sistemidir.

İyi bir yağlamanın amacı, kayma yüzeylerinin doğrudan doğruya temasını ve aynı zamanda aşınmayı önlemek üzere yük kaldırmaya elverişli bir yağ tabakasının teşkilidir. Bu takdirde sürtünme bir hidrodinamik problem olarak hesap edilebilir.

Teorik bakımdan sıvı sürtünmesinin incelenmesi, viskoz akışkanların Navier-Stokes hareket denklemlerine dayanır. Ayrıca bu denklemlerin yanısıra süreklilik denklemi de göz önüne alınır.

Navier-Stokes⁵ denklemlerini uygulamak için şekil (29.) de gösterilen akışkan tabakasının çok ince olduğu gözönüne alınarak şu kabuller yapılır.



Şekil(29). İki kayma yüzeyi arasındaki hız yayıllısı. Ref(3)

İnce bir yağ tabakasıyla birbirinden ayrılmış bulunan 2 yüzeyden biri diğerine göre sabit U izafi hızıyla hareket etsin;

- 1- Akış laminerdir, akışın laminar olması gerektiği ispat edilecektir.
- 2- Akışkan tabakası kalınlığı (h) in çok ince olması nedeniyle, ayrıca (h/a) nın çok küçük olduğu kabul edildiğinden, Y doğrultusundaki akım x doğrultusundaki çok daha büyük akıma nazaran ihmal edilebilir. Böylece P basıncıda Y'ye bağlı olmaz. Ayrıca akışkan tabakası o kadar incedir ki hareket yüzeylerinin herhangi bir eğriliği ihmal edilebilir.
- 3- Viskoz kuvvetler yanında akışkanın eylemsizlik kuvvetleri ve ağırlığı, küçük olduğundan ihmal edilebilir.
- 4- Akışkan tabakasını etkileyen dış kuvvetler yoktur.
- 5- Akışkan ile hareket yüzeyleri arasında kayma yoktur.
- 6- Y, x ve z ye oranla çok küçük bir boyuttur. Bu nedenle hız gradyanları $\partial u / \partial y$ ve $\partial w / \partial y$ ile kıyaslandığında diğer bütün hız gradyanları ihmal edilebilir büyüklüktedir.

Reynolds eşitlikleriyle yapılan diğer bir teorik çözümde, koordinat sisteminin her üç yönündeki hız değişimleri de dikkate alınarak elde edilen sonucun da aynı olduğu görülecektir.⁹

Yağın kendi ağırlığı ihmal edildiği takdirde $dx \cdot dy \cdot l$ gibi bir hacim elemanına;

$$(dp \cdot dy - d\tau \cdot dx)$$

kuvveti tesir eder ve bu kuvvet hacim elemanının dx, dy ve z dan ibaret olan kütlelerine (du/dt) ivmesini verir.

$$f = \frac{\rho}{g} \cdot \frac{du}{dt}$$

Buna göre hacim elemanının hareket denklemi;

$$dp \cdot dy - d\tau \cdot dx = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{du}{dt}$$

şeklinde yazılır. Sürtünme adı verilen bu harekette

$p \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{du}{dt}$ kütle kuvvetini, ondan çok daha büyük olan Viskozite yanında ihmal edersek, o takdirde hareket denklemi daha da sadeleşir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

Bu ifadede Newton hipotezine uygun olarak,

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$$

değeri konursa (η : Akışkanın viskozitesi.)

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \eta \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

olup, böylece;

$$\frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

sonucu elde edilebilir.

Bu kabuller esas alınarak Navier-Stokes denklemleri;

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \eta \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.4.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (3.4.6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \eta \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3.4.7)$$

şekline dönüşür.

Süreklilik denklemi; akışkanın durumunun zamana bağlı olmadığı kabulüyle.

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial y} = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (3.4.8)$$

Şeklinde yazılır. Burada u,v,w, hızın x,y,z doğrultularına göre bileşenleri ve (ρ) ise akışkanın yoğunluğudur.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \eta \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.4.9)$$

denklemi, (y) ye göre 2 defa integre edilirse. Bunun manası integrasyonun Y doğrultusu boyunca yapılması demektir ki, bu halde Y doğrultusunda yapılması demektir ki bu halde $\frac{dp}{dx} = \text{sabittir}$.

Y doğrultusunda viskozitenin de sabit kaldığını farzederek, sınır şartları olarak.

y=0. için $U=U_1$.

y=h. için $U=U_2$.

uygulanırsa.

$$U = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot y(y-h) + \frac{h-y}{h} U_1 + \frac{y}{h} U_2$$

hız denklemi elde edilir. Burada sınır şartlarını kabul ederken her 2 yüzey boyunca yağın yapışmış olduğunu dik-

kate alırız. Katı bir cismin, sınır yüzeyinde doğrudan doğruya temasta bulunduğu sıvıya tatbik ettiği moleküler kuvvetler yani absorpsiyon, dolayısıyla bu katı cisimden sıvı tabakasını tamamen ayırmaya imkan yoktur. Saf madeni yağlar su buharı eşliğinde ve yüksek sıcaklıkta demiri ıslatmazlar. Çünkü yağın yüzey gerilimi, buhar eşliğinde sıcak suyun yüzey geriliminden daha büyüktür. Bu sebeptendir ki böyle hallerde madeni yağlara bitki ve hayvan menşeyli yağlar karıştırılır, bu olaylar dikkate alınmalıdır.

Eğer yüzeylerin birinin sabit kaldığı diğerinin buna göre u hızıyla hareket ettiği kabul edilirse (u; burada izafi hızdır).

Hız denklemi:

$$U = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2. \quad (3.4.11)$$

olur. C_1 ve C_2 integrasyon sabitlerini tayin için sınır şartı olarak.

$y=0$ için, $U=C_1$.

$y=h$ için,

$$U = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) - U \left(1 - \frac{y}{h}\right). \quad (3.4.12)$$

sınır şartları vardır. Böylece hız.

$$U = \frac{h^2}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + C_1 h + C_2 = 0. \quad (3.4.13)$$

olarak elde edilir.

$$U = U_1 - U_2.$$

konursa, aynı sonucun elde edileceği görülür. Hızın denklemi paraboliktir.

$U=0$ olması halinde $U_1 - U_2 = 0$ ise.

$$U = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy). \quad (3.4.14)$$

ifadesi geçerlidir.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \eta \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}. \quad (3.4.15)$$

denkleminde, yüzeylerin z yönünde hareket etmediği kabul edilirse, ve.

$y=0$ için, $w=0$.

$y=h$ için, $w=0$.

sınır şartlarında integre edilirse.

$$W = -\frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot y(y-h). \quad (3.14.16)$$

hız denklemi elde edilir.

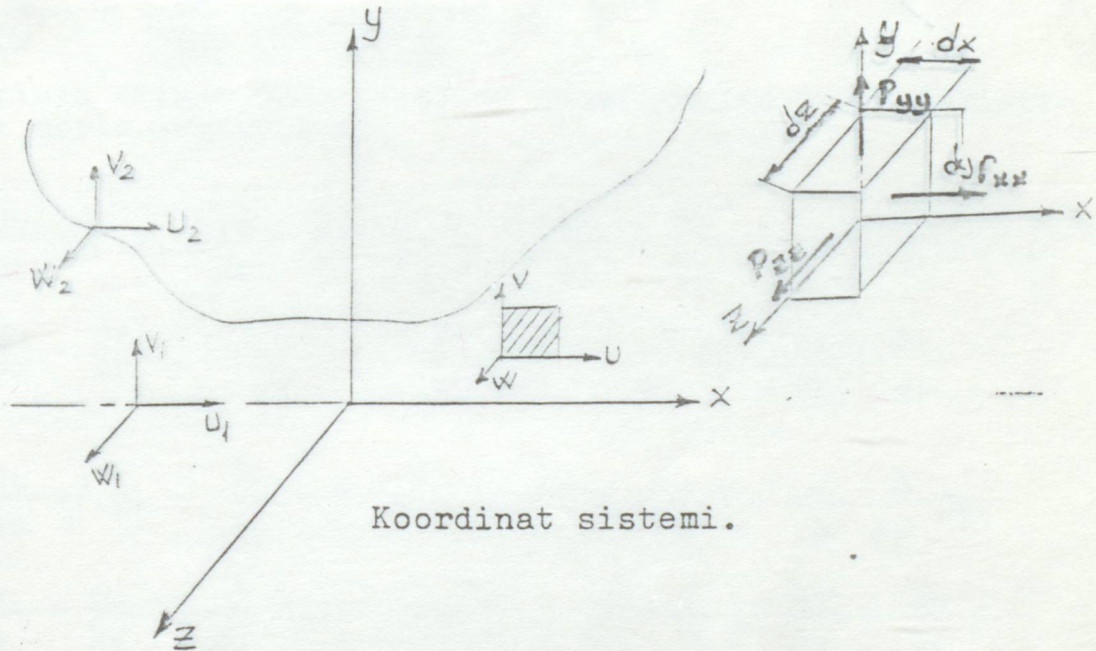
$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = -\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho W)}{\partial z}. \quad (3.14.17)$$

denkleminde U ve W yerine değerleri yazılarak, denklem y ye göre integre edilirse;

$y=0$ için, $V=0$.

$y=h$ için, $V=0$.

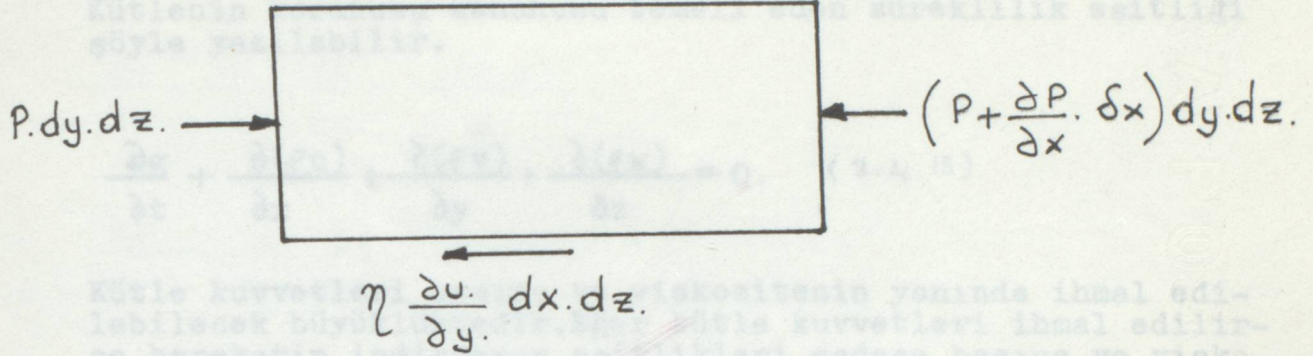
Sınır şartları konursa, bazı matematiksel düzenlemelerden sonra, hidrodinamik sıvı sürtünmesinin genel denklemi elde edilir. Bu genel denklemi vermeden önce aynı genel denklemin elde edilmesinde, her 3 yöndeki hız değişimini dikkate alan ve bazı kabullerle bağıntıları basitleştiren Reynolds eşitliklerini inceleyelim. Şekil (30).



Koordinat sistemi.

Şekil(30).Sıvı içindeki bir elemana etki eden yüzey kuvvetlerinin gösterilişi. Ref(9)

$$\left[\eta \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \delta y \right] dx \cdot dz.$$



(Yüzey kuvvetleri (x yön). sıvı içindeki eleman üzerindeki iş.)

x yönündeki eşitlik için:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \quad (3.4.18)$$

Teorinin ortaya çıkarılışında yararlanılan temel bağıntıları şöyle yazabiliriz.

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \cdot x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \eta \cdot$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \cdot y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \eta \cdot$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho \cdot z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \eta \cdot$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

Bu eşitliklerin sol tarafı yağ tabakasının durgunluk efek-
tidir, sağ taraftaki terimler ise kütle kuvvetleri, basınç
ve viskoziteyle, bunların değişimlerini gösteren terimler-
dir.

Kütlenin korunumu kanununu temsil eden süreklilik eşitliği
şöyle yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (3.4.19)$$

Kütle kuvvetleri basınç ve viskozitenin yanında ihmal edi-
lebilecek büyüklüktedir. Eğer kütle kuvvetleri ihmal edilir-
se, hareketin indirgenen eşitlikleri sadece basınç ve visko-
zitenin birer fonksiyonu olur. İlk eşitliğin indirgenmesi
ile şu bağıntı elde edilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (3.4.20)$$

Aynı ifadeler y ve z koordinatları için de yazılabilir.
Diğer bağıntılarla ilgili olarak, yağlanmış bir temas nok-
tasında sıvının pek fazla olmayan kalınlığı nedeniyle,
hız bileşenleri u, v ve w, y ile alakalı olarak diğer hız bi-
leşenleriyle geniş bir biçimde karşılaştırılabilir. Yapılan
incelemeler hareketi temsil eden eşitliklerdeki ikinci te-
rimin ihmal edilmesine müsaade ederler. Hareketin basitleş-
tirilmiş denklemleri şu şekle gelirler.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.4.21)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \cdot \eta \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.4.22)$$

Bu eşitlikler, direkt olarak sıvıdaki yüzey güçlerinin den-
ge eşitliğinde yerine konmasıyla elde edilebilirler. Bu ana-
lizler hem viskoz hem de izoviskoz sıvılar için geçerlidir.
Dahası, durum eşitliği henüz tanıtılmadığından eşitlikler

sıkıştırılabilir ortamlarada uygulanabilirler.

Hız gradyanlarını oluşturmak için genel eşitlik y ye göre integre edilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{y}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{A(x, z)}{\eta}.$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{y}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{B(x, z)}{\eta}.$$

Hız bileşenleri için genel ifadeler, bu eşitliklerin y ye göre tekrar integre edilmesiyle türerler.

$$u = \frac{\partial p}{\partial x} \int \frac{y}{\eta} dy + A(x, z) \cdot \int \frac{dy}{\eta} + C(x, z). \quad (3.4.23)$$

$$w = \frac{\partial p}{\partial z} \int \frac{y}{\eta} dy + B(x, z) \cdot \int \frac{dy}{\eta} + D(x, z). \quad (3.24.24)$$

Bu durumda viskozite sadece x ve z nin fonksiyonu olarak kabul edilir. Yağ filmi boyunca viskozitenin değişimi hesaba katılırsa, yukarıdaki integrallerin tamamının hesaba katılması gerekir.

Sınır şartlarını yerine koyarak ve sıvı değişim özelliklerini de dikkate alarak şu bağıntılar elde edilebilir.

$$y = 0, \quad u = u_1, \quad w = w_1.$$

$$y = h, \quad u = u_2, \quad w = w_2.$$

Bu değerler ve viskozitenin y den bağımsız olduğu kabulüyle hız bileşenleri şu şekli alır:

$$u = \left(1 - \frac{y}{h}\right) u_1 + \frac{y}{h} u_2 - \frac{y(h-y)}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

$$w = \left(1 - \frac{y}{h}\right) w_1 + \frac{y}{h} w_2 - \frac{y(h-y)}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Bu hız değerleri süreklilik eşitliğinde yerine konursa ve $0 \rightarrow h$ a kadar integre edilirse.

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (f \cdot u) dy + \int_0^h (f \cdot w) dy + [(f \cdot v)]_0^h = 0.$$

Bu eşitlik genel sonuçlara göre geliştirilirse,

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) \cdot dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_{h_1}^{h_2} f(x, y, z) \cdot dy - f(x, h_2, z) \frac{\partial h_2}{\partial x} + f(x, h_1, z) \frac{\partial h_1}{\partial x}.$$

buradan,

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h (f \cdot u) \cdot dy + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h (f \cdot w) dy - (f \cdot u) \frac{\partial h}{\partial x} - (f \cdot w) \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$[(f \cdot v)]_0^h = 0.$$

Yoğunluğun yağ filmi boyunca değişmediği kabulüyle ve hız ilişkilerinin basitleştirilmesiyle aşağıdaki genel ifadeler elde edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f \cdot h (u_1 + u_2)}{2} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f \cdot h (w_1 + w_2)}{2} \right) - f \cdot u_2 \frac{\partial h}{\partial x} - f \cdot w_2 \frac{\partial h}{\partial z} + f (v_2 - v_1).$$

Sınır şartlarının yerine konması ve bazı matematiksel düzenlemeler ve kabuller sonucunda, hidrodinamik sıvı sürtünmenin genel denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{f \cdot h^3}{12 \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f \cdot h^3}{12 \eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(u_1 - u_2) \frac{\partial (f h)}{\partial x} + 12 f \cdot v.$$

Bu denklem akışkan tabakasında oluşan basınç yayılımını veren en genel diferansiyel denklemdir. Buna göre akışkan tabakasındaki basınç:

- Akışkan tabakasının kalınlığına. (h)
- Akışkanın viskozitesine. (η)
- Akışkanın yoğunluğuna. (ρ)
- Akışkan tabakası kalınlığının ve yoğunluğunun, yüzeylerin hareket yönüne göre değişmesine. ($\partial(\rho h)/\partial x$.)
- Yüzeylerin x ve y doğrultularındaki ($u_1 - u_2$) ve v iza-fi hızlarına bağlıdır.

($u_1 - u_2$) yağ tabakasının uzunluğuna yani x doğrultusuna, v ise yağ tabakasının dikine, yani y doğrultusuna göre iza-fi hızlardır.

Bu denklem hem sıkıştırılamayan (sıvı), hem de sıkıştırılabilen (gaz) akışkanlar (yağlayıcı maddeler) için geçerlidir. Sıkıştırılamayan akışkanlar halinde ρ =sabit olduğundan bu denklem,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6. (u_1 - u_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12.V.$$

şeklinde bulunur.

Plastik şekillendirme olaylarında, tel çekme ve ekstrüzyonun hidrodinamik yağlamalı uygulamalarında matris hareket-siz olduğuna göre $u_2 = 0$ olur. $u_1 = u$ olur. Ayrıca tel çekme-de çekilen malzemenin hareketi dolayısıyla oluşan radyal hız çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bu kabuller altında denklem şu hale gelir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6.U. \frac{\partial h}{\partial x}$$

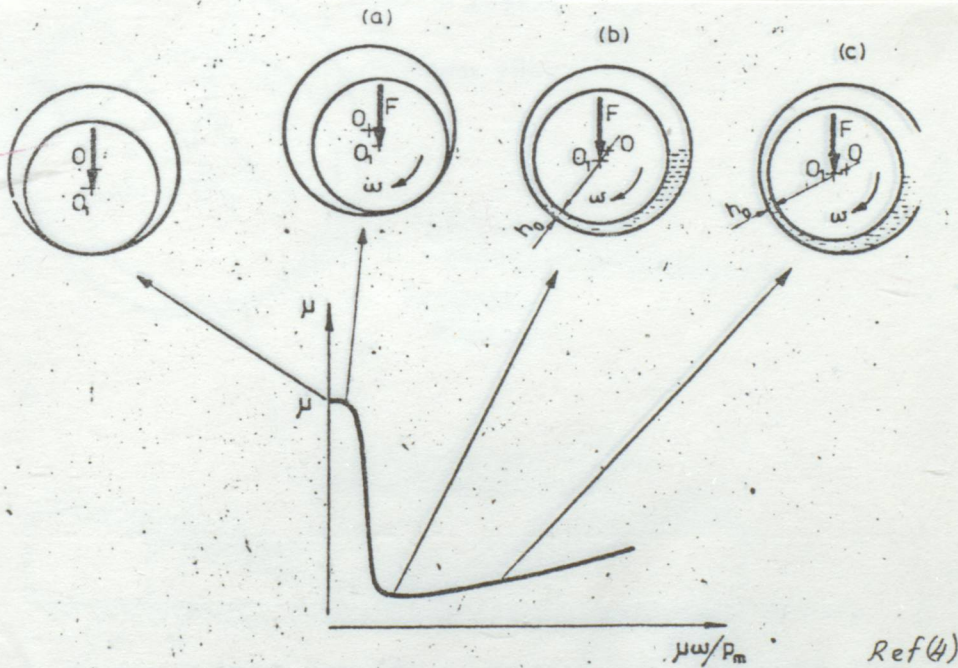
olarak bulunur. Bunun yanısıra yağ viskozitesinin sabit olduğu kabul edilirse, hidrodinamik sıvı sürtünmenin genel denklemi :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6.U.\eta. \frac{\partial h}{\partial x}$$

şeklinde basit bir hal alır ve Reynolds denklemi adını alır. Bu bağıntı ilk kez 1886 yılında Reynolds tarafından kurulmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu elde edilen denklemler, genelleştirilmiş Reynolds ifadeleridir.

Şimdiye kadar yukarıdaki denklemler matematiksel olarak tam çözülememiştir. Ancak viskozitenin sabit olduğu kabulü ile elde edilen denklem için tatminkar pratik çözümler vardır. Bu denklemde görüldüğü gibi, basıncın oluşabilmesi, denklemin sağ tarafındaki terimde bulunan (U) izafi hızına ve $(\partial h / \partial x)$ e yani, yağ tabakası kalınlığının x yönünde (hareket yönünde) küçülmesine bağlıdır. Genellikle tel çekme ve ekstrüzyonda matris sabit olduğu için, izafi hız koşulu kendiliğinden sağlanır.

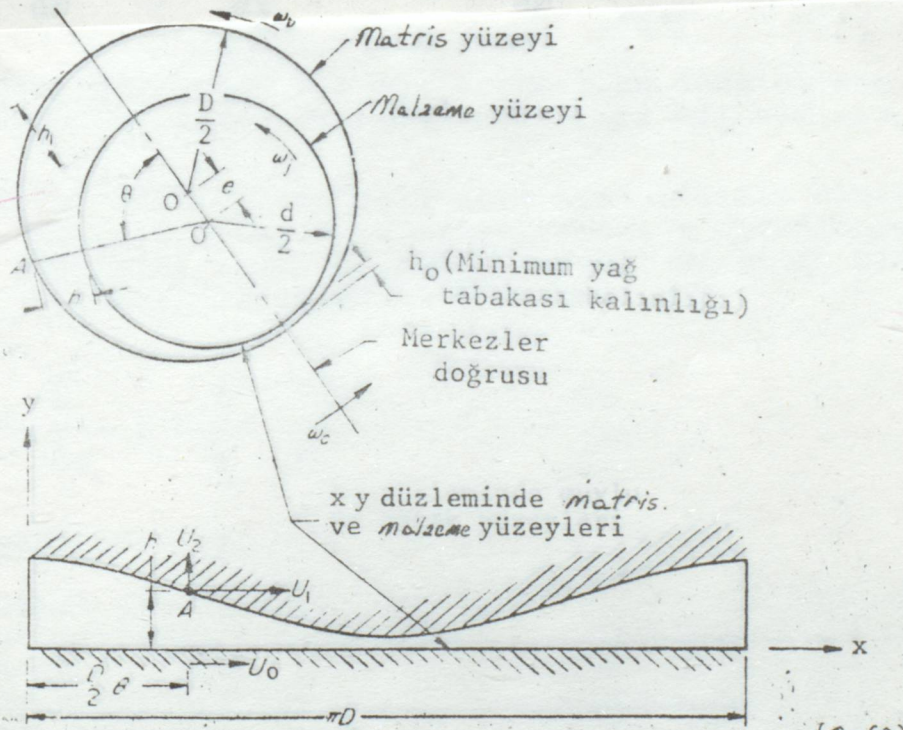
Plastik şekillendirme proseslerindeki yağlama olayını, radyal kaymalı yataklardaki yağlama olaylarına benzetebiliriz. Tel çekmede sıvı sürtünmenin oluşması için, malzeme ile matris arasında bir boşluk mevcuttur. Yağ viskozitesi η , hız n , veya açısal hız ω olmak üzere, tel çekmede çekilen malzeme- de dönme oluşmadığından, hız doğrudan doğruya tel çekme hızıdır. Ortalama basınç P_m ile gösterilmek üzere, sıvı sürtünmesi, Striebeck⁴ sayısı adı verilen $(\eta \cdot n / P_m)$ parametresine bağlıdır. Sürtünme katsayısı μ nün, $\eta \cdot n / P_m$ ye göre değişimi, şekil(31) de gösterilmiştir.



Şekil(31). Sürtünme katsayısının değişimi. Ref(4)

Sükunet halinde yüzeyler doğrudan doğruya temasta olduğundan hareket başlangıcında çok kısa bir süre için yüzeyler arasında kuru sürtünme görülür. Malzeme matris içinde belirli bir hıza ulaştığında, hareket nedeniyle yağ yüzeyler arasında yayıldığında sınır sürtünmesi meydana gelir. Sürtünme katsayısı azalmaya başlar. $(\eta \cdot n / P_m)$ parametresinin belirli bir değerden itibaren büyümesiyle sıvı sürtünmesi bölgesine girilir. Böylece yağ içinde oluşan basınç, yüzeyleri birbirinden tamamen ayırmış ve sıvı sürtünmesi halini yaratmıştır.

Sıvı sürtünmesi bölgesinde matris merkezi ile tel merkezi arasındaki eksantriklik $(\eta \cdot n / P_m)$ parametresine bağlıdır. Hız arttıkça eksantriklik değişmektedir. Bu olay haddelendirme dede aynıdır, birbirine ters istikamette dönen merdaneler arasındaki boşluktan geçen malzemenin simetri merkezi, alt ve üst merdanelerin eksenlerinden farklı mesafededir, bu durum eksantrikliği oluşturur. Çekilen malzemenin yörüngesi yaklaşık bir yarım dairedir, çekme hızı $n = \infty$ da matris merkezi ile çakışır. Matris içindeki yağ filmi kalınlığı, matris çapına göre o kadar incedir ki film açılabilir (yırtilabilir). Matrisin yani matris ve yatak yüzeylerinin açılmış şekli şekil (32) de görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi, daralan bir yağ filmi oluşmaktadır. Bu nedenle hidrodinamik yağlamanın incelenmesinde, daralan bir yağ tabakası örnek olarak alınmaktadır.



Şekil(32). Yatak yüzeylerinin açılmış şekli

(Ref3)

Tel çekmede, $x=r\theta$ ve $dx=r.d\theta$ olup bu değerlerin hidrodinamik sıvı sürtünmenin genel denkleminde yerine konulması ile:

$$\frac{\partial}{r^2 \cdot d\theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{dz} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{dh}{d\theta}$$

yazılır. Burada r çekilen telin çapıdır. Bu denklemin iki özel hali vardır.

1-Teorik bakımdan genişliği fazla olan yağlama pozisyonlarında, hareket yönüne dik doğrultudaki yağ debisi ihmal edilebilir ve z doğrultusundaki basıncın değişmediği yani $\partial p / \partial z = 0$ olduğu kabul edilirse,

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{dh}{dx}$$

$$\frac{d}{d\theta} \left(h^3 \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{dh}{d\theta}$$

şeklinde basit bir hal arzeder. Bu denklemlere tek boyutlu Reynolds diferansiyel denklemleri adı verilir.

2-Çok dar yağlama bölgeleri için geçerli olmak üzere örneğin tel çekmede ve ekstrüzyonda x doğrultusundaki basınç değişimi ihmal edilebilir. Yani $\partial p / \partial x = 0$ olduğu kabul edilir. Böylece genel denklem:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx}$$

şeklini alır.

Genel plastik şekillendirme olaylarında yağlama bölgeleri ne çok geniş nede çok dardır. Yağ tabakasının basıncı x ve z doğrultularına göre değişmektedir. Yani $P(x, z)$ şeklindedir denklemlerin tam bir çözümü olmamakla beraber analitik ve sayısal olmak üzere iki hesap yolu mevcuttur.

-Analitik hesap yolunda çeşitli çözüm tarzlarına rağmen basınç: $P(x, z) = F(x, z), P_{\infty}(x)$ veya $P(x, z) = P_{\infty}(x) + Q(x, z)$ fonksiyonu olarak alınmaktadır. Burada $P_{\infty}(x)$ genişliği faz-

la olan yağlama bölgelerinde, $F(x,z)$, x ve z doğrultusunda basıncın değişimini gösteren faktör, $Q(x,z)$ ise geneldenk-
lemin homojen kısmının çözümüdür.

-Sayısal hesap yolunda ise, denklemler sayısal verilerden ve bilgisayarlardan faydalanılarak çözülür. Hesap tarzları her bir plastik şekillendirme prosesi için tekrar ele alınacaktır.

Hidrodinamik yağlamanın mevcut olduğu durumlarda hesaplanması gereken ana büyüklükler şunlardır.

-Minumum yağ tabakası kalınlığı h_0 : minumum yağ tabakası kalınlığının $h_0 > R_{t1} + R_{t2}$ şeklinde olması gerekir. Burada R_{t1} ve R_{t2} , temas eden yüzeylerin maksimum pürüzlülüğüdür.

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2}.$$

-Yük taşıma kabiliyeti.

-Sürtünme kuvveti veya sürtünme katsayısı.

-Yağ debisi.

-Sıcaklık.

Çözümler için önce $P(x,z)$ basınç yayılımı elde edilir. Bu basınç yayılımı esas alınarak diğer faktörler hesaplanır.

Yağ debisi:

Sıvı sürtünmesini elde etmek için gönderilmesi gereken yağ miktarının sağlanmasında, oluşacak sıcaklığın belirlenmesinde önem taşır. Diğer bir hesap tarzı olarak x ve z doğrultularında herhangi bir birim genişlikteki kesitten geçen yağ miktarı.

$$q_x = \int_0^h u \cdot dy. \text{ ve } q_z = \int_0^h w \cdot dy. \text{ olarak yazılır.}$$

$$q_x = \int_0^h \left(-\frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \frac{h-y}{y} \cdot U \right) dy.$$

$$q_z = \int_0^h \left(\frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h) \right) dy.$$

integre edilirse.

$$q_x = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{h}{2} U.$$

$$q_z = - \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z}$$

buradaki u hızı, tel çekmede ve ekstrüzyonda doğrudan çekme hızı, haddelemede ise malzeme hızı ile merdane çevre hızları arasındaki izafi hızdır.

İzafi kaymadan ötürü birim zaman süresinde herhangi bir birim genişlikteki kesitten geçen sıvı miktarı G_1 ,

$$G_1 = \int_0^h u \cdot dy = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h (y^2 - h \cdot y) dy - \int_0^h \frac{U}{h} (h - y) dy.$$

$$= - \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U \cdot h}{2} \right)$$

olarak hesaplanır. Bu miktarın x e tabi olmayıp sabit olması gerekir.

$G_1 = -U \cdot h^*/2$ şeklinde gösterilirse, denklemden basınç gradyanı (dp/dx) hesaplanacak olursa, şu önemli bağıntı elde edilir;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{6\eta \cdot U}{h^3} (h - h^*) = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \left(\frac{h^*}{h^3} - \frac{1}{h^2} \right)$$

Bu ifadeden görüldüğü gibi h^* , $\partial p / \partial x$ in sıfır olduğu, yani p basıncının maksimum olduğu yerdeki yağ filmi kalınlığıdır. Bu bağıntıdan elde edilen $\partial p / \partial x$ denklemi,

$$U = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (y^2 - h \cdot y) - u \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

denkleminde yerine konursa,

$$- U = \frac{3u}{h^2} \left(1 - \frac{h^*}{h} \right) (y^2 - h \cdot y) + u \left(1 - \frac{y}{h} \right)$$

ifadesi elde edilir. $h = h^*$ için

$$U = u \left(1 - \frac{y}{h^*} \right)$$

bulunur. Şu halde h^* kesitinde hız değişkenliği doğrusaldır.

Film şekli biliniyorsa yani $h=f(x)$ verilmiş ise, o takdirde genel denklemin iki defa integrasyonu sonucunda,

$$P_x = \int_0^x \frac{6n \cdot U}{h^3} (h^* - h) dx.$$

ve kaldırma kuvveti,

$$P_l = \int_0^a P_x \cdot dx.$$

ifadeleri elde edilir.

Düzlem yüzeyi kaydırmak için bu yüzeye tesir eden kayma gerilmelerini yenecek bir kuvvetin tatbiki gerekir. Kayma yüzeyinin birim genişliğine tatbiki gereken kuvvet,

$$R_l = \int \tau_o \cdot dx.$$

den ibarettir. Newton kanununa göre yağ tabakasında oluşan kayma gerilmeleri:

$$\tau_x = \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \tau_z = \eta \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

şeklinde dir. Yüzeylerden birinin sabit diğerinin hareketli olduğu düşünülerek,

$$U = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \frac{h-y}{h} u_1 + \frac{y}{h} u_2$$

$$W = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h)$$

elde edilir, bu denklemlerin türevleri,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (2y - h) - \frac{u}{h}.$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z} (2y - h).$$

şeklinde olup, kayma gerilmeleri,

$$\tau_x = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} (2y - h) - \eta \cdot \frac{u}{h}.$$

$$\tau_z = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} (2y - h).$$

olarak bulunur. Bu ifadelerden görüldüğü üzere kayma gerilmeleri farklı olduğundan sürtünme kuvvetleri de farklıdır. τ_z bileşeni hareket yönüne dik doğrultuda olduğundan sürtünme hesabında göz önüne alınmaz.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} (2y - h) + \frac{u}{h} \eta.$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6 \cdot \eta \cdot u \cdot \left(\frac{h^*}{h^3} - \frac{1}{h^2} \right).$$

bağıntısı gözönüne alınırsa,

$$y=0 \text{ için, } \tau = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u}{h} \eta = \eta \cdot u \cdot \left(\frac{4}{h} - 3 \frac{h^*}{h^2} \right)$$

ifadesi elde edilir. Herhangi bir film tabakasındaki sürtünme kuvveti,

$$R = \int_0^a \left(\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} (2y - h) + \frac{u}{h} \eta \right) dx.$$

ifadesi ile verilir.

$$\tau_h = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u}{h} \eta = \eta \cdot u \cdot \left(\frac{3 \cdot h^*}{h^2} - \frac{2}{h} \right).$$

ile τ_0 arasındaki fark ($h \cdot dp/dx$) den ibarettir.

Giriş ve çıkış yerlerinde yağın bir üst basınca sahip olmadığı (yani devre ile basınç farkının sıfır olduğu) hal-lerde sürtünme kuvvetleri arasındaki fark,

$$R_h - R_0 = \int_0^a h \cdot \frac{dp}{dx} dx = \left[h \cdot p \right]_0^a - \int_{h_0}^{h_1} p \cdot dh.$$

olarak bulunur. Bu da P kuvvetinin kayma doğrultusundaki bileşenine aittir.

Şu halde kayma kuvveti R nin $y=h$ ve $y=0$ için aldığı değerler aynı büyüklüktedir. Burada toplam tepki kuvvetini kayma gerilmelerinden hesaplanan $\left(\int_0^a \tau_h \cdot dx \right)$ kısmından ayırd etmek gerekir.

Katı cisimler arasındaki izafi hareketlerde olduğu gibi burada da sürtünme katsayısı μ , kaydırma kuvvetinin normal yüke oranı şeklinde tarif edilir. $\mu = R/P_1$.

Newton hipotezine göre kayma gerilmeleri ve buna bağlı olarak sürtünme kuvveti R, P basıncına tabi olmadığından küçük yüklerde sürtünme katsayısı μ çok büyük değerler alabilir. Bu değer yağlanmamış yüzeylerdeki sürtünmenin birkaç katı olabilir.

Gerek $y=0$ ve gerekse $y=h$ için, yağlama aralığındaki toplam sürtünme kuvveti,

$$R_{st} = \int_0^a \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} h - \eta \cdot \frac{u}{h} \right) dx \cdot dz.$$

ve buna bağlı olarak, sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{R_{st}}{R}.$$

dir. Sıvı sürtünmesinde sürtünme katsayısı bir karşılaştırma değeri olarak önemlidir. Bunun yerine doğrudan doğruya sürtünme kuvvetinin kullanılması maksada daha uygundur.

Paralel kayma yüzeylerinde ($h = \text{sabit}$) olup,

$$P_x = \int_0^x \frac{6 \cdot \eta \cdot u}{h^3} (h^* - h) dx.$$

denkleminin integrasyonunda, viskozitenin x e tabi olmadığı kabul edilirse, o takdirde:

$$P_x = \frac{6.\eta.u.x.}{h^3} (h - h^*) + C.$$

ifadesi elde edilir.

Viskozitenin değişimi daha sonra incelenecektir. P_x denkleminde görüldüğü gibi x e doğrusal olarak bağımlıdır. Basınç doğrusal bir değişkenlik gösterir. $X=0$ yerinde, yağ üst basınçsız olarak akıyorsa, o takdirde $C=0$ olur.

$$x=a \text{ için } P_a = \frac{6.\eta.u.a}{h^2} \left(\frac{h^*}{h} - 1 \right)$$

ifadesi yazılır. Ancak P_a pozitif ise yani yağ bir üst basınçla ve $h^* > h$ olacak miktarda sevk edildiği takdirde paralel yüzeyler yük kaldırma kabiliyetine sahiptir.

Gerçekten h^* film aralığından geçen yağ miktarına bir ölçüdür. P_a basıncı bir pompa yardımı ile sağlanır ve herhangi bir değeri alabilir. P_a verildiği takdirde denklemden h^*/h tayin edilir. Bu takdirde birim genişlikteki yağ filminin yük kaldırma kabiliyeti:

$$P = \int_{\phi_1 - a/2}^{\phi_2 + a/2} P(\phi, z) r.d\phi.dz.$$

denklemden bulunur.

a -Yağlama bölgesi genişliği.

ϕ_1 ve ϕ_2 -Yağ tabakasının başlangıç ve sonunu belirten açıların radyan cinsinden değeridir.

$$P = \frac{P_a.a.}{2} = \frac{3.\eta.u.a^2}{h^2} \left(\frac{h^*}{h} - 1 \right)$$

ifadesi ile verilir.

Yağlama konusunun teorik incelenmesinde yapılan ilk kabullerden biri, sürtünmeyi azaltmak amacıyla iki yüzey arasında bulunan yağ tabakasında laminar bir akış olduğu idi. Burada akımın laminar olması gerektiğinin ispatını yapacağız.

$U=0$ olması halinde, sabit kalınlıktaki bir yağ tabakasındaki hız dağılışı,

$$V = \frac{\Delta P}{2.\eta.} (y^2 - h.y)$$

olup, birim genişlikten akan sıvı miktarı da:

$$G_1 = \frac{h^3}{12\eta} \frac{\Delta P}{L}$$

olarak bulunmuştur. Örnek olarak tel çekmede, genişliği $(\pi \cdot d_m)$ olan halka şeklinde bir bölgede,

$$G = \frac{h^3}{12\eta} \frac{\Delta P}{L} \cdot \pi \cdot d_m$$

olur. Ortalama akım hızı V_m böylece:

$$V_m = \frac{G}{\pi \cdot d_m \cdot h} = \frac{h^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot \Delta P$$

olarak hesaplanır. Basınç kaybı ise,

$$\Delta P = \frac{12 \cdot \eta \cdot V_m \cdot L}{h^3}$$

olur, bu sonuca göre eşdeğer çap:

$$d_{es} = \frac{4 \cdot F}{U} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_m \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot d_m} = 2 \cdot h$$

bulunur. Bu değerlere göre laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş Reynolds sayısının kritik değerinde yani,

$$R_{ek} = \frac{V \cdot 2h}{\nu} = 2300$$

olması halinde meydana gelir.

$$h = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$$

$$\gamma = 950 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta = 0,002 \text{ kg.s/m}^2$$

değerlerine sahip bir yağ filmindeki akımda kritik hız: V_k .

$$2300 = \frac{V_k \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 950}{9,81 \cdot 0,002}$$

denklemden $V_k = 240$ m/s olarak hesaplanır. Bu sonuçtan görüleceği üzere, yağlama olaylarında film aralığındaki akım, pratikte rastlanan bütün kayma hızlarında laminardır.

Sıcaklık.

Yağ tabakasında sürtünmeden dolayı meydana gelen ısı, dışarıya akan yağ ve yağ ile temasta olan yüzeyler yardımıyla çevreye iletilmektedir. Sürtünme ile üretilen ısı, çevreye iletilen ısıya eşit olduğu takdirde, ısı denge denklemi genel olarak :

$$E_s = E_y + E_g$$

veya,

$$\mu \cdot R \cdot U = C_o \cdot \gamma \cdot q \cdot (t_g - t_\phi) + K \cdot A \cdot (t - t_o)$$

Burada, $E_s = \mu \cdot R \cdot U$: Sürtünme ile üretilen ısı.

$E_y = C_o \cdot \gamma \cdot q \cdot (t_g - t_\phi)$: Yağlayıcı madde tarafından çevreye iletilen ısı.

$E_g = K \cdot A \cdot (t - t_o)$: Yağla temasta olan yüzeyler tarafından çevreye iletilen ısı.

C_o : Yağın özgül ısısı. (kcal/m.h. °C)

γ : Yağın özgül ağırlığı. (kg/m³)

q : Dışarıya akan yağ miktarı. (kcal/m².h. °C)

K : Toplam ısı iletim katsayısı.

A : Şekillendirme prosesinin çevre ile temasta olan dış yüzeyi. (m²)

t_ϕ : Yağın çıkış sıcaklığı. (°C)

t_g : Yağın giriş sıcaklığı. (°C)

t : Yağ tabakasının ortalama sıcaklığı. (°C)

t_o : Çevre sıcaklığı. (°C)

Yağlayıcı madde tarafından çevreye iletilen ısıнын önemli olması halinde, yağ tabakasındaki sıcaklık artışı.

$$\Delta t = \frac{\mu.F.U.}{C_o.\gamma.q.}$$

bulunur.

Yağla temasta olan yüzeyler boyunca iletilen ısıнын önemli olması halinde,

$$\mu.F.U = K.A.(t - t_o)$$

yazılır, buna göre sıcaklık.

$$t = \frac{\mu.F.U.}{K.A.} + t_o.$$

olarak bulunur. Bu sıcaklıkların belirlenmesi, yağın viskozitesi ve buna bağlı olarak hidrodynamic yağlama olayının oluşması yönünden çok önemlidir.

Gövde tarafından çevreye iletilen ısı E_g hesaplanırken,

$$E_g = K.A. T. \quad (\text{Kcal/h}),$$

K, toplam ısı iletim sayısı hesaplanırken, ısı veriminde rol oynayan bütün olaylar (radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyon) dikkate alınmalıdır.

Olayın bir başka incelenişi de, sıvıdaki ısı dağılımının belirlenmesinde kullanılan matematiksel bağıntıların enerji korunumundan hareket edilerek çıkarılmasıyla olmuştur.

$$\oint \frac{dE}{dt} = J \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right)$$

$$- P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \psi.$$

k: Isı iletim katsayısı. ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)

J: Isının mekanik eşdeğeri.

ψ : Enerjinin dağılım fonksiyonu.

$$\varphi = \eta \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{4}{3} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \right].$$

Bu geometrik sonuçlar, konveksiyon terimlerinin yağlama analizindeki enerji eşitliğinde dikkate alınması gerektiğini ortaya çıkarır.

Film yüzeyi boyunca kontrol edilen ısı oranı ve temas yüzeylerinin oranları karşılaştırıldığında, viskoz akım durumunda en önemli terimler, y yönünde, u ve w değişkenlerini içeren terimlerdir. Böylece yağlama için indirgenmiş enerji eşitliği şu hale gelir.

$$J \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \eta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] = 0.$$

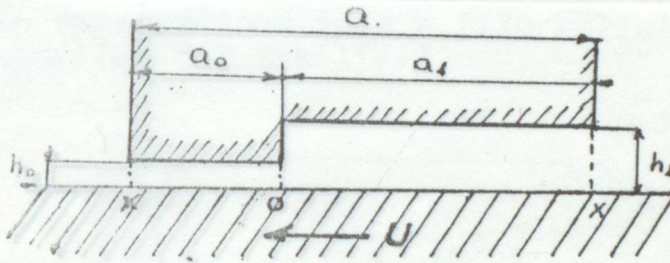
Yağ sıkıştırılamayan bir sıvı olduğuna göre, adyabatik sıkışabilirlik sıfırdır, yağlama problemlerinde φ sabit kabul edilebilir. Yapılan bu iki kabul sonucu enerji eşitliği şu basit hali alır.

$$J \cdot k \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \eta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] = 0$$

Bu eşitlikten elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar arasında, akışkanın viskoz hareketiyle oluşan ısı üretim oranı ve ısı kondüksiyonu arasında bir uygunluk vardır. Isıl enerji eşitliklerinin teorik analizlerde kullanılmasını daha sonra detaylı bir biçimde inceleyeceğiz.

3.6.YÜK KALDIRMAYA ELVERİŞLİ YAĞ FILMİ.

Yük kaldırmaya elverişli bir film tabakası oluşturmak için birçok yol mevcuttur. Bu yollardan biri: temas yüzeyleri arasına bir pompa yardımıyla basınçlı yağ sevkedilmesidir. Yük kaldırmaya elverişli bir yağ tabakası daha basit yollardan elde edilebildiği için bu maksat için özel bir pompa kullanılmaktan vazgeçilmiş, bunun yerine özel dizaynlar geliştirilmiştir. Gerçekten: paralel kayma yüzeylerinde kesit $x=0$ noktasında kısmen kapatılacak olsa, o takdirde yağın üst basınçsız olarak aktığı bağıntıda, Şekil (40).



Şekil(33). Kısmen kapatılmış, daraltılmış film tabakası.
Ref(3).

$$P_a = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{h^2} \left(\frac{h^*}{h} - 1 \right)$$

U pozitif alınarak,

$$P_0 = \frac{6 \cdot \eta \cdot u \cdot a_1}{h^2} \left(1 - \frac{h^*}{h} \right) \text{ ve}$$

$$P_x = P_0 \left(1 - \frac{x}{a_1} \right).$$

$$h/h^* = f(x/a).$$

denklemler geçerlidir. Bu değer yerine konursa,

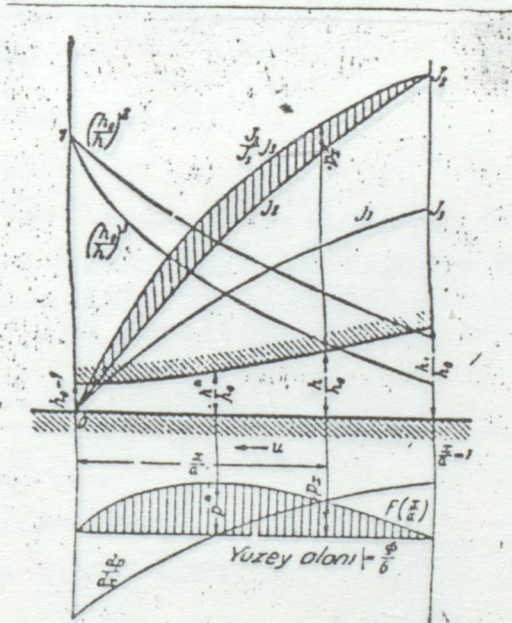
sonucu elde edilir. Formülden de görüleceği gibi h değerinin ancak küçük değerleri için P_0 büyük değerler alabilir. Örnek olarak: $\eta = 0,001 \text{ kg.s./m}^2$. $U = 1 \text{ m/s}$. $a_1 = 0,1 \text{ m}$. $h^*/h = 1/3$. $h = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$, değerleri için: $P_0 = 4 \text{ atm}$. olduğu halde, $h = 0,01 \text{ mm}$ için $P_0 = 400 \text{ atm}$, değeri elde edilir.

Bu düşüncelerden elde edilen ortak sonuç, kalınlığı hareket doğrultusunda azalan her yağ filmi, yük kaldıracı bir yağ tabakası teşkiline elverişlidir.

Basıncı X eksenı boyunca değişimini inceleyen,

$$\frac{dP}{dx} = - \frac{6\eta U}{h^3} (h - h^*) \quad (3.6.4)$$

denklemin integrasyonu için h film kalınlığının bilinmesi gerekir. $h = f(x)$ dir. Şekil(34).



Şekil(34).Grafik integrasyon. (Ref 3)

Film şekli ve a değeri değiştikçe integrasyondan P , yük kabiliyeti ve T , kaydırma kuvveti için değişik değerler elde edilir. Dolayısıyla sürtünme katsayısı da değişir. Kayma yüzeyinin mutlak büyüklüğüne tabi olmayan genel bağıntılar elde etmek için hesaba boyutsuz büyüklükler sokulur. En dar yerde film kalınlığı h_0 , kayma yüzeyinin uzunluğu a ile gösterilmek üzere, bütün geometrik benzer filimler için,

$$h/h_0 = f(x/a).$$

denklemini geçerlidir. Bu değer yerine konursa,

$$dP = \frac{6\eta U a}{h_0^2} \left[\frac{h^*}{h_0} \cdot \frac{1}{f^3(x/a)} - \frac{1}{f^2(x/a)} \right] \cdot d(x/a).$$

formülü elde edilir. Grafik yoldan (planimetre usulü ile) bu denklemin integrasyonu daima yapılabilir. Basit film şekillerinde analitik yoldan da integrasyon mümkündür. Filmin en dar yeri ki bu aynı zamanda kayma yüzeyinin sonuna rastlar. Çeşitli integrasyonların sonuçları, aşağıdaki semboller ile gösterilmiştir.

$$J_1(x/a) = \int_0^{x/a} \frac{d(x/a)}{f(x/a)} = J_1, \quad J_2 = \int_0^{x/a} \frac{d(x/a)}{f^2(x/a)}.$$

$$J_3 = \int_0^{x/a} \frac{d(x/a)}{f^3(x/a)}.$$

$$J_1 = \int_0^1 \frac{d(x/a)}{f(x/a)} = J_1(x/a=1) = J_1(1).$$

$$J_2 = \int_0^1 \frac{d(x/a)}{f^2(x/a)} = J_2(1).$$

$$J_3 = \int_0^1 \frac{d(x/a)}{f^3(x/a)} = J_3(1).$$

$h/h_0 = f(x/a)$ şeklinde verilmiş olan bir film şeklinde J_1, J_2, J_3 sembolleri yalnız x/a ya tabidir. Halbuki J_1, J_2 ve J_3 sembolleri yalnız film şekline bağlı olan boyutsuz sayılardır. Bu semboller ile yazılmak üzere ifade:

$$P_x = \frac{6\eta U a}{h_0^2} \left[\frac{h^*}{h_0} J_3(x/a) - J_2(x/a) - C_0 \right]. \quad (3.6.5)$$

şeklini alır. Henüz bilinmeyen C_0 ve h^*/h_0 sabiteleri, sınır şartlarından tayin edilir:

a) $x/a=0$ için $P_0 = 0$ ve $x/a=1$ için de $P_1 = 0$ olması halinde, yani yağ bir üst basınç olmaksızın film aralığına girebilir veya bu aralıktan dışarıya akabilirse, o takdirde:

$$C_0 = 0 \text{ ve } h^*/h_0 = J_2/J_3.$$

bulunur.

b) $x/a=0$ için $P_0 = 0$ ve $x/a=1$ için ise $P_1 \neq 0$ olması halinde (yani yağ bir basınç ile sevk ediliyorsa) $C_0 = 0$ olup,

$$P_1 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} \left(\frac{h^*}{h_0} J_3 - J_2 \right).$$

yazılırsa, bundanda:

$$\frac{h^*}{h_0} = \frac{J_2 + p_1 \cdot h_0^2 / 6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{J_3} \quad (3.6.6)$$

bulunur .

c) $x/a=0$ için $p_0 \neq 0$ ve $x/a=1$ için $p_1=0$ olması halinde (yani yağın üst basınç ile çıkması halinde):

$$C_0 = \frac{h^*}{h_0} J_3 - J_2 \text{ ve } P_0 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} \left(J_2 - \frac{h^*}{h_0} J_3 \right).$$

olup bundanda;

$$\frac{h^*}{h_0} = \frac{J_2 - P_0 \cdot h_0^2 / 6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{J_3}$$

yazılır.

Birim genişliktaki filmin yük kabiliyeti:

Filim şekli verildiği takdirde ifade yalnız x/a ve sınır şartlarına tabidir, yani.

$$P_x = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} F\left(\frac{x}{a}\right).$$

yazılır.

$$P_i = \int_0^1 p_x \cdot dx = a \int_0^1 p_x \cdot d(x/a) = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a^2}{h_0^2} \int_0^1 F(x/a) \cdot d(x/a)$$

$$P_1 = \eta \cdot \frac{U \cdot a^2}{h_0^2} \phi \quad (3.6.7)$$

olarak yazılır. Burada ϕ sembolü $\phi = 6 \int_0^1 F(x/a) \cdot d(x/a)$.

şeklinde ifade edilip yalnız yağ filminin şekline bağlı

boyutsuz bir sayıdır. Bağlıntıdan h/a hesaplandığı takdirde, en küçük yağ tabakası kalınlığı için:

$$h_0 = a\sqrt{\phi} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}}$$

bağıntısı bulunur.

Kaydırma için gerekli kuvvet.

$$R_1 = a \int_0^1 \tau_s d(x/a) = \eta \cdot U \cdot a \cdot \int_0^1 \left(\frac{4}{h} - 3 \frac{h^*}{h^2} \right) \cdot d(x/a).$$

$$R_1 = \frac{\eta \cdot U \cdot a}{h_0} \cdot \int_0^1 \left(\frac{4}{h/h_0} - 3 \frac{h^*/h_0}{(h/h_0)^2} \right) \cdot d(x/a).$$

$$R_1 = \frac{\eta \cdot U \cdot a}{h_0} \left\{ 4J_1 - 3 \frac{h^*}{h_0} J_2 \right\} = \frac{\eta \cdot U \cdot a}{h_0} \cdot v.$$

olarak hesaplanır .Burada v: yine yalnız film şekline bağlı boyutsuz bir sayıdır.Sürtünme katsayısı:

$$\mu = \frac{R_1}{P_1} = \frac{h_0}{a} \cdot \frac{v}{\phi} = C \cdot \frac{h_0}{a}.$$

bulunur. h_0/a nın değeri yerine konursa,

$$\mu = \frac{v}{\sqrt{\phi}} \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}} = K \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}}.$$

yazılır.

Hesaplamalarda kayma yüzeylerinin birbirinden yağ filmi ile tamamen ayrılmış olduğu kabul edilmektedir.Halbuki teknikte tüm yüzeyler pürüzlüdür.Onun içindirki filmin en dar yerindeki h_0 kalınlığı,daima pürüzler toplamından daha büyük olmalıdır.Basınç altında yağın kayma yüzeyleri arasından dışarıya atılmaması şartı,budenklem ile basit bir şekilde ifade edilmiş olur.

Denklemden görüldüğü gibi,sürtünme katsayısı h ile, yani yüzey pürüzlülükleri toplamıyla orantılı olduğundan temas yüzeylerinin düzgünlüğü en önemli faktördür. Sürtünme katsayısı için verilen,

$$\mu = C \cdot h_0/a = 0,00025.$$

değeri, teorik olarak elde edilebilecek sürtünme katsayısının büyüklüğünü gösterir.Teori,yağ kanallarıyla kesilmeyen sürekli kayma yüzeylerini esas almaktadır.Yine teoriden görüldüğü üzere basınç(yük) bölgesinde yağ kanalları açmak hiç de maksada uygun değildir.Yük bölgesinde birbirinden farklı basınçlara maruz iki nokta bir kanal ile birleştirildiği takdirde basınç dengelemesi meydana gelir. Bunun sonucunda kayma yüzeyinin yük kabiliyeti azalır. Keza aynı basınçtaki noktaların bir kanal ile birleştirilmesi(şu halde hareket doğrultusuna dik kanalların açılması) de zararlıdır.Görülüyorki asıl yük yüzeyinde kanal bulunması doğru değildir.Yağ esas itibariyle basınç olmayan yerlerden sevkedilmelidir.Bu yerlerde yağın tüm temas yüzeyine yayılmasını sağlamak üzere enine açılacak kanallar maksada uygundur.

Teorik incelemelerden anlaşılacağı üzere: sürtünme katsayısı bir geometrik miktardır, yalnız h_0/a ya ve film şekline bağlı olup sıvının cinsine ve kayma hızına tâbi değildir. Şu halde izafi durumları tamamen aynı olan iki katı cisim keyfi bir hızla birbirine nazarankaydırılırsa aradaki yağlayıcımadde ister koyu bir yağ olsun, isterse hava olsun sürtünme katsayısı aynı değeri alır. Ancak bu iki cismin birbirine nazaran izafi durumu, yani h_0/a oranı, tabiatıyla P_1, U ve η ya tâbidir. Formülleri kullanırken ϕ, v, K ve C sayılarının yalnız film şekline tâbi olmayıp, verilen sınır şartlarındaki bağılı olduğuna dikkat etmek gerekir.

3.6.1. EĞİK DÜZLEM TARZINDAKİ YAĞ TABAKASI.

Teorik analizi basitleştirmek için, incelemeler sonsuz genişlikte bir yağ tabakası üzerinde yapılacaktır. Şekil (35)

Basınç yayılımı.

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dP}{dx} \right) = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \frac{dh}{dx}$$

denklemini esas alınır ve integre edilirse.

$$\frac{dP}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \left(\frac{1}{h^2} - \frac{C}{h^3} \right) \quad (3.6.1.1)$$

ifadesi bulunur. burada C integrasyon sabitidir. Herhangi bir X değeri için yağ tabakasının kalınlığı,

$$h = h_1 - \frac{X}{B} (h_1 - h_2)$$

veya $a = h_1/h_2$ ve $X_1 = X/B$ değerleri ile,

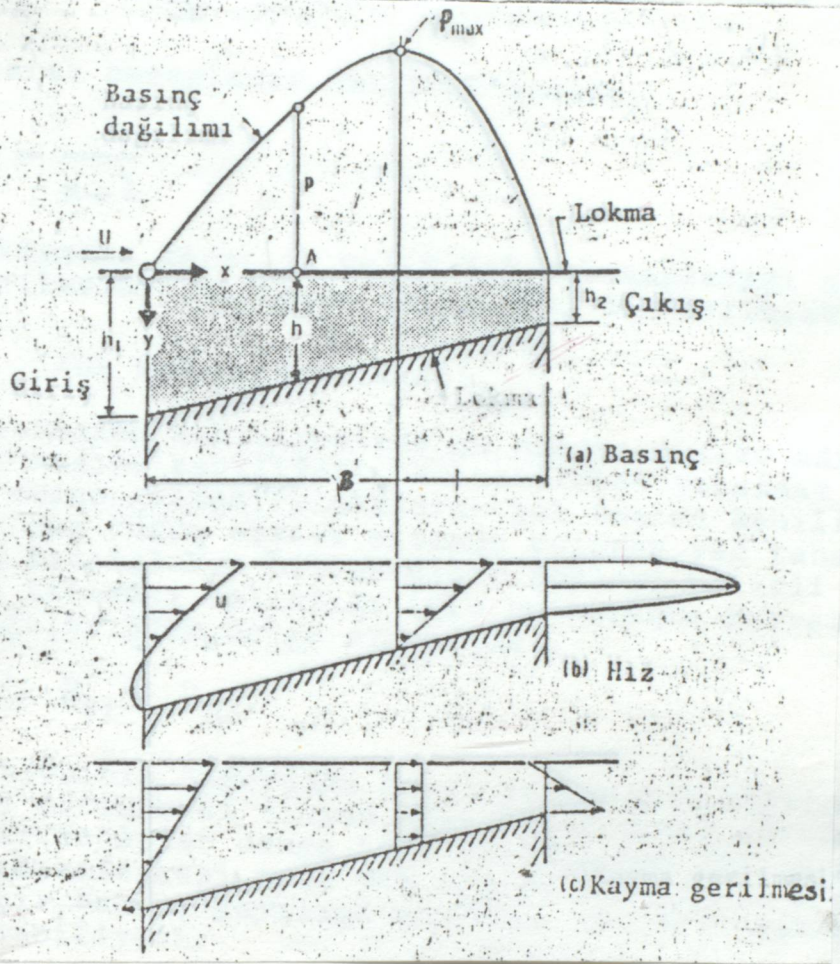
$$h = h_2(a - X_1 \cdot a + X_1)$$

şeklinde elde edilir. Bu değerler yerine konup integre edilirse ve ortaya çıkan integrasyon sabitleri $x = 0$ ve $X = B$ için $P = 0$ sınır şartlarıyla tayin edilirse, x doğrultusundaki basınç yayılımı:

$$P = \frac{\eta \cdot U \cdot B}{h_2^2} \cdot \frac{6(a-1)(1-X_1)X_1}{(a - aX_1 + X_1)^2} \quad (3.6.1.2)$$

maksimum basınç,

$$P_{\max} = \frac{\eta \cdot U \cdot B}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(a-1)}{a(a+1)} \quad (3.6.13)$$



Sekil(35).Eğik düzlem şeklindeki yağ tabakasında hız ve kayma gerilmeleri yayılımı.

veya,

$$C_F = \frac{6}{(a-1)^2} \left(\ln a - \frac{2(a-1)}{(a+1)} \right)$$

ifadesiyle,

$$P_L = \frac{\eta \cdot U \cdot B^2 \cdot L}{h_2^2} C_F \quad (3.6.14)$$

olarak bulunur. Boyutsuz olan bu denklem,

maksimum basınç,

$$P_{\max} = \frac{\eta \cdot U \cdot B}{h_2^2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(a-1)}{a(a+1)} \quad (3.6.13)$$

olarak hesaplanır. Maksimum basınç,

$$x_1 = \frac{a}{a+1}$$

noktasına karşılık gelir. Yağ tabakasındaki hız ve kayma gerilmeleri yayılımı şekil (35) de verilmiştir.

Yük taşıma kabiliyeti.

Yük taşıma kabiliyetinde şu hususa dikkat edilmesi gerekir. Yük taşıma kabiliyeti, taşınabilecek maksimum yük anlamına anlamına gelmez. Plakaların yük taşıma kabiliyeti, belirli bir dış yükün etkisi altında bulunan yağ tabakasında oluşan basınçların bileşkesidir. Şöyle ki, belirli bir h minimum yağ tabakası kalınlığı için bu bileşke kuvvet dış kuvveti dengeler. Eğer, denge sırasında,

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2}$$

denkleminin öngördüğü koşul yerine getirilirse hidrodinamik sıvı sürtünmesi oluşur, aksi halde sınır sürtünmesi meydana gelir. Hesaplar denge hali düşünülerek yapıldığından, basınçların bileşkesi yani yük taşıma kabiliyeti P ile gösterilmiştir. Basınç yayılımı gözönüne alındığı takdirde yük taşıma kabiliyeti:

$$P_1 = \int_0^B P \cdot dx = \eta \cdot \frac{U \cdot B^2 \cdot L}{h_2^2} \cdot \frac{6}{(a-1)^2} \left(\ln a - \frac{2(a-1)}{(a+1)} \right)$$

veya,

$$C_F = \frac{6}{(a-1)^2} \left(\ln a - \frac{2(a-1)}{(a+1)} \right)$$

ifadesiyle,

$$P_1 = \frac{\eta \cdot U \cdot B^2 \cdot L}{h_2^2} \cdot C_F \quad (3.6.14)$$

olarak bulunur. Boyutsuz olan bu denklem,

$$\frac{F \cdot h_2^2}{\eta \cdot U \cdot B^2 \cdot L} = C_F$$

veya hareket doğrultusuna dik doğrultuda plakaların sonsuz geniş olduğu gözönüne alınarak, plakanın L genişliğine gelen kuvvet,

$$F = P_m \cdot B \cdot L$$

şeklinde ifade edilirse,

$$= \frac{P_m \cdot h_2^2}{\eta \cdot U \cdot B} \cdot C_F$$

şeklinde bulunur.

Plakaların birbirine göre eğimi,

$$m = \frac{h_1 - h_2}{B}$$

olarak ifade edilir ve h_1 h_2 değeri gözönüne alınır, minimum yağ tabakası kalınlığı,

$$h_2 = \frac{B \cdot m}{a - 1}$$

veya izafi minimum yağ tabakası kalınlığı denilen (δ) boyutsuz hali,

$$\delta = \frac{h_2}{B \cdot m} = \frac{1}{a - 1}$$

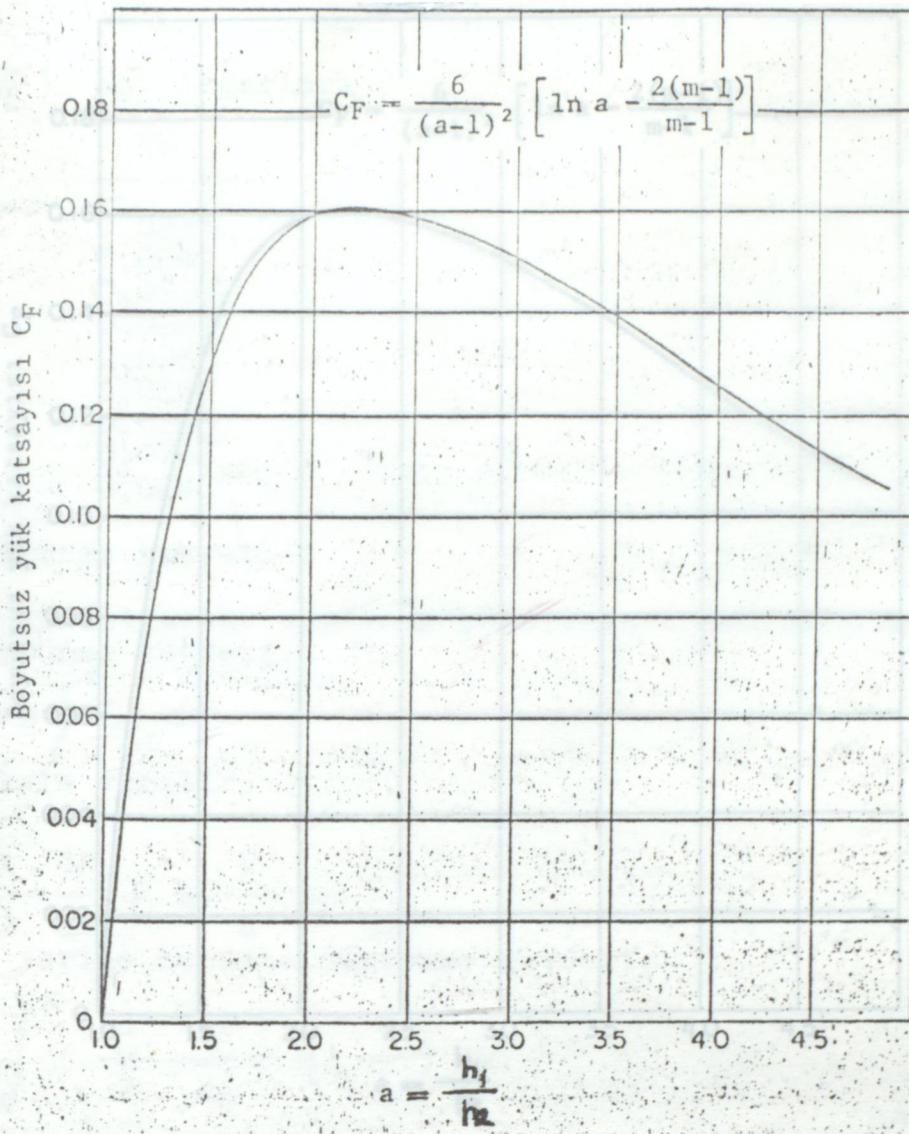
şeklinde yazılır. $h_2 = \delta \cdot B \cdot m$ değeri yerine konursa,

$$K_F = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{\eta \cdot U}{P_m \cdot B} = \frac{\delta^2}{C_F}$$

tarzında bulunur. Yük taşıma kabiliyetiyle ilgili olarak C_F sayısı $a = h_1/h_2$ değerine bağlı olarak şekil (43) de verilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum yük taşıma kabiliyeti $a = 2,2$ değerine karşılık gelir.

Yük taşıma kabiliyeti üzerine yapılan teorik incelemelere göre bazı araştırmacılar aşağıdaki bağıntıları çıkarmışlardır.

$$P_{ort} = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot B}{h_1^2} \times K_p \quad (3.6.1.5)$$



Şekil(36).Yük taşıma kabiliyeti ile ilgili C_F sayısının $a = h_1/h_2$ oranına bağlı değişimi. Ref(1)

$$P_1 = P_{ort} \cdot B.L.$$

$$P_1 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot B^2 \cdot L}{h_1^2} \cdot K_p.$$

$$h_1 = \sqrt{\frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot B}{P_{ort}} \cdot K_p}$$

bu bağıntılarda geçen K_p değeri aşağıdaki tablo(5) den m' değerine bağlı olarak alınabilir.

$$m' = \frac{h_2}{h_1} - 1.$$

Tablo(5) Kp değerleri.

m	Kp
0,6	0,0235
0,7	0,0247
0,8	0,0255
0,9	0,0261
1,0	0,0265
1,2	0,0267
1,4	0,0265
1,5	0,0263
2,0	0,0246

Sürtünme kuvveti .

Sonsuz genişlikteki sürtünme yüzeyinin L genişliğinde oluşan sürtünme kuvveti.

$$F_s = -L \int_0^B \tau_x \cdot dx.$$

ifadesiyle verilir.

$$\tau_x = - \left(\frac{h}{2} \frac{dP}{dx} + \eta \cdot \frac{U}{h} \right).$$

değeri yerine konursa. Sürtünme kuvveti:

$$F_s = +L \times \int_0^B \left(\frac{h}{2} \frac{dP}{dx} + \eta \cdot \frac{U}{h} \right) dx.$$

olarak verilir veya,

$$\frac{dP}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \left(\frac{1}{h^2} - \frac{C}{h^3} \right)$$

bağıntısı yardımıyla,

$$F_s = \frac{\eta \cdot U \cdot B \cdot L}{h^2} \times C_s$$

olarak yazılır. Burada C_s sembolü

$$C_s = \frac{4 \cdot \ln a}{a - 1} - \frac{6}{a + 1}.$$

şeklinde ifade edilir. Şu halde sürtünme katsayısı:

$$\mu = \frac{F_s}{F} = \frac{h_2}{B} \cdot \frac{C_s}{C_F} = \frac{m}{a - 1} \cdot \frac{C_s}{C_F}$$

Şekil(37). Parabolik yarım silindirik yekilindeki yağ tabakası.
R=(3)

veya,

$$K_s = \frac{\mu}{m} = \left(\frac{1}{a-1} \right) \cdot \frac{C_s}{C_F}$$

Burada, parabolün tepe noktasına ait yarıçapı göstermekte olarak bulunur. Ayrıca,

Debi.

Sonsuz genişlikteki sürtünme yüzeyinin L genişliğine karşılık gelen debi,

$$q_x = - \frac{h^3}{12 \eta} L \frac{dP}{dx} + \frac{h}{2} \cdot U \cdot L.$$

ifadesiyle verilir.

$$q_x = \left(\frac{a}{a+1} \right) \cdot h_2 \cdot U \cdot L.$$

veya,

$$h_2 = \delta \cdot B \cdot m. \quad C_q = \frac{a}{a+1}$$

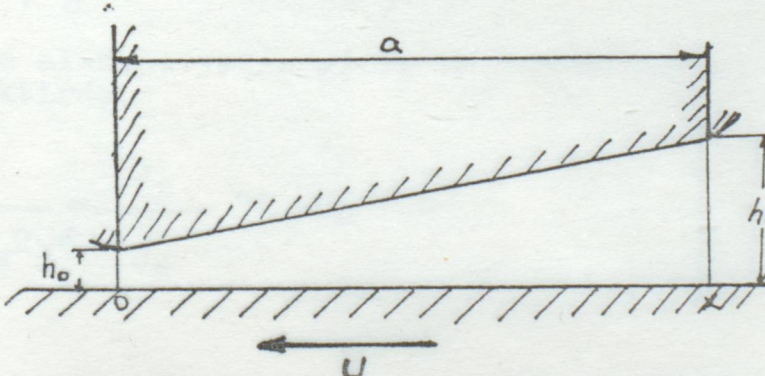
değerleriyle,

$q_x = B \cdot L \cdot U \cdot m \cdot \delta \cdot C_q$. Buradan, δ nın bir fonksiyonu olarak verilmektedir. δ yardımcı bir büyüklük olup kullanılışı, ve boyutsuz olarak, değildir. Bu bakımdan hesabın tekrar $\delta(x/a)$ ya göre transformasyonu gerekir. Çeşitli integrasyonların sonuçları şunlardır.

$$K_q = \frac{q_x}{B \cdot L \cdot U \cdot m} = \delta \cdot C_q.$$

şeklinde bulunur.

3.6.2. PARABOLİK YARIM SİLİNDİR ŞEKLİNDE YAĞ TABAKASI . 2



Şekil(37).Parabolik yarım silindirik şeklindeki yağ tabakası.
Ref(3)

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2f}, \quad \text{dolayısıyla,}$$

$$f(x/a) = h/h_0 = 1 + \left(\zeta \frac{x}{a}\right)^2$$

Burada f , parabolün tepe noktasına ait yarıçapı göstermekte olup kısaltmak amacıyla,

$$\zeta^2 = \frac{a^2}{2f h_0} \quad \text{yazılmıştır, burada } \zeta \cdot \frac{x}{a} = \operatorname{tg} \gamma, \text{ yazılırsa}$$

$$\zeta d\left(\frac{x}{a}\right) = \frac{d\gamma}{\cos^2 \gamma} \quad \text{olup böylece:}$$

$$h/h_0 = f(x/a) = 1 + \operatorname{tg}^2 \gamma = 1/\cos^2 \gamma.$$

bulunur, bu değerler ile:

$$\frac{dp}{d\gamma} = \frac{6\eta \cdot U \cdot a}{\zeta h_0^2} \left\{ \frac{\cos^4 \gamma}{\cos^2 \gamma} \cos^2 \gamma \right\}$$

yazılabilir. İfadenin integrasyonu:

$$p \cdot \gamma = \frac{6\eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} \left\{ \frac{J_3(\gamma)}{\cos^2 \gamma} - J_2(\gamma) - C_0 \right\}.$$

bağıntısını vermektedir. Burada γ nın bir fonksiyonu olarak verilmektedir γ yardımcı bir büyüklük olup kullanılışı, anlamı açık ve kolay değildir. Bu bakımdan hesabın tekrar $F(x/a)$ ya göre transformasyonu gerekir. Çeşitli integrasyonların sonuçları şunlardır.

$$J_1 = \int_0^\gamma \frac{d(x/a)}{h/h_0} = \frac{1}{\zeta} \int_0^\gamma d\gamma = \gamma/\zeta. \quad J_1 = \frac{1}{\zeta} \int_0^\gamma d\gamma = \gamma_1/\zeta.$$

$$J_2 = \frac{1}{\zeta} \int_0^\gamma \cos^2 \gamma \cdot d\gamma = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\gamma}{2} \right), \quad J_2 = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{\sin 2\gamma_1}{4} + \frac{\gamma_1}{2} \right).$$

$$J_3 = \frac{1}{\zeta} \int_0^\gamma \cos^4 \gamma \cdot d\gamma = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{1}{4} \sin \gamma \cdot \cos^3 \gamma + \frac{3}{16} \sin 2\gamma + \frac{3}{8} \gamma \right), \quad J_3 = J_3(\gamma).$$

Filim alanına yağın giriş ve çıkışında üst basınç sıfır ise 0 taktirde,

$$\frac{1}{\cos^2 \gamma} = \frac{J_2}{J_3} \quad \text{ve} \quad C_0 = 0.$$

$$F_a(\gamma) = \frac{J_3}{\cos^2 \gamma} - J_2.$$

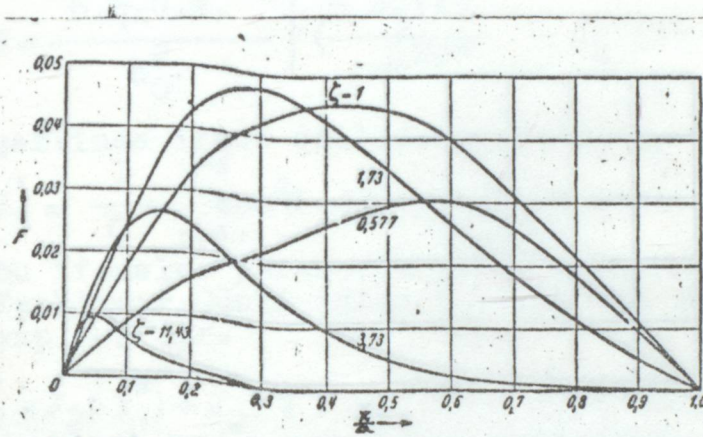
$$\phi_a = 6 \int_0^{\gamma_1} F(\gamma) \cdot d(x/a) = \frac{6}{\zeta^2} \left(\frac{A}{\cos^2 \gamma} - B \right)$$

bulunurki burada,

$$A = \zeta \int_0^{\gamma_1} \frac{J_3 \cdot d\gamma}{\cos^2 \gamma} = \frac{1}{8} \sin^2 \gamma_1 + \frac{3}{8} \gamma_1 \cdot \text{tg} \gamma_1.$$

$$B = \zeta \int_0^{\gamma_1} \frac{J_2 \cdot d\gamma}{\cos^2 \gamma} = \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot \text{tg} \gamma_1.$$

$$v = 4 J_1 - 3 J_2 / \cos^2 \gamma.$$



Sekil(38).Parabolik yarım silindirde basınç yayılımı.

Ref(3)

Cetvel(6).Parabolik yarım silindirde sürtünme hesaplarına

γ°	ζ	ϕ_a	v_a	$\sqrt{\phi_a}$	K_a	C_a
30	0,57735	0,1096	0,9264	0,330	2,80	8,45
45	1	0,1724	0,8657	0,415	2,09	5,02
50	1,192	0,1774	0,8451	0,421	2,01	4,76
55	1,428	0,1704	0,8219	0,413	1,99	4,82
60	1,732	0,1540	0,7887	0,392	2,01	5,12
65	2,145	0,1265	0,7426	0,326	2,09	5,87
70	2,747	0,0938	0,6980	0,306	2,28	7,44
75	3,732	0,0591	0,5881	0,243	2,42	9,96
80	5,671	0,0285	0,4332	0,169	2,57	15,3
85	11,430	0,0076	0,2440	0,087	2,80	32,2
90	-	0	0	0	π	∞

3.6.3. PARABOLİK TAM SİLİNDİR ŞEKLİNDE YAĞ TABAKASI.

Koordinat sisteminin sıfır noktası filmin en dar yerinde ($\gamma = 0$) olduğundan, bu defa $\gamma = 0$ için $p = 0$ olması şartı (sınır şartı) geçerli değildir. $\cos \gamma = \cos(-\gamma)$ olduğundan basınç yayılımı sıfır noktasına nazaran simetriktr. Şekil(46). Sıfır noktası dönme noktasıdır. Çünkü $d^2p/d\gamma^2 = 0$ olur, $\gamma = \pm \gamma^*$ değerleri için basınç ekstrem değerler alır. $\gamma = -\gamma^*$ için basınç en küçük değerini ($p_{\min}$) alır. Yağ filmi ninyanları açık olduğu durumda filimde devamlı olarak düşük basınç sağlanamaz. Bu sebepten $p_{\min} = 0$ olarak alınır, $\gamma = +\gamma^*$ için basınç $p_{\max}$ değerini alır ki bu da simetri dolayısıyla en dar yerdeki ($\gamma = 0$), p_0 basıncının iki katıdır.

$P_{\max} = 2p_0$ değeri denklemde yerine konursa ve $-\gamma^*$ ile γ arasında integre edilirse.

$$P = \frac{6\eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} \left\{ \left(\frac{-J_3'(\gamma)}{\cos^2 \gamma^*} - J_2'(\gamma) - C_0 \right) \right\}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $J_2' = \frac{1}{\zeta} \int_{-\gamma^*}^{+\gamma} \cos^2 \gamma \cdot d\gamma$, ve

$$J_3' = \frac{1}{\zeta} \int_{-\gamma^*}^{+\gamma} \cos^4 \gamma \cdot d\gamma \text{ ifadeleri kısaltılarak gösterilmiştir.}$$

Bu ifadeler parabolik yarım silindirdedeki J değerlerinden farklıdır. Çünkü integrasyonda alt sınır bu defa sıfır olmayıp $-\gamma^*$ dir.

$$J_2' = J_2(\gamma^*) + J_2(\gamma) \text{ ve } J_3' = J_3(\gamma^*) + J_3(\gamma).$$

Yağın giriş yerinde ($\gamma = \gamma_1$) ve basınç bölgesinin sonunda ($\gamma = -\gamma^*$) yağ basıncının sıfır olacağı ($p = 0$) şartından

$$C_0 = 0 \text{ ve } 1/\cos^2 \gamma^* = J_2'/J_3' = \frac{J_2 + J_2(\gamma^*)}{J_3 + J_3(\gamma^*)}$$

ve

$$P_{\max} = 2P_0 = \frac{12\eta \cdot U \cdot a}{h_0^2} \left[\frac{J_3(\gamma^*)}{\cos^2 \gamma^*} - J_2(\gamma^*) \right].$$

sonuçları elde edilir.

Birim genişlikteki yağ filminin yük kabiliyeti aşağıdaki denklemden hesaplanır. Burada bilinmeyen a uzunluğunu $\zeta^2 = a^2/2h_0\phi$ ifadesi yardımıyla ifade edecek olursak, o takdirde:

$$P_1 = \eta \cdot U \cdot \frac{2\phi}{h_0} (\zeta \cdot \phi.)$$

bağıntısını elde ederiz.

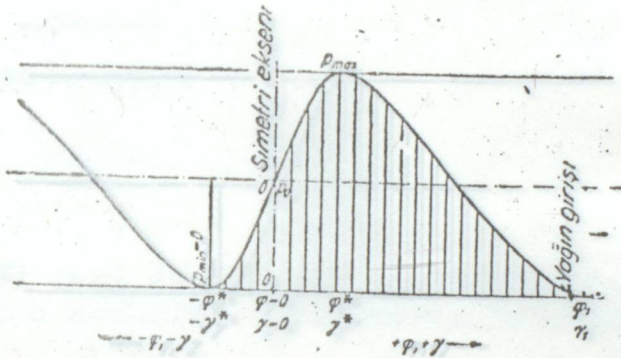
$\zeta = \infty$ olması halinde, $\zeta^2 \cdot \phi = 1,225$ olup böylece,

$$P_1 = 2,45 \cdot \eta \cdot U \cdot f / h_0$$

sonucu elde edilir.

Cetvel(7). Parabolik tam silindirde sürtünme hesabına ait değerler.

	30°	45°	60°	75°	90°
$\zeta = t_g \chi$	0,577	1,0	1,732	3,732	∞
χ^*	14,6°	20,3°	23,5°	25°	25,43°
$h^*/h_0 = 1/\cos^2 \chi^*$	1,0679	1,1368	1,1891	1,2195	1,2262
$P_{max} / 6 \cdot \eta \cdot U \cdot a / \varphi h_0^2$	0,0168	0,0474	0,0958	0,105	0,1264
$\zeta^2 \cdot \phi$	-	0,120	0,438	1,00	1,225
K	-	2,8	2,26	2,54	3,29



Şekil(39). Basıncın teorik yayılımı. Ref(4)

Verilen P_1 değerine veya sınır koşulu olan h_0 değerine tâbi olarak P_{max} un hesabı istenildiğinde, denklemleri maksada uygun bir şekilde düzenliyebiliriz. $\zeta = \infty$ için,

$$P_{max} = 0,76 \frac{n \cdot U \cdot a}{\zeta \cdot h_0^2} \quad \text{olup} \quad a = \zeta \sqrt{2g \cdot h_0} \quad \text{bağıntısı ile}$$

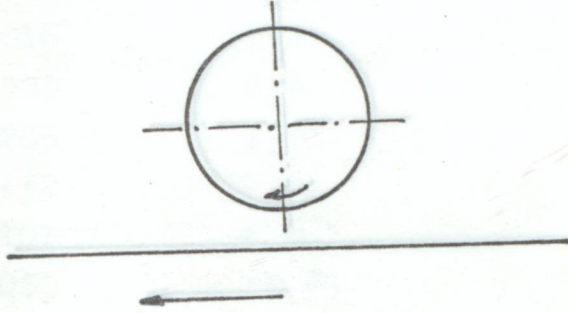
$$P_{max} = 1,07 \cdot \eta \cdot U \cdot \sqrt{g / h_0^3}$$

bulunur. Denklemden: $h_0 = 1,225 \cdot \eta \cdot U \cdot 2 \cdot f / P_1$ değeri yerine konursa:

$$P_{\max} = \frac{0,28}{f} \sqrt{\frac{\rho_1^3}{\eta \cdot U}}$$

sonucu elde edilir.

Profilini incelediğimiz bu film şekilleri dışında, değişik profiller için çeşitli araştırmacılar incelemeler yapmışlar ve bazı sonuçlar çıkarmışlardır.



Şekil(40). Ref(10)

1,34
1,79
2,68
5,37
13,4
17,9
26,8
55,7
107,5

Diğer bir araştırma aşağıdaki durum için yapılmıştır. Şekil(41).

Şekil(40) deki durum için yapılan analiz, soğuk haddелеme için uygun sonuçlar vermektedir. Maksimum film basıncı için

$$P_{\max} = \frac{6 \cdot \eta \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h_0} \cdot (U_1 + U_2)}{h_0^2} \times 0,1267.$$

ve yük taşıma kapasitesi için,

$$P_1 = \frac{1,968 \cdot \eta \cdot r \cdot (U_1 + U_2)}{h_0}$$

bağıntıları verilmiştir. Bu bağıntıda: h_0 : minimum film kalınlığı, r : merdane yarıçapı, U_1 : slabin lineer hızı, U_2 : merdane nin çevresel hızı olarak alınabilir. Bu konuyla ilgili yapılan bir araştırmada, örnek değerler için bulunan sonuçlar aşağıdadır.

Yapılan uygulamada: 60 mm . çapındaki malzeme 15 mm çapına haddelenmiştir. Merdane dönme hızı 800 m/dak, kullanılan yağ SAE 30 yağıdır. Yağ sıcaklığı olarak 20°C alınmıştır. Elde edilen değerler tabloda görülebilir.

Eğer merdane yarıçapları birbirine eşit olursa, yani $r_1 = r_2$ için, $C = r$ olur.

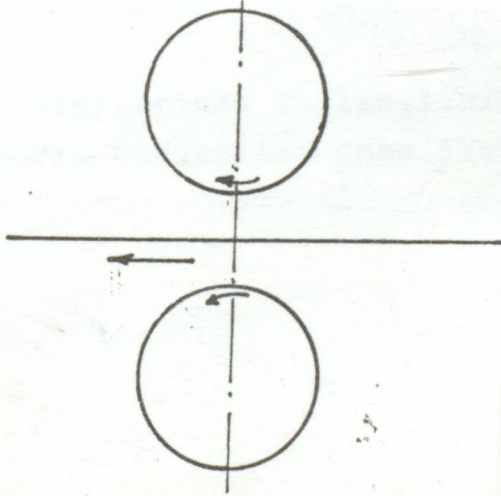
Eşit yarıçaplı iki merdane için maksimum film basıncı.

$$P_{\max} = \frac{23,40 \cdot \eta \cdot (U_1 + U_2) \cdot r^{1/2}}{(1000 \cdot h_0)^{3/2}}$$

TABLO (8). Ref (10)

h_o (mm).	P_{max} (kg/cm ²)	P_1 (kgf)
0,02030	53,7	1,34
0,01520	82,6	1,79
0,01016	152	2,68
0,00508	429	5,37
0,00203	1,70	13,4
0,00152	2,61	17,9
0,00101	4,80	26,8
0,00050	13,59	53,7
0,00025	38,40	107,5

Diğer bir araştırma aşağıdaki durum için yapılmıştır. Şekil(41).



Şekil(41). Ref(10)

Bu durum haddeleme olayına benzetilebilir, maksimum film basıncı için,

$$p_{max} = \frac{23,40 \cdot \eta \cdot (U_1 + U_2) \cdot r_1}{(1000 \cdot h_o)^{3/2} \cdot C^{1/2}}$$

$$C = \frac{1}{2} \left(\frac{(r_1 \cdot r_2 + r_1^2)}{r_2} \right)$$

Eğer merdane yarıçapları birbirine eşit olursa, yani $r_1 = r_2$ için, $C = r$ olur.

Eşit yarıçaplı iki merdane için maksimum film basıncı.

$$p_{max} = \frac{23,40 \cdot \eta \cdot (U_1 + U_2) \cdot r^{1/2}}{(1000 \cdot h_o)^{3/2}}$$

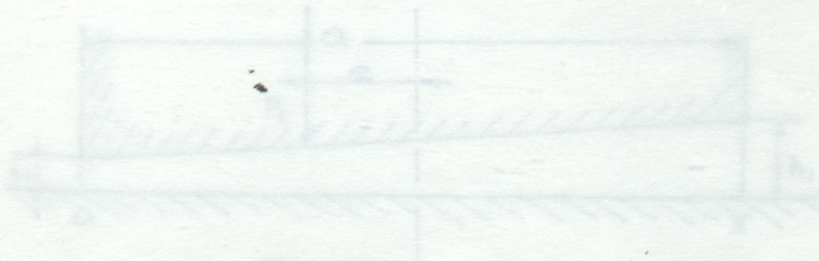
AYRILMAKTA EN UYGUN FİLM ŞEKLİ.

Bir kayma yüzeyinin profili ele alındığı zaman P y h_0 ile bağıntısı elde edilir. Sayısal bir uygulama olarak: 100 mm çapında iki merdane kullanılmıştır. Merdanelerin çevre hızları eşit ve 1725 m/dak dır. Yağlayıcı olarak 20 C de SAE 70 yağı kullanılmıştır. Yukarıdaki bağıntıdan yararlanılarak elde edilen maksimum yağ basıncı değerleri, çeşitli film kalınlıkları için tablo(9) da gösterilmiştir.¹¹

h_0 (mm). P_{max} (kgf/cm²)

0,1016	166
0,0762	256
0,0508	470
0,0254	1330

Haddeleme olaylarında kullanılabilecek yakınlıkta sonuçlar veren bu ampirik bağıntılar daha sonra tekrar incelenecektir.



3.7. MAKSADA EN UYGUN FİLM ŞEKLİ.

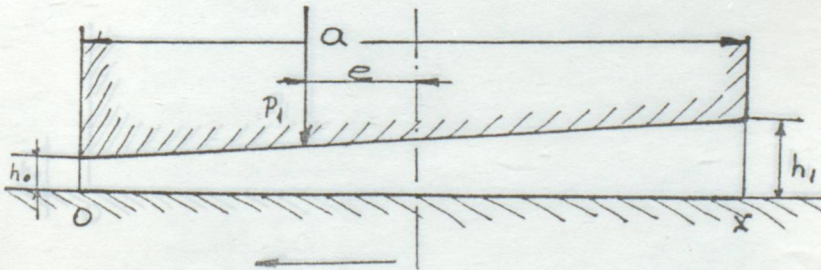
Bir kayma yüzeyinin profili ele alındığı zaman P yükü ile U kayma hızı bilinir. Kayma yüzeyinin b genişliği ile yağın viskozitesi serbest seçilir. Şekil(49) ve şekil(50)de verilmiş olan ϕ, K, C değerleri yardımı ile sürtünme katsayısı μ ve en küçük izafi film kalınlığı h_0/a hesaplanır. Yağın 20 C'daki viskozitesi (şekillendirme olayı başlangıcında) işlem esnasındaki viskozitenin 6-10 katı olduğundan, harekete geçme sırasında yarı sıvı sürtünmesi meydana gelecektir. Şekillendirme olayı son bulurken, işletme sıcaklığındaki yağın viskozitesi aynı kalır, hız düştükçe yarı sıvı sürtünme bölgesine girilir ve bunun sonucunda aşınmalar meydana gelir. Bu sebeple kayma yüzeylerinin hesabında, normal kayma hızından çok daha küçük hızlarda, örneğin normalin %10 unda sıvı sürtünmesinin sağlanması istenir. Düşük hızlarda çalışma ne kadar uzun sürer ne kadar sık tekrarlanırsa bu şart o kadar önem kazanır.

$$h_0 = a \sqrt{\phi} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}}$$

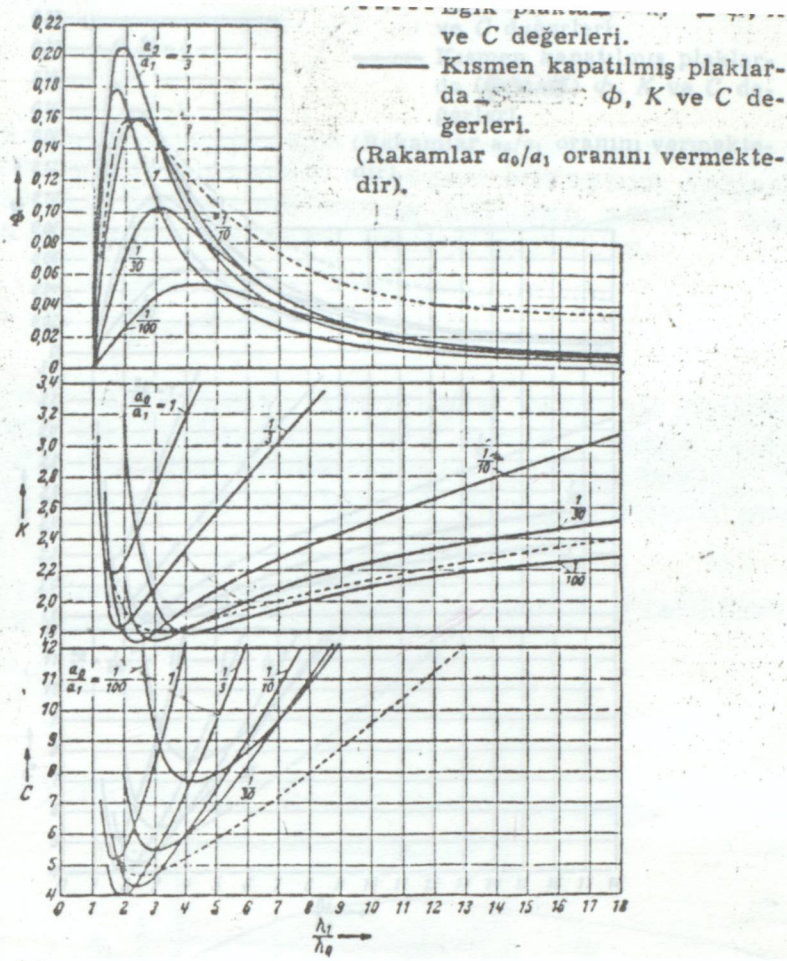
bağıntısından görüleceği gibi h_0 sabit kalmak şartıyla, filmin yük taşıma kabiliyeti $10/1$ e düşer ve işletme hızındaki sürtünme katsayısı $\sqrt{10}$ defa yükselir. İşin güç tarafı, film şeklinin pratik olarak sağlanmasıdır. Gerçekten burada h_0 in ve h_1/h_0 in çok küçük değerleri söz konusudur.

Örneğin 100 mm uzunluğunda eğik bir plakta $m=1,5$ için ($h_0=0,01$ mm alındığı takdirde), $h_1 - h_0=0,015$ mm olması gerekir. Bu kadar küçük eğimli yüzeylerin imali oldukça güçtür.

Küçük eğimli yüzeylerin teşkili için Michel³ isimli araştırmacı şekil(44) deki durum için incelemeler yapmıştır.



Şekil(44). Eğik plak. (Ref 3)

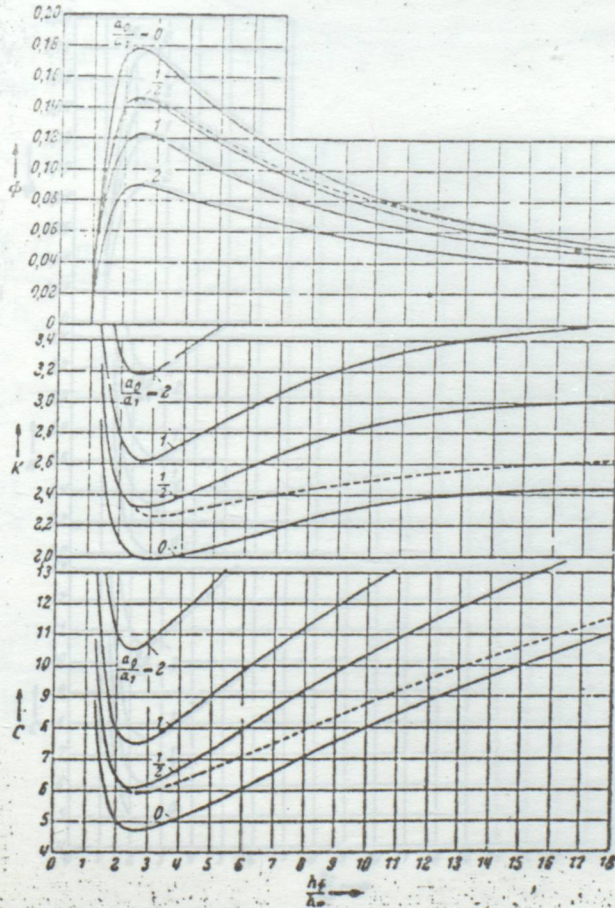


Şek. 43 - Filim şekillerinin mukayesesi. Ref (3)

----- Parabolik tam silindire ait ϕ , K ve C değerleri.

— Parabolik yarım silindire ve parabolik yuvarlatmalara
 ait ϕ , K ve C değerleri.

(Rakamlar, a_0/a_1 oranını vermektedir).



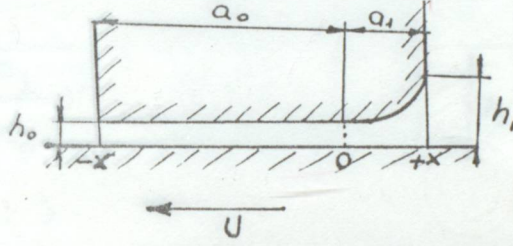
Yüzey basıncı yük yüzeyi boyunca asimetric olarak yayılmıştır. Bunun sonucu olarak bileşke kuvvetin tatbik noktası eksantriktir. Sıfır noktasına nazaran moment denklemi yazılırsa (e) eksantrisitesi hesaplanabilir.

$$P_1(a/2 - e) = \int_0^a P_x \cdot x \cdot dx.$$

Plak (e eksantrisitesi ile) için tamamen belirli bir eğim meydana gelir. Herhangi bir sebeple eğim değişirse eksantrisite de değişir ve başlangıç durumu tekrar oluşur. Diğer bir çözüm yağ giriş yerlerine yapılan yuvarlatma esasına dayanır.

Bu yuvarlatma sayesinde paralel kayma yüzeyleri yük taşıyabilecek duruma gelir. Şekil(45).

Şekil(45).Parabolik kenar yuvarlatması.



Böylece iki kısımdan meydana gelen yağ filminde yük kabiliyeti ve sürtünme katsayısı çıkarılan bağıntılar yardımı ile hesaplanabilir.

Paralel kısımda, yani $x/a_0 = -1$ den, $x_0 = 0$ a kadar olan kısımda,

$$P_0 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a_0}{h_0^2} \left(\frac{h^*}{h_0} - 1 \right)$$

$$P_x = P_0 \cdot \left(1 + \frac{x}{a_0} \right).$$

ifadeleri yazılır.

Parabolik kısımda, yani $x/a_1 = 0$ dan, $x/a_1 = 1$ e kadar olan kısımda,

$$P_0 = \frac{6 \cdot \eta \cdot U \cdot a_1}{h_0^2} \left(J_2 - \frac{h^*}{h_0} J_3 \right)$$

ifadesi yazılır. Her iki değerin eşitliğini yazmak sureti ile.

$$\frac{h^*}{h_0} = \frac{1}{\cos^2 \gamma^*} \cdot \frac{J_2 + \frac{a_0}{a_1}}{J_3 + \frac{a_0}{a_1}}$$

sonucuna varılır. Bu bağıntıdan h/h_0 değeri hesaplanabilir. Filmin kaldırabileceği P_1 yükünü ve kaydırma kuvveti R_1 i, toplam film uzunluğu a cinsinden ifade edersek.

$$P_1 = 6 \cdot \eta \cdot U \cdot \left(\frac{a}{h_0} \right)^2 \cdot \phi.$$

$$R_1 = \eta \cdot v \cdot U \cdot \frac{a}{h_0}.$$

bağıntılarını elde ederiz. Burada,

$$\phi = \frac{6}{\gamma^2 (1 + \frac{a_1}{a_0})^2} \left(\frac{A}{\cos^2 \gamma^*} - B \right) + \frac{6 \cdot \frac{a_1}{a_0} \cdot 3 \left(\frac{a_1}{a_0} \right)^2}{\left(1 + \frac{a_1}{a_0} \right)^2}.$$

$$\left(\frac{1}{\cos^2 \gamma^*} - 1 \right)$$

$$v = \frac{1}{\left(1 + \frac{a_1}{a_0} \right)} \left(4 \cdot J_1 - \frac{3 \cdot J_2}{\cos^2 \gamma^*} \right) + \frac{\frac{a_1}{a_0}}{1 + \frac{a_1}{a_0}} \left(4 - \frac{3}{\cos^2 \gamma^*} \right)$$

olup, A ve B katsayılarının anlamı daha evvel olduğu gibi,

$$A = \frac{1}{8} \sin^2 \gamma_1 + \frac{3}{8} \gamma_1 \cdot \text{tg} \gamma_1.$$

$$B = \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot \text{tg} \gamma_1.$$

şeklindedir.

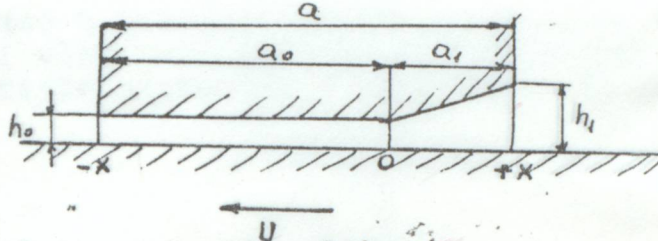
Yağ giriş kenarları eğik bir düzlem olan filmlerin, şekil(46) veya parabolik ve eğik düzlem kombinezonunun hesapları benzer şekilde yapılabilir.

Bundan başka.

$$\frac{h}{h_0} = 1 + \left(\gamma \frac{x}{a} \right)^3.$$

karşılık birincisinin sürtünme katsayısı μ_0 olduğundan daha küçüktür. μ_0/μ_1 oranı ne kadar büyük olursa yağ filminin yük kabiliyeti o kadar küçük olur.

İnce yağ filmlerinde, viskoz sıvıların kayma hızı ne kadar düşük olursa, sürtünme katsayısı da o kadar düşük olur.



Şekil(46). Kısmen eğik plak. Ref(3)

denklemine uygun yağ filmleri de vardır, örneğin kayma yüzeyinin elastik deformasyonu sonucu meydana gelen profil bu denkleme uyar.

Film profillerinin çeşitliliği karşısında bunların birbiriyle mukayesesi ve en elverişlisinin seçilmesi maksada uygundur.

P, η, U değerleri önceden tespit edilmişse, amaç mümkün mertebe küçük bir sürtünme katsayısı seçilmesidir. Bu da K değerinin küçük olmasını gerektirir. Sürtünen yüzeyler arasında yüzeysel teması önlemek amacıyla h_0 in büyük değerleri ve buna bağlı olarak ϕ nin büyük değerleri seçilecektir. h_0 in müsaade edilecek en küçük değeri sınırlıdır, sürtünme katsayısı h_0/a ile orantılı olduğundan en küçük sürtünme katsayısını en küçük C değeriyle tespit edebiliriz. Burada film şeklinin seçimi de önemlidir.

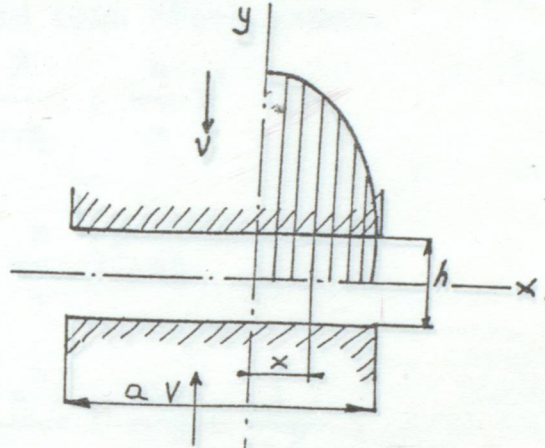
Eğik ve kısmen kapalı plaklara ait şekil(42) nin, parabolik yarım ve tam silindir, yağ giriş kenarı parabolik yuvarlatılmış film şekline ait şekil(43) nin incelenmesinden anlaşılabileceği üzere K, ϕ , ve C nin koyduğumuz üç şartı birden yani, $K_{min}, \phi_{max}, C_{min}$ değerlerini alması imkansızdır. Bütün film şekillerinin birbiriyle karşılaştırılmasında h_1/h_0 in esas alınması maksada en uygundur.

Esas itibarıyla söylenebilir ki, yağ giriş kenarları yuvarlatılmış veya eğik olarak yapılmış yağ filmlerinin yük kabiliyetleri, kalınlığı yük yüzeyinin sonuna kadar sürekli azalan filmlerin yük kabiliyetinden daha azdır. Buna

karşılık birincinin sürtünme katsayısı ikincininkinden daha küçüktür. a_0/a_1 oranı ne kadar büyük olursa yağ filminin yük kabiliyeti o kadar küçük olur.

İnce yağ filmlerinde, viskoz sıvıların tampon tesirine ne kadar dayanıklı olduğunu aşağıdaki yaklaşık bağıntıyla hesaplayabiliriz.

Birbirinden h mesafede, birbirine paralel ve sonsuz genişlikte iki plak şekil(47) aralarındaki yağı dışarı fıskırtmak suretiyle birbirine V (m/s) hızıyla yaklaşmaktadır.



Şekil(47). Birbirine v hızıyla yaklaşan iki plak.
Ref(3)

Sıvı akımı x ve y eksenlerine göre simetriktir. Plak ortasından x uzaklığında bulunan bir kesitten plakların birbirine yaklaşması dolayısıyla $b=1$ genişliği boyunca dışarıya verilen yağ miktarı.

$$G_{b=1} = V \cdot x \cdot (m^3/s \cdot m)$$

ifadesi ile verilir. Başlangıç hızı sıfır olması dolayısıyla.

$$G_1 = - \frac{h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} = V \cdot x.$$

denklemini yazılır. Yağın bir üst basınç olmadan dışarı aktığını kabul edersek, yani $x = \pm a/2$ için $P=0$ ise, o takdirde 0 dan $a/2$ ye kadar olan integrasyondan, parabolik basınç yayılımı.

$$P_x = \frac{6\eta \cdot V}{h^3} \left\{ \left(\frac{a}{2} \right)^2 - x^2 \right\}.$$

ifadesi elde edilir. Plakları birbirine yaklaştırmak için gereken kuvvet,

$$\frac{P}{b} = 2 \int_0^{a/2} P_x \cdot dx = \frac{12 \cdot \eta \cdot V}{h^3} \int_0^{a/2} \left(\frac{a^2}{4} - x^2 \right) dx = \eta \cdot V \cdot \left(\frac{a}{h} \right)^3.$$

olarak bulunur. $a = 0,1$ m, $h = 0,1 \text{ mm} = 0,0001$ m, $V = 1$ m/s, $\eta = 0,002$ kg.s/m². değerleri ile,

$$\frac{P}{b} = 0,002 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,1}{0,0001} \right)^3 = 2000000 \text{ kg/m.}$$

hesaplanır. Verilen bir P/b değeri altında plakların birbirine yaklaşması için geçen zaman.

$$V = - \frac{dh}{dt} = \frac{P}{b \cdot \eta} \left(\frac{h}{a} \right)^3.$$

buradan,

$$- dt = \frac{\eta \cdot b}{P} \left(\frac{a}{h} \right)^3 \cdot dh.$$

bağıntısından,

$$t_2 - t_1 = \frac{\eta \cdot b \cdot a^3}{2 \cdot P} \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right)$$

ifadesi ile verilir. Buna göre sınırlı değerde bir P/b kuvveti, her iki yüzey arasındaki yağı tamamen bitirmek için $h_2 = 0$ sonsuz uzunlukta bir zamana ihtiyaç gösterir.

$h_1 = 0,1 \text{ mm} = 10^{-4}$ m, $h_2 = 0,001 \text{ mm} = 10^{-5}$ m, $P/b = 10000$ kg/m, $a = 0,1$ m, $\eta = 0,002$ kg.s/m². için $t_2 - t_1 = 1$ saniye olarak hesaplanır. Bu hesaplardan dar yağ filmlerinin ne kadar büyük yükler kaldırabileceğini görmek mümkündür.

Şimdiye kadar yaptığımız teorik analizlerde, kayma yüzeylerinin genişliğini sonsuz olarak kabul ettik, halbuki kayma yüzeyinin genişliğinin sınırlı oluşunu da hesaba katarak incelemeler yapılmış ve gerçeğe daha uygun sonuçların edilebileceği görülmüştür.

Temel teorik denklemi şöyle oluşturabiliriz: Plakın simetri eksenini ile çakışan x eksenini doğrultusunda, birim genişlikte akan sıvı miktarı,

$$G_x = \frac{h^3}{12\eta} \frac{dP}{dx} + \frac{U \cdot h}{2}.$$

formülü ile ifade edilir. Keza z doğrultusunda birim geniş-

likte (bu doğrultuda $U=0$ olduğu kabulüyle.)

$$G_z = \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{dP}{dz}$$

miktarında sıvı akar. Rejim halinde toplam sıvı miktarının sabit olması gerektiğinden x ve z doğrultusundaki değişimlerin toplamı sıfır olmalıdır.

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{dP}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{dP}{dz} \right) = - \frac{U}{2} \frac{dh}{dx}$$

h in yalnız x e bağlı olduğu kabul edildiğinden,

$$\frac{d^2P}{dx^2} + \frac{d^2P}{dz^2} + \frac{3}{h} \cdot \frac{dP}{dx} \cdot \frac{dh}{dx} + \frac{6\eta U}{h^3} \cdot \frac{dh}{dx} = 0$$

ifadesi yazılır.

Bu diferansiyel denklemlerin matematiksel olarak tam çözümünde sabit bir viskozite kabul edilmesi halinde dahi birçok zorluklarla karşılaşılır. Gümbel tarafından verilmiş olan basit ve kullanışlı bir çözümde plak ortasındaki ($z=0$) basınç yayılımının, sonsuz genişlikteki kayma yüzeylerinde bulunana benzediği kabul edilmektedir.

$$P = A \cdot f(x/a) \cdot f(z/b).$$

Burada $f(x/a)$ ifadesi daha evvel belirlenmişti, A faktörü giren yağ miktarının çıkan yağ miktarına eşit olduğu şartından elde edilir. $f(z/b)$ fonksiyonu, yan kenarlarda P basıncının sıfır olması şartını gerçekleştirmelidir.

Daha uygun çözümler Michell³ tarafından verilmiştir.

$$P = \sum_{m=1}^{\infty} P_m, \text{örneğin, } P_m = F_m(x) \cdot \frac{\sin(m \cdot z/b)}{m \cdot x/a}.$$

Burada her kısmi fonksiyon P_m , problemin sınır şartını gerçekleştirmelidir.

Çok güç olan sayısal hesaplar ilk olarak hafif eğik plaklara ($m=1$ ve 2) uygulanmıştır. Boswall viskozitenin değişkenliğini gözönüne alan bir çözüm vermiştir. Yağ viskozitesinin x e göre değişkenliğinin bağıntısı bilinmemektedir. Çıkıştaki viskozite η_0 ile gösterilmek üzere.

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(1 + n \cdot \frac{x}{a}\right)$$

ifadesi ile verilen doğrusal bir değişkenlik kabul edildiği takdirde aşağıdaki cetvel(10) deki sonuçlar elde edilir.

Sayısal cetvel (10). Eğik kayma yüzeylerinde sürtünmeyi hesaplamaya yarıyan fonksiyon değerleri.

$$m=1,5, b, \eta = \eta_0 \left(1 + n \cdot \frac{x}{a}\right), b = \infty.$$

n	ϕ	v	K	C	e/a	h^*/h_0
1	0,2370	0,510	2,15	4,41	0,067	0,502
2	0,3036	0,748	2,46	4,46	0,056	0,548
4	0,4206	1,280	3,03	4,67	0,046	0,604

Yapılan deneysel sonuçlar göstermiştir ki hesaplarda yağ viskozitesi için yapılan kabul yani doğrusal değişkenlik $U=2,6$ m/s hız değerine kadar varsada, daha yüksek kayma hızlarında bu kabul uygun sonuçlar vermez. Frössel parabolik tam silindire ait sayısal değerleri hesaplamıştır. Bütün bu sonuçların değerlendirilmesinden elde edilen sonuç Aynı izafi durumda olan kayma yüzeylerinden sınırlı genişlikte olanda yük kabiliyeti azalmaktadır.

Sonsuz genişlikte kayma yüzeylerinininkine benzer şekilde,

$$P_{1s} = \frac{\eta \cdot U \cdot a^2}{h_0^2} \phi_s.$$

ifadesi yazılırsa o takdirde yük kabiliyetindeki azalış,

$$f_b = \frac{P_1}{P_{1s}} = \frac{\phi}{\phi_s}.$$

faktörü ile hesaba katılmış olan, minimum film kalınlığı değişmez. Çünkü,

$$\frac{h_0}{a} = \sqrt{\phi_s} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_{1s}}} = \sqrt{\phi} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}}$$

dir. Keza sürtünme katsayısı μ de sonsuz genişlikteki kayma yüzeylerinde olduğu gibi ifade edilebilir.

$$\mu_s = K_s \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_1}} = C_s \cdot \frac{h_0}{a}.$$

Burada ϕ_s veya K_s ve C_s değerleri elimizde bulunan çözümlerden bellidir. Burada bu katsayıların yalnız b/a ya değil aynı zamanda film şekline ve h_1/h_0 oranına da tabi olduğu unutulmamalıdır.

Sınırlı kayma yüzeyleri için çıkarılan diferansiyel denklemin çözümü için Stadola grafik bir yol geliştirmiştir. Böylece keyfi film şekillerinde, eğri yüzeylerde ve keza

değişken viskoziteyi hesaba katarak sürtünme katsayısını hesaplamak mümkün olmuştur. Bu araştırmada yapılan tek kabul, film şeklinin ve viskozitenin z e tabi olmayışıdır. Kingsbury aynı denklemi deneysel yoldan ve sıvıların hacimsal akımı ile bir elektrolitik eriyik içindeki elektrik alanı arasındaki analogiden faydalanarak çözmektedir. Bu metod da istenilen film şekillerine uygulanabilir. Aynı zamanda değişken viskozite ile hesap yapmayı mümkün kılar.

Film şekillerinin ve sınır şartlarının çokluğu karşısında sade ve genel bir yaklaşık çözüm ortaya konmuştur. Bu çözüm sürtünme katsayısının geometrik bir büyüklük olması özelliğine dayanır. Film şekilleri ve h_0/a değeri aynı kalmak şartıyla, kayma yüzeylerini aynı izafi durumda tutan ara madde, sıvı ne olursa olsun sürtünme katsayısı aynı kalır. Fakat bu sonuç sonsuz genişlikteki kayma yüzeyleri için doğrudur, yaklaşık bir çözümde, sınırlı genişlikte bir sıvının yanlardan akmasından, sürtünme kuvveti R_1 , kayma yüzeylerinin genişliğine tabi değildir. Şu halde sınırlı genişlikteki kayma yüzeylerinde,

$$\mu_s = \frac{R_{1s}}{P_{1s}} = \frac{R_{1\infty}}{P_{1\infty}} = \mu_\infty \cdot f_b = K \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_{1\infty}}} \cdot f_b.$$

$$\mu_s = K_s \cdot \sqrt{f_p} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_{1s}}}$$

$$C_\infty = \frac{K_\infty}{\sqrt{\phi_\infty}} = \frac{K_\infty}{\psi \sqrt{f_b}} \sqrt{\frac{\eta \cdot U}{P_{1s}}}$$

bağıntısından,

$$\mu_s = C_\infty \cdot f_b \cdot \psi.$$

ifadesi ortaya çıkar.

Bu yaklaşık çözümün maksada uygunluk derecesi eldeki matematik çözümler ile mukayese sonucunda anlaşılır. Eğik plak ve parabolik tam silindir için verilmiş olan sayısal cetvel (11) ve bağıntıdan elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi yaklaşık çözüm daima daha büyük sürtünme katsayıları vermektedir.

Sayısal cetvel (11) eğik plaklarda f_b ve K_s değerleri.

Sayısal cetvel (12) parabolik tam silindirde $K \cdot f_b / K_s$ değerleri.

Hareket yönünün hep aynı kaldığı hallerde en uygun yüzeyinin sonuna doğru daralan film şekillerinde en uygun kalınlık oranları ($h_1/h_0 = 2 \dots 3$) seçilir. Bu konu için gerekli f_b değerleri yalnız eğik plaklar için belirlenebilmiştir.

Sayısal cetvel(41). Eğik plaklarda f_b ve K değerleri.

$m \neq 0$	b/a	∞	4	2	1,33	1	0,8	0,667	0,5
$m=1$	f_b	1	1,19	1,44	1,70	2,305	2,91	3,585	5,41
	$\sqrt{f_b}$	1	1,09	1,20	1,338	1,518	1,707	1,893	2,325
	K_e	1,94	2,08	2,25	2,48	2,76	3,07	3,39	4,13
$h_1/h_0=2$	$K_{\infty} \cdot f_b$	1,94	2,115	2,325	2,595	2,945	3,31	3,675	4,551
	$\%H_{ata}$	0	1,6	3,2	4,4	6,3	7,3	7,8	8,4
$m=2$	f_b	1	1,19	1,41	1,74	2,18	2,74	3,38	4,83
	$\sqrt{f_b}$	1	1,086	1,187	1,318	1,477	1,655	1,838	2,19
	K_e	1,82	1,91	2,02	2,18	2,38	2,60	2,83	3,32
$h_1/h_0=3$	$K_{\infty} \cdot \sqrt{f_b}$	1,82	1,976	2,16	2,40	2,685	3,01	3,345	4,0
	$\%H_{ata}$	0	3,3	6,5	9,2	11,4	13,6	15,4	17,0

Sayısal cetvel(42).Parabolik tam silindirde $K_{\infty} \cdot \sqrt{f_b}/K_m$ değerleri.

b/a	$h_1/h_0 = 3,9$	$h_1/h_0 = 6,7$	$h_1/h_0 = 17,5$	$h_1/h_0 = 31$
0,5	1,11	1,19	1,26	1,25
0,75	1,11	1,15	1,19	1,17
1,00	1,10	1,13	1,14	1,12
1,25	1,09	1,11	1,11	1,09
1,50	1,08	1,09	1,09	1,07
1,75	1,07	1,08	1,08	1,06
2,00	1,06	1,07	1,07	1,05
2,25	1,05	1,06	1,06	1,05

Düzlem kayma yüzeylerinde çok çeşitli film şekillerine rastlanır.Hareket yönünün hep aynı kaldığı hallerde yük yüzeyinin sonuna doğru daralan film şekillerinde en uygun kalınlık oranları ($h_1/h_0 = 2...3$) seçilir.Bu konu için gerekli f_b değerleri yalnız eğik plaklar için belirlenebilmiştir.

3.8. HİDROSTATİK YAĞLAMANIN TEMEL PRENSİPLERİ.

Prensip olarak, sürtünme esnasında meydana gelen dış kuvvetleri dengelemek için gerekli basınç dış bir etki ile meydana getirilir. Bu uygulama için en iyi örnek, bir pompa vasıtasıyla kayma yüzeyleri arasına yüksek basınç altında yağ iletilmesidir.

Hidrodinamik yağlamaya göre hidrostatik yağlamanın özellikleri ve üstünlükleri şunlardır.

- Yük kabiliyeti, yüzeyler arasındaki izafi harekete bağlı değildir. İdeal sıvı sürtünmesi izafi hareket yokken de meydana gelir. Bu nedenle hareket başlangıcında ve frenleme sırasında hidrodinamik yağlamada meydana gelen aşınma hidrostatik yağlamada önlenmektedir. Yük taşıma yeteneği kullanılan pompaya bağlı olduğu için ,çok yüksek değerlere erişilebilir.
- Oldukça büyük bir rijitliğe ve sönümleme yeteneğine sahiptir (53,570 daN/cm). Belirli bir üst sınır olmamakla beraber 1400 daN/cm².ye kadar ulaşan bir taşıma kabiliyeti elde edilebilir.

Hidrostatik yağlama sistemlerinin mahzurları şu şekilde özetlenebilir.

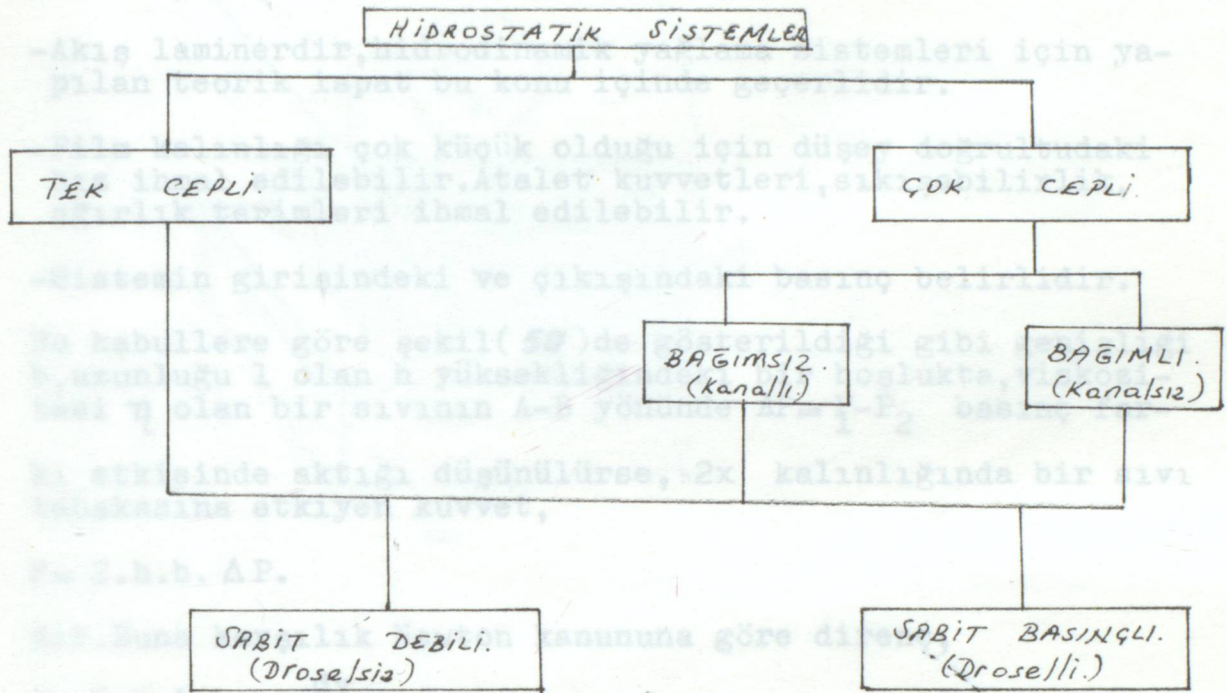
- Gerekli tesisat (pompa, donatımlar) oldukça karışıktır.
- Hidrostatik yağlama sistemlerindeki sürtünme katsayısı hidrodinamik yağlamalı sistemlere nazaran daha küçüktür ancak enerji kayıpları hesaplanırken pompa gücü de dikkate alınmalıdır.

Hidrostatik yağlama sistemleri son yıllarda bazı üstünlükleri nedeniyle oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Hidrostatik yağlama sistemleri tertip bakımından iki kısma ayrılabilir.

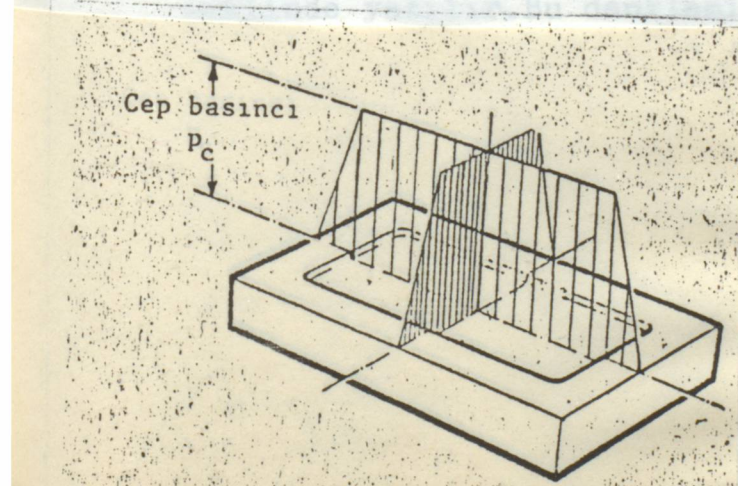
Genel olarak hidrostatik sistemlerde yağ bir pompa yardımıyla ceplere gönderilir ve kayma yüzeyleri arasındaki boşluktan dışarı verilir. Her cep için bir pompanın kullanıldığı sistemlerde debinin sabit tutulması mümkün olur. Bu sistemlere sabit debili sistemler denilecektir. Çok cepli sistemlerde sabit debi uygulaması çok pahalı bir uygulama olduğu için pratik olarak tek bir pompa kullanılır, ayrıca her cebin önüne birer hidrolik direnç (drosel) konur. Bu sistemde pompa basıncı sabittir ve bu nedenle sabit basınçlı sistem olarak tanımlanır.

Kanallı sistemlerde cepler birbirinden bağımsız olarak çalıştığından bunlara bağımsız sistemler, kanalsız sistemlere ise, cepler bağımlı olarak çalıştığından yani bir cepteki

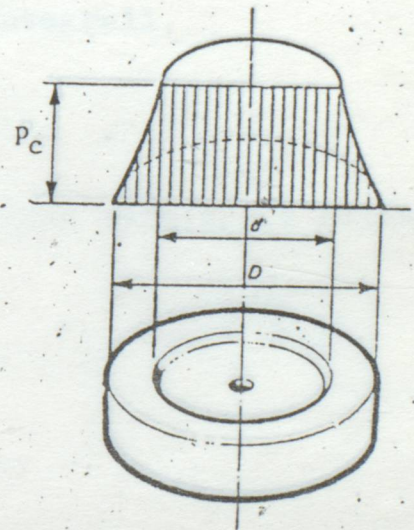
basınç diğer ceptekilere tesir ettiğinden bunlara bağımlı sistemler denir. Aşağıdaki şemada hidrostatik yağlama sistemlerinin şematik bir sınıflandırılması görülmektedir.²



Çeşitli cep şekillerine rağmen bunlar temel olarak dikdörtgen ve daire esas olmak üzere iki formda düzenlenebilirler. Şekil (48-49)



Şekil(48).Dikdörtgen cepli sistemler.
Ref(2)



Şekil(49).Dairesel cepli sistemler.
Ref(2)

3.8.1. HİDROSTATİK SİSTEMLERİN GENEL DENKLEMLERİ.

Hidrostatik yağlama sistemlerinin genel denklemlerini ele etmek için şu kabuller yapılır.

- Akış laminardır, hidrodinamik yağlama sistemleri için yapılan teorik ispat bu konu içinde geçerlidir.
- Film kalınlığı çok küçük olduğu için düşey doğrultudaki hız ihmal edilebilir. Atalet kuvvetleri, sıkışabilirlik, ağırlık terimleri ihmal edilebilir.
- Sistemin girişindeki ve çıkışındaki basınç belirlidir.

Bu kabullere göre şekil (50) de gösterildiği gibi genişliği b , uzunluğu l olan h yüksekliğindeki bir boşlukta, viskozitesi η olan bir sıvının A-B yönünde $\Delta P = P_1 - P_2$ basınç farkı etkisinde aktığı düşünülürse, $2x$ kalınlığında bir sıvı tabakasına etkiyen kuvvet,

$$F = 2 \cdot h \cdot b \cdot \Delta P.$$

dir. Buna karşılık Newton kanununa göre direnç,

$$F = 2 \cdot \eta \cdot l \cdot b \cdot \frac{dv}{dx}.$$

şeklinde tanımlanabilir. Koordinat sistemlerinin seçimine göre dv/dx gradyanı negatiftir, statik denge denklemi yazılırsa.

$$2 \cdot h \cdot b \cdot \Delta P = - 2 \cdot \eta \cdot l \cdot b \cdot \frac{dv}{dx}.$$

buradan

$$dv = - \frac{P}{\eta \cdot l} \cdot h \cdot dx.$$

şeklinde yazılır. Bu denklemin genel integrali,

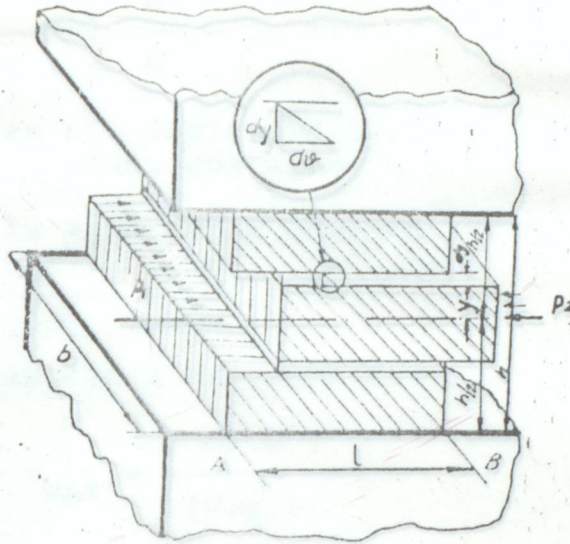
$$v = - \frac{P}{\eta \cdot l} \cdot \frac{x^2}{2} + C.$$

dir. C sabitinin değeri sınır şartlarının yardımıyla belirlenebilir. Şöyle ki,

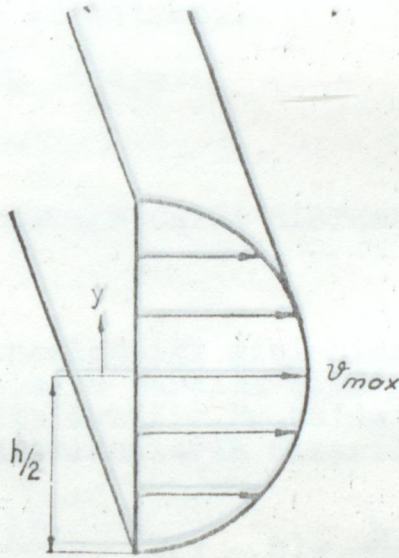
$$x = \frac{h}{2} \text{ için, } v = 0 \text{ dır.}$$

$$C = \frac{P \cdot h^2}{8 \cdot \eta \cdot l}.$$

Buna göre C yerine konursa,



(a)



Sekil (50). Ref (2)

$$U = \frac{y^2 - h \cdot y}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dx} \quad \text{bulunur.}$$

Görüldüğü gibi hız yayılımı paraboliktir, ortalama akın hızı (v_{ort}) böylece,

$$v_{ort} = \frac{1}{h} \int_0^h u \cdot dy = - \frac{h^2}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dx}$$

Burada C yerine konursa,

$$v = \frac{\Delta p}{2 \cdot \eta \cdot l} \left(\frac{h^2}{4} - x^2 \right)$$

Bu denklem hız değişiminin x eksenine göre simetrik bir parabol olduğunu gösterir.

x=0 için v maksimum değerini alır.

$$v_{\max} = \frac{\Delta p \cdot h^2}{8 \cdot \eta \cdot l}$$

Sıvı tabakasının ortalama hızı,

$$v_{\text{ort}} = \frac{2}{3} v_{\max} = \frac{\Delta p \cdot h^2}{12 \cdot \eta \cdot l}$$

şeklinde yazılabilir.

Hidrostatik yağlama sistemlerinde hesaplanması gereken faktörler şunlardır.

- Yük taşıma kabiliyeti.
- Yük debisi.
- Gerekli güç ihtiyacı.
- Rijitlik,

3.8.2-DİKDÖRTGEN CEPLİ SİSTEMLER:

Debi.

Daha önce incelendiği gibi hidrostatik yağlama sistemlerinde hareketsiz ve paralel olan yüzeylerde sıvı sürtünmesi meydana getirilebilir. Bu halde hız yayılımı, genel hız ifadesinden yararlanılarak çıkarılabilir.

$$U = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \frac{h-y}{h} \cdot U_1 + \frac{y}{h} U_2$$

ifadesinde, $U_1 = U_2 = 0$ için.

$$U = \frac{y^2 - h \cdot y}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \quad \text{bulunur.}$$

Görülüyorki hız yayılımı paraboliktir, ortalama akım hızı (v_{ort}) böylece,

$$v_{\text{ort}} = \frac{1}{h} \int_0^h U \cdot dy = - \frac{h^2}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

olarak hesaplanır. Eni b ve kalınlığı h olan bir kesitten basıncın etkisi altında geçen yağ miktarı,

$$q = V_{\text{ort}} \cdot b \cdot h = - \frac{h^3}{12 \cdot \eta} \frac{dP}{dx}$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemdeki dp ve dx gibi sonsuz küçük değerler yerine bunların gösterdiği;

$\Delta P = P_c - P_o$ ve $dx = l$, değerleri yazılırsa, denklem

$$q = \frac{\Delta P \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot l}$$

$P_o = 0$ alınırsa, $P = P_c - P_o = P_c$.

$$K_q = \frac{q}{P_c}$$

ifadeleri ile,

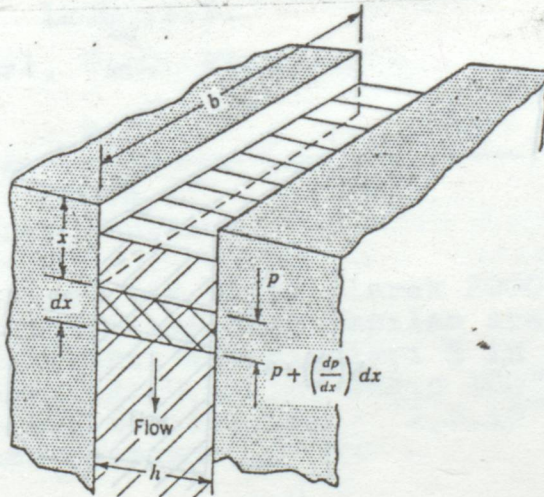
$$q = K_q \cdot P_c \cdot \frac{h^3}{\eta}$$

bulunur. $P_m = K_f \cdot P_c$ ifadesi kullanılırsa,

$$q = \frac{K_q}{K_f} \left(\frac{F}{A} \right) \frac{h^3}{\eta}$$

şeklinde yazabiliriz.

Burada teorik debiyi tesbit ederken viskozitenin basınçla değişimini gözönüne alırsak şu sonuçları görebiliriz. Şekil (54)



Şekil(54). Ref(14)

$$q = \frac{\Delta P \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot dx}$$

$$\Delta P = P - (P + \left(\frac{dp}{dx}\right) dx) = -\left(\frac{dp}{dx}\right) dx$$

$$q = \frac{-\left(\frac{dp}{dx}\right) dx \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot dx}$$

Yük kabiliyeti.

Viskozitenin basınçla değişimini gözönüne alırsak,

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{Bp}$$

Bu değeri yerine koyarsak,

$$q = \frac{-\frac{dp}{dx} \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta_0 \cdot e^{Bp}}$$

Burada B yağın özelliğine bağlı bir sabittir.

$$\frac{q \cdot 12 \eta_0 \cdot dx}{b \cdot h^3} = e^{-Bp} (-B \cdot dp) \cdot \frac{1}{B}$$

bağıntısı integre edilirse.

$$\frac{12 \cdot \eta_0 \cdot q \cdot x}{b \cdot h^3} = \frac{1}{B} e^{-B \cdot p} + C$$

x=0 için P=P₀ konursa,

$$Q = \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \eta_0 \cdot l \cdot B} (-e^{-B \cdot p_0} + e^{-B \cdot p})$$

x=1, P=0 konursa,

$$Q = \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \eta_0 \cdot l \cdot B} \left(\frac{1 - e^{-Bp}}{B} \right)$$

sonucu bulunur.

Sayısal bir örnek olarak 2000 psi basınç altında ve SAE 30 yağı kullanılarak yapılan araştırmada, Plakaların kalınlıkları 8 in, genişliği 12 in, yağ filmi kalınlığı 0,01 in, yağın 100°F'daki viskozitesi 105 senti poise, B katsayısı : $2,2 \cdot 10^{-4}$ olan bir hidrostatik yağlama olayında,

$\eta_0 = 105 \cdot 1,45 \cdot 10^{-7}$ reyn değerleri kullanılırsa.

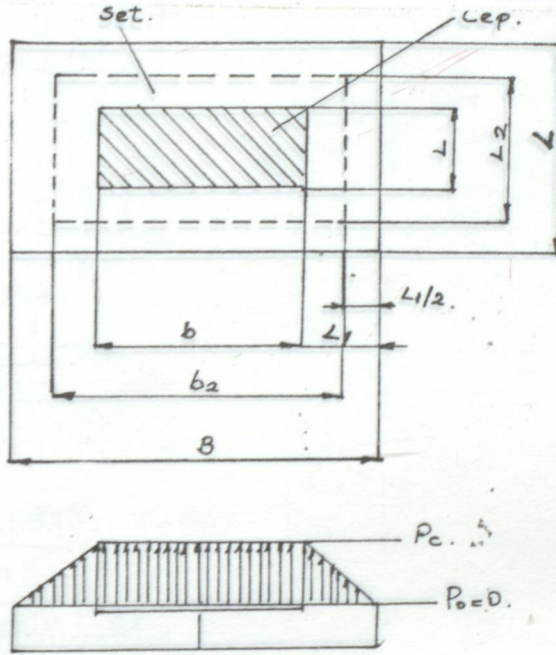
$$Q = 5,96 \text{ in}^3/\text{sn}$$

$$Q = \frac{\Delta P \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot dx}$$

formülünden elde edilen değer $Q = 7,37 \text{ in}^3/\text{sn}$ dir, bu sonuca göre hidrostatik yağlama sistemlerinde teorik debi hesaplanırken viskozitenin basınçla değişimi mutlaka hesaba katılmalıdır.

Yük taşıma kabiliyeti.

Yük taşıma kabiliyeti hesaplanırken genelde bir yüzey alınır ve yüzeyin nominal alanı (alanın tamamı) A , cep alanı A_c , cep alanındaki basınç P_c , $(A - A_c)$ alanındaki basınç P ve çevre basıncı P_0 ile ifade edilirse, yüzeyin yük taşıma kabiliyeti. Şekil (52).



Şekil (52). Ref(2)

$$F = P_c \cdot A_c + P(A - A_c)$$

olur, P basınç yayılımının doğrusal olduğu kabul edilirse ve çevre basıncı $P_0 = 0$ olarak alınırsa, denklem.

$$P = (P_c + P_0)/2 = P_c/2$$

değeri ile,

$$F = P_c \cdot A \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_c}{A}\right)$$

veya yük katsayısı denilen

$$K_f = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_c}{A}\right)$$

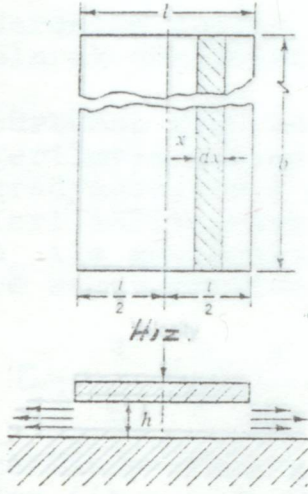
ifadesi ile,

$$F = K_F \cdot P_c \cdot A.$$

olarak yazılır. Ortalama basınç $P_m = F/A$ değeri ile yük kabiliyeti,

$$P_m = K_f \cdot P_c.$$

şeklinde bulunur. Aynı sonucu daha değişik bir yolla da elde edebiliriz.



Şekil(53). Ref(4)

$$q = - \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \frac{dP}{dx}$$

debi bağıntısında, uzunluğu b ve genişliği x olan bir kısmı gözönüne alırsak. Bu kesitteki debi, Şekil (53).

$$q = V \cdot b \cdot x.$$

bu iki bağıntıyı eşitlersek,

$$V \cdot b \cdot x = - \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \frac{dP}{dx}$$

ifadeyi integre edersek,

$P=0$ için $x=l/2$, alınır,

$$P = \frac{6 \cdot \eta \cdot V}{h^3} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right)$$

basınç değişiminin parabolik olduğu bağıntıdan görülebilir. Maksimum basınç $x=0$ içindir.

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot l^2}{2 \cdot h^3}$$

Pompa gücü hesaplanırken, $k=3.F.\frac{1}{h}$.

$$P_p = \frac{1}{\eta_m} P_b \cdot q,$$

ifadesinden yararlanılır. Burada P_b , yağ pompasının basıncı, η_m , pompa verimidir.

$$q = K_q \cdot P_c \cdot \frac{h^3}{\eta}.$$

veya

$$P_p = \frac{1}{\eta_m} \cdot K_p \left(\frac{F}{A} \right)^2 \cdot \frac{h^3}{\eta}.$$

şeklinde yazılır. Burada,

$$K_p = \frac{K_{qf}}{K_f}.$$

Gerekli toplam güç ihtiyacı,

$$P = P_s + P_p = K_s \cdot \eta \cdot \frac{v^2}{h} \cdot A + \frac{1}{\eta_m} \cdot K_p \cdot \left(\frac{F}{A} \right)^2 \cdot \frac{h^3}{\eta}.$$

olarak bulunur.

Sistemin rijitliği.

Genel ifadeye göre hidrostatik sistemlerin rijitliği,

$$k = - \frac{dF}{dh}.$$

şeklinde, bağıntıdaki eksi işareti matematiksel bir anlam taşımayıp, rijitlik değerinin pozitif olarak çıkması için konulmuştur.

$$q = K_{qf} \cdot \left(\frac{F}{A} \right) \cdot \frac{h^3}{\eta}.$$

denkleminde F hesaplanır ve bu ifadenin h ye göre türevi alınır,

$$k = - \frac{dF}{dh} = 3 \cdot \frac{1}{K_{qf}} \cdot q \cdot \eta \cdot A \cdot \frac{1}{h^4}.$$

elde edilir. Bu bağıntıdan sonuç olarak,

$$k = 3 \cdot K_f \cdot A \cdot P_c \cdot \frac{1}{h} \quad \text{veya} \quad k = 3 \cdot F \cdot \frac{1}{h}.$$

değerleri kullanılabilir.

Sonuçlar .

Elde edilen bu denklemler hidrostatik sistemlerin genel denklemleridir, bu bağıntılardan aşağıdaki sonuçları çıkarabiliriz.

$-K_f, K_q, K_{qf}, K_s, K_p$: sürtünen yüzeylerin geometrik şeklinin ve boyutlarının, yük, debi, sürtünme ve pompa gücü gibi çalışma faktörleri üzerine etkilerini ifade eden katsayılardır.

-Hidrostatik yağlama sistemlerinde sürtünme katsayısı $\mu = F/F$ şeklinde ifade edilirse, genellikle hidrodinamik yağlama sistemlerine nazaran daha küçüktür. Yani

$$\mu_{\text{hidrostatik}} < \mu_{\text{hidrodinamik}}.$$

şeklinde dir. Buna karşılık harcanan güç bakımından yalnız sürtünmeden dolayı güç kaybı değil, pompa için gerekli güç ihtiyacını da gözönünde tutmak gerekir.

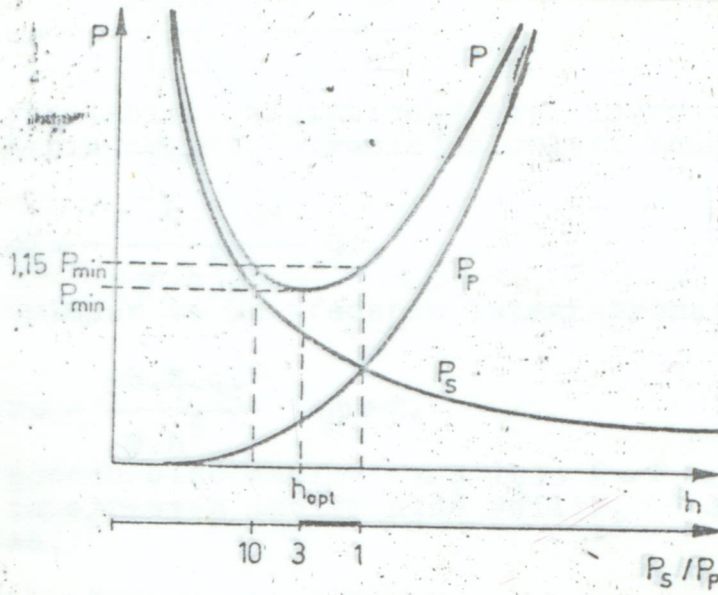
$$P = P_s + P_p = K_s \cdot \eta \cdot \frac{v^2}{h} \cdot A + \frac{1}{\eta_m} \cdot K_p \cdot \left(\frac{F}{A} \right)^2 \cdot \frac{h^3}{\eta}.$$

bağıntısının incelenmesinden görüldüğü gibi h değeri büyüdükçe, sürtünmeye bağlı güç sarfiyatı azalmakta, pompaya bağlı güç sarfiyatı ise artmaktadır. Belirli bir yağ tabakası kalınlığı (h) için toplam güç sarfiyatının minimum olması gerekmektedir. Şeki (54).

Bu değer güç sarfiyatı bakımından optimum bir değerdir, bağıntının h a göre türevi alınır, minimum güç sarfiyatına karşılık gelen minimum yağ tabakası kalınlığının optimum değeri,

$$h_{\text{opt}} = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \cdot \frac{K_s \cdot \eta_m}{K_p} \left(\frac{v \cdot \eta}{F/A} \right)^2 \cdot A}.$$

olarak bulunur.

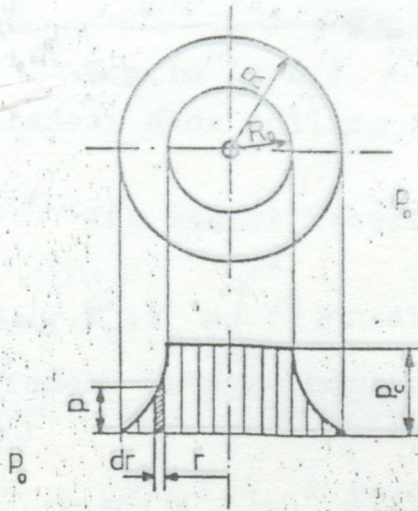


Şekil(54). Ref(2)

ifadesi bulunur. $r=R_0$ için $P=P_0$ koşulundan,

3.8.3. DAİRESEL CEPLİ SİSTEMLER.

Dairesel cepli sistemlerin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar hidrostatik ekstrüzyonda kullanabileceğimiz sonuçlardır. Şekil(55) deki sonsuz küçüklikteki bir alan için,



Şekil(55). Ref(2)

$$K_f = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - (R_0/R)^2}{\ln(R/R_0)} \right]$$

$$q = - \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dr}$$

yazılabilir, bağıntıdaki eksi işareti dP/dr basınç gradyanının negatif olmasından dolayı konulmuştur. Bu denklemden

$$dP = - \frac{6 \cdot \eta \cdot q}{\pi \cdot h^3 \cdot r} dr$$

bulunur ve bu ifadenin integrasyonu ile,

$$P = - \frac{6 \cdot \eta \cdot q}{\pi \cdot h^3} \ln R + C$$

sonucu elde edilir. $r = R$ için $P = P_0 = 0$ sınır şartlarından integrasyon sabiti elde edilir, P_0 bu değer yerine konursa,

$$P = \frac{6 \cdot \eta \cdot q}{\pi \cdot h^3} \cdot \ln \frac{R}{r}$$

ifadesi bulunur. $r = R_0$ için $P = P_c$ koşulundan,

$$P_c = \frac{6 \cdot \eta \cdot q}{\pi \cdot h^3} \cdot \ln \frac{R}{R_0}$$

yazılır, bundanda,

$$q = \frac{\pi \cdot h^3}{6 \cdot \eta \cdot \ln (R/R_0)} \cdot P_c$$

ifadesi elde edilir.

Yük taşıma kabiliyeti.

$$F = \pi \cdot R_0^2 \cdot P_c + \int_{R_0}^R (2 \pi r \cdot dr) \cdot P$$

ifadesi integre edilir ve q nun değeri yerine konursa

$$F = \pi \cdot R^2 \cdot P_c \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{1 - (R_0/R)^2}{\ln(R/R_0)} \right]$$

bulunur veya,

$$K_f = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - (R_0/R)^2}{\ln(R/R_0)} \right]$$

$A = \pi \cdot R^2$.
ifadesi ile,

$$F = K_f \cdot A \cdot P_c$$

bağıntısı bulunur.

Yük taşıma kabiliyetini hesaplayabilmek için diğer bir yol şöyle olabilir.

$$q = - \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dr}$$

olarak bulmuştuk, ayrıca,

$$q = \pi \cdot r^2 \cdot V$$

bağıntısında mevcuttur. Burada V: sürtünen yüzeylerin bağıl hızı olarak alınabilir. Bu iki eşitliğin birlikte düşünülmesiyle.

$$\pi \cdot r^2 \cdot V = - \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dr}$$

$$dP = - \frac{6 \cdot \eta \cdot V \cdot r \cdot dr}{h^3}$$

$$P = - \frac{6 \cdot \eta \cdot V \cdot r^2}{h^3} + C$$

$r = R$ için $P = 0$ sınır şartından,

$$C = \frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot R^2}{h^3}$$

bulunur, bu değer yerine konursa.

$$P = \frac{3 \cdot \eta \cdot V}{h^3} (R^2 - r^2)$$

bağıntısı bulunur. Bu bağıntıdan görüldüğü gibi basınç değişimi paraboliktir. Maksimum basınç $r = 0$ için elde edilebilir.

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot R^2}{h^3}$$

$$P_{\text{ort}} = \frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot R^2}{2 \cdot h^3}$$

Yük taşıma kabiliyeti olarak $F = \pi \cdot R^2 \cdot P_{\text{ort}}$ olarak alınır.

$$F = 147 \text{ kg}$$

$$F = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot V \cdot R^4}{2 h^3}$$

bağıntısı bulunur. Sayısal bir uygulama olarak: 200 mm çapında iki ayrı dairesel disk düşünelim. Yağlayıcı olarak 0,127 mm kalınlığında SAE 30 yağı kullandığımızı varsayalım. Sıcaklığı 20 °C olarak 340 kgf (750 lb) luk yük taşımak için gerekli hızı bulmak istiyoruz.

Yağın viskozitesi: 0,0107 kgf.s/m² (152.10⁻⁷ reyn)

$$340 = \frac{3 \cdot \pi \cdot 0,0107 \cdot V \cdot (0,1)^4}{2 \cdot (0,127)^3}$$

V = 129,5 m/s bulunur.

Aşağıdaki tabloda çeşitli film kalınlığı ve hız değerlerine karşılık gelen, taşınabilir ağırlıklar görülmektedir.

TABLO(13). Çeşitli hızlar ve film kalınlıkları için 200 mm çapındaki iki dairesel diskin taşıyabileceği yükler.^{10,11.}

Yağlayıcı film kalınlığı. h(mm).	Gerekli hız. (F 340 kg için) (m/s)	Taşıma kuvveti. (V 25 m/s için) (kg)
0,127	129,5	147
0,101	66,14	289
0,076	27,94	679
0,050	8,38	229
0,025	1,04	183
0,023	0,76	252
0,020	0,50	358

Örneğin: 200 mm çapında iki disk birbirinden 0,127 mm kalınlığında SAE 30 yağıyla ayrılmış olsun. Plakalardan biri diğerine göre 25 m/s hıza sahipse, bu plakanın ağırlık taşıyabilme kuvveti,

$$F = 147 \text{ kg} \quad \text{dır.}$$

Buradan diğer bir uygulama olarak film kalınlığının zamana bağlı değişimi incelenebilir.

$$F = - \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R^4}{2 \cdot h^3} \cdot \frac{dh}{dt}$$

olarak hesaplanmıştır. dh/dt gradyanı negatiftir, buradan

$$dt = - \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R^4}{2 \cdot F \cdot h^3} \cdot dh$$

yazabiliriz. Her iki tarafında integralini alırsak,

$$t = - \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R^4}{2 \cdot F} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h^3} = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R^4}{2 \cdot F} \left(\frac{1}{2 \cdot h^2} \right) \Big|_{h_1}^{h_2}$$

$$t = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R^4}{4 \cdot F} \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right)$$

Bu bağıntının sayısal bir uygulaması olarak, çeşitli yağ cinsleri için incelemeler yapılmıştır. Taşınan ağırlık $F = 2$ kg, kullanılan yağ, viskozitesi; $0,0107 \text{ kgf.s/m}^2$ olan kastor yağıdır.

Film kalınlığının $0,001 \text{ mm}$ den $0,0005 \text{ mm}$ ye kadar düşmesi için gerekli zamanı hesaplıyalım.¹¹

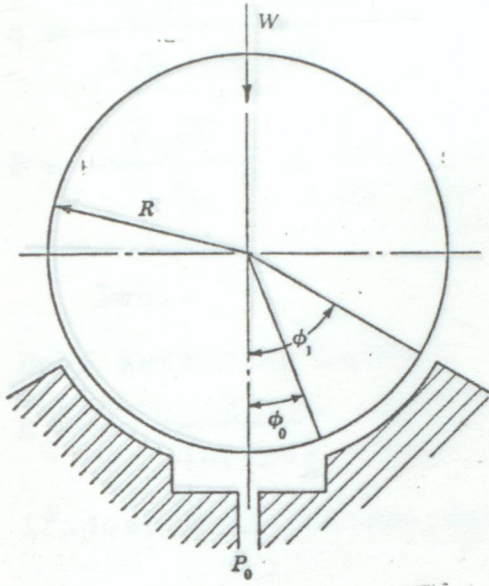
$$t = \frac{3 \cdot \pi \cdot 0,0107 \cdot (0,1)^4}{4 \cdot 2} \left(\frac{1}{(0,0005)^2} - \frac{1}{(0,001)^2} \right)$$

$t \approx 4000$ saniye hesaplanır.

Ağırlık taşıyabilme kapasiteleri üzerine yapılan incelemeleri iki değişik örnek vererek sonuçlandıralım.

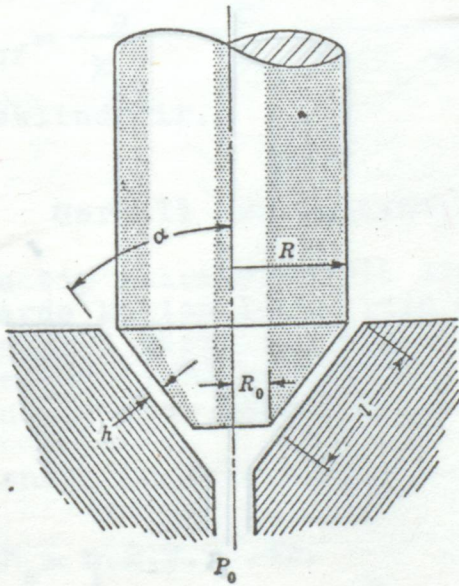
Şekil(56) daki sistem için taşınabilir ağırlık değerini hesaplamada kullanılan amprik bağıntı şöyle düzenlenebilir.¹¹

$$F = \frac{\pi \cdot P_0 \cdot R_0 \cdot (\cos \phi_0 - \cos \phi_1)}{\ln \left(\frac{\tan(\phi_1/2)}{\tan(\phi_0/2)} \right)}$$



Şekil(56). Ref(10)

Aynı araştırmacı şekil(57) deki sistem için taşınabilir ağırlık ve debi için şu bağıntıları vermiştir.



Şekil(57). Ref(10)

$$M_g = 2.7 \cdot a \cdot \frac{\pi}{2} \int r^3 \cdot dr$$

olup, buradan,

$$q = \frac{P_o \cdot \pi \cdot h^3 \cdot \sin \alpha}{6 \cdot \eta \cdot \ln R/R_o}$$

$$F = \frac{P_o \cdot \pi}{2} \left(\frac{R^2 - R_o^2}{\ln \frac{R}{R_o}} \right)$$

Debi.

Debi katsayısı için,

$$K_q = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{1}{\ln(R/R_o)}$$

ifadesi kullanılırsa, debi denklemi.

$$q = K_q \cdot P_c \cdot \frac{h^3}{\eta}$$

veya,

$$q = K_{qf} (F/A) \frac{h^3}{\eta}$$

bulunur, burada.

$$K_{qf} = \frac{K_q}{K_f} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 - (R_o/R)^2} \right)$$

şeklindedir.

Gerekli güç ihtiyacı.

Bu tip dairesel cepli sistemler genellikle dönen sistemlerde kullanıldığı için sürtünme bir sürtünme momenti ifadesiyle verilir. Dönme hareketinin olmadığı durumlarda w yerine (V/r) koyarak öteleme hareketine uygulanabilir sonuçlar elde edebiliriz.

Sonsuz küçüklükteki bir elemana ait sürtünme momenti için

$$dM_s = \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \cdot \frac{w}{h}$$

ifadesi yazılabilir, böylece sürtünme momenti.

$$M_s = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{w}{h} \int_{R_o}^R r^3 \cdot dr$$

olup, buradan.

$M_s = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \eta \cdot \frac{w}{h} (R^4 - R_o^4)$ yaz film kalınlığıdır. h min değeri olarak yüzey düzgünlüğüne bağlıdır. Genellik-
bulunur. $A = \pi \cdot R^2$ değeri yerine konursa.

$K_s = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{R_o}{R} \right)^4 \right]$ $(R_{t1} + R_{t2})$ yüzeylerin maksimum pürüzlülük de-
değerleri kullanılırsa. h için büyük değerler

hidrostatik yağlama sistemlerinde:

$M_s = K_s \cdot \eta \cdot \frac{w \cdot R^2}{h} \cdot A$ yazılır, sürtünme gücü,
ikinci sınırlayıcı $w^2 \cdot R^2$ ile ilgili olup şöyle açıkla-

$P_s = M_s \cdot w = K_s \cdot \eta \cdot \frac{w^2 \cdot R^2}{h} \cdot A$ film kalınlığı küçüldükçe debi azalır, gözönünde tutulması
ifadesi ile verilir. azalmasıyla sıcaklığın artmasıdır.

Pompa için gerekli güç ihtiyacı.

$P_p = \frac{1}{\eta_m} P_p \cdot q$ bakımından sürtünme gücü dikkate alınırsa,
gücünün minimum değerine karşılık optimum film kalınlığı
bağıntısından bulunabilir.

$$P = P_s + P_p = K_s \cdot \eta \cdot \frac{v^2}{h} \cdot A + \frac{1}{\mu_m} \cdot K_p \cdot \left(\frac{F}{A} \right)^2 \cdot \frac{h^3}{\eta}$$

bağıntısı bulunur. h için üç önemli büyüklük söz-

$$K_p = \frac{K_{qf}}{K_f} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \ln(R/R_o)}{3 \left[1 - (R/R_o)^2 \right]^2}$$

şeklindedir.

Sonuçlar.

Hidrostatik yağlamanın teorik incelemesini, hidrostatik yağ-
lama sistemlerinin genel durumlarını ve karakteristik özel-
liklerini inceledikten sonra ortaya çıkan en önemli sonuç
film kalınlığının yağlama olayına etkisidir.

Film kalınlığı h küçüldükçe sistemin yük taşıma kabiliyeti
büyümektedir. Bu nedenle büyük yük kabiliyetli sistemler
elde etmek için film kalınlığının küçük olması gerekir.
Diğer yandan film kalınlığının küçük tutulmasını sınırla-
yan olaylar mevcuttur.

Birincisi, sıvı sürtünmeyi elde etmek için film kalınlığı-
nın $h > h_{min}$ olması gerekir, burada h_{min} sıvı sürtünmeyi

4.1.2.Sabit sürtünme faktörü.

Bu kabulde takım ile malzeme arasındaki basınç dikkate alınmamakta, sabit bir kayma gerilmesi kabulü yapılmaktadır. Ayrıca kayma gerilmesinin hızdan bağımsız kaldığı kabul edilmektedir. Seçilen takım ve malzeme için, sürtünme faktörü m , sabit yüzey ve sıcaklık durumları altında sabit olarak alınmaktadır.¹⁸

$$\tau = m \cdot \frac{C_A}{\sqrt{3}}$$

Sabit sürtünme faktörü kabulü ile sürtünme kayıplarının hesaplanmasında kolaylık sağlandığı görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda m değerinin aşağıdaki sınırlar arasında kalacağı görülmüştür.

4.1.3.Hidrodinamik yağlama modeli.

Daha önce incelenen iki kabulde yağlayıcı kullanımı işletme şartlarına bağlıdır. Deformasyon esnasında temasta olan takım ve malzeme yüzeyleri hiçbir zaman mükemmel düzgünlükte değildir. Bu nedenle metal-metal teması görülmektedir.

Temas eden yüzeyler arasında yeterli bir hız sağlandığında, malzeme ile takım arasındaki yağlayıcı tabakası yayılarak iç yüzeylere doğru sürüklenir. Belirli şartlar altında oluşturulabilen hidrodinamik yağlama olayında kayma gerilmesi τ şöyle ifade edilmektedir.¹⁸

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta v}{h}$$

Bu konu daha sonra her bir proses için ayrı ayrı araştırılacaktır. Hidrodinamik yağlamanın birçok metal şekillendirme prosesi esnasında ortaya çıktığına dair kanıtlar bulunmaktadır. Konik matrislerden akış prosesleri olan: tel çekme, ekstrüzyon, hidrostatik ekstrüzyonda ve haddedeleme, hidrodinamik yağlamanın da ver aldığı her üç sürtünme kabulü ile çözümler gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, kaymalı vataklardaki yağlama olayları ile mellerin şekillendirilmeleri esnasında ortaya çıkan hidrodinamik yağlama olaylarının benzerlik içinde olduğu görülmüştür.¹⁸

4.1.2.Sabit sürtünme faktörü.

Bu kabulde takımla malzeme arasındaki basınç dikkate alınmamakta, sabit bir kayma gerilmesi kabulü yapılmaktadır. Ayrıca kayma gerilmesinin hızdan bağımsız kaldığı kabul edilmektedir. Seçilen takım ve malzeme için, sürtünme faktörü m , sabit yüzey ve sıcaklık durumları altında sabit olarak alınmaktadır.¹⁸

$$\tau = m \cdot \frac{C_A}{\sqrt{3}}$$

Sabit sürtünme faktörü kabulü ile sürtünme kayıplarının hesaplanmasında kolaylık sağlandığı görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda m değerinin aşağıdaki sınırlar arasında kalacağı görülmüştür.

4.1.3.Hidrodinamik yağlama modeli.

Daha önce incelenen iki kabulde yağlayıcı kullanımı işletme şartlarına bağlıdır. Deformasyon esnasında temasta olan takım ve malzeme yüzeyleri hiçbir zaman mükemmel düzgünlükte değildir. Bu nedenle metal-metal teması görülmektedir.

Temas eden yüzeyler arasında yeterli bir hız sağlandığında, malzeme ile takım arasındaki yağlayıcı tabakası yayılarak iç yüzeylere doğru sürüklenir. Belirli şartlar altında oluşturulabilen hidrodinamik yağlama olayında kayma gerilmesi τ şöyle ifade edilmektedir.¹⁸

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta v}{h}$$

Bu konu daha sonra her bir proses için ayrı ayrı araştırılacaktır. Hidrodinamik yağlamanın birçok metal şekillendirme prosesi esnasında ortaya çıktığına dair kanıtlar bulunmaktadır. Konik matrislerden akış prosesleri olan: tel çekme, ekstrüzyon, hidrostatik ekstrüzyonda ve haddelemede, hidrodinamik yağlamanın da ver aldığı her üç sürtünme kabulü ile çözümler gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, kaymalı vataklardaki yağlama olayları ile mellerin şekillendirilmeleri esnasında ortaya çıkan hidrodinamik yağlama olaylarının benzerlik içinde olduğu görülmüştür.¹⁸

Ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyon için bağıl ekstrüzyon kuvveti:

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} = \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} - 2.f(\alpha). \ln \frac{R_o}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2} - \cot \alpha + m.(\cot \alpha). \ln \frac{R_o}{R_f} + m. \frac{L}{R_f} \right)$$

Aynı incelemeler Coulomb sürtünme faktörü kabulüyle $\tau = \mu.p.$ koyarak, tel çekme için.

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} = \frac{\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} + 2.f(\alpha). \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2} - \cot \alpha \right)}{1 + 2.\mu. \frac{L}{R_f}} + \frac{2.\mu. \left\{ (\cot \alpha) \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right] \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right\}}{1 + 2.\mu. \frac{L}{R_f}}$$

Ekstürüzyon ve hidrostatik ekstrüzyon için bağıl ekstrüzyon kuvveti.

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} = \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} - 2.f(\alpha). \ln \frac{R_o}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2} - \cot \alpha \right) - 2\mu \left\{ (\cot \alpha) \left[1 - \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} + \ln \frac{R_o}{R_f} \right] + \left(1 - \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} \right) \cdot \frac{L}{R_f} \right\}$$

$f(\alpha)$ fonksiyonu şöyle belirlenmiştir.

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left(1 - \cos \alpha \cdot \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \right) \ln \frac{R_0}{R_f} \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}$$

Şimdiye kadar çıkarmış olduğumuz eşitliklerin tümü α ya bağlı birer fonksiyondur. Tel çekme veya ekstrüzyon kuvvetini minimum yapan α değerleri diğer değişkenlere bağlı olarak tespit edilebilir.³⁰

Yukardaki eşitliklerden birinde, $f(\alpha)$ fonksiyonu yerine konup, türevler alınırsa, tel çekme ve ekstrüzyon kuvvetini minimum yapan α_{opt} değeri bulunabilir.

$$2 \cdot \sin \alpha_{opt} \left\{ \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha_{opt}} - (\cos \alpha_{opt}) \cdot f(\alpha_{opt}) \right\} \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 2(1 - \alpha_{opt} \cdot \cos \alpha_{opt}) - m \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} \right\} = 0.$$

Yapılan bu matematiksel işlemler her bir eşitlik için tekrarlanıp, sonuçlar ortak değerlendirilirse. Tel çekme, ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyon için sabit sürtünme faktörü, m şöyle hesaplanır.³⁰

$$m = 2 \left[\frac{1 - \alpha_{opt} \cdot \cot \alpha_{opt}}{\ln \frac{R_0}{R_f}} + \sqrt{3} \cdot (\sin \alpha_{opt}) \times \left[\sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha_{opt}} - (\cos \alpha_{opt}) \cdot f(\alpha_{opt}) \right] \right]$$

Coulomb sürtünmesi kabulünde μ sürtünme katsayısı, tel çekme için şöyle belirlenir.

$$\mu = \frac{2 \left[\sin \alpha_{\text{opt}} \left\langle \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha_{\text{opt}}} - (\cos \alpha_{\text{opt}}) \cdot f(\alpha_{\text{opt}}) \right\rangle \ln \frac{R_o}{R_f} \right]}{\sigma_{\text{A}} \sqrt{\frac{\sum (\bar{\mu} - \mu)^2}{n-1}} \left(1 - \frac{\sigma_{\text{xb}}}{\sigma_{\text{A}}} \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \cdot \ln \frac{R_o}{R_f}}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{\alpha_{\text{opt}} \cdot \cos \alpha_{\text{opt}}}{\sin \alpha_{\text{opt}}} \right)$$

$$\left(1 - \frac{\sigma_{\text{xf}}}{\sigma_{\text{A}}} \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \ln \frac{R_o}{R_f}$$

Elde edilen μ değeri ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyon için de kullanılabilir.

Kudo isimli araştırmacı yaptığı araştırmalarda (m) faktörü yerine, daha kullanışlı olması bakımından belirli bir μ_{ort} katsayısı kullanılabileceğini ileri sürmüştür.

$$\mu_{\text{ort}} \cdot P_{\text{ort}} = m \cdot \frac{\sigma_{\text{A}}}{3}$$

$$\mu = \mu_{\text{ort}} = \frac{m \cdot \sigma_{\text{A}} / \sqrt{3}}{P_{\text{ort}}} = \frac{m / \sqrt{3}}{P_{\text{ort}} / \sigma_{\text{A}}}$$

$$\frac{P_{\text{ort}}}{\sigma_{\text{A}}} = 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{R_o}{H} \right) \quad \text{değeri yerine konursa ve}$$

$$\frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{\mu}{1 - \frac{2}{3} \mu \cdot \frac{R_o}{H}}$$

bağıntısı elde edilir.

Buradan m veya μ ya bağılı olarak,³⁰

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum(\bar{m} - m)^2}{n - 1}}$$

$$\sigma_\mu = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\mu} - \mu)^2}{n - 1}}$$

bağıntıları elde edilir. Bu eşitliklerden yararlanarak elde edilen değerler ile deneysel sonuçlar uygunluk içindedir.

4.2.3. Haddelme için sürtünme katsayısının belirlenmesi.

Yapılan araştırmaların büyük bir çoğunluğu band haddelmesi için olduğundan, çıkarılan sonuçlar band modeli içindir. Genişliği, kalınlığına nazaran çok fazla olan bandın haddelenmesinde başlıca amaç, kalınlığı azaltmaktır. Sacın kalınlığı azalırken, uzunluğu artmakta ve çıkan bandın hızı çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. (250 m/s ye kadar). Geniş bandların soğuk haddelenmesi, plastik biçimlendirme işlemlerinin analizlerine çok iyi bir uyum gösterdiğinden, soğuk haddelme teorisi büyük gelişmeler yapmıştır.²⁸

Analizlerde haddeler, hadde çapları, yüzey durumları, uygulanan güç ve işlem hızı yönlerinden idantik kabul edilmektedir. Plastik akış simetrik olup, haddeler enerjilerini sürtünme vasıtasıyla banda iletmektedirler. Normal haddelme işlemlerinde, band giriş esnasında haddelerden daha yavaş, çıkışta ise daha hızlı hareket etmektedir. Arada ise, hızların eşitlendiği bir tarafsız (nötral) nokta bulunmaktadır. Girişle, tarafsız nokta arasında etkimekte olan sürtünme kuvveti, bandı haddeler arasından ilerletmekte, bu sırada çıkışla tarafsız nokta arasında etkiyen sürtünme kuvveti ise, haddelme yönüne ters konumda bulunmaktadır. Giriş tarafındaki sürtünme kuvveti ile çıkış tarafındaki sürtünme kuvveti arasındaki fark, haddelme için gereken ilerletme kuvvetini sağlamaktadır. Bandı deformasyona uğratmak, ayrıca sürtünme kayıplarını yenmek için uygulanan güç, tarafsız noktanın pozisyonu ile doğrudan doğruya ilgili bulunmaktadır. Yüksek incelme değerlerinin uygulanması, tarafsız noktanın çıkışa doğru yer değiştirmesine yol açmaktadır.⁴⁴

$$m = \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \frac{\ln \frac{h_o}{h_1} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1} + \frac{\sigma_{xb} - \sigma_{xf}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A}}{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}$$

Coulomb sürtünme katsayısı kabulüyle, μ sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \frac{\ln \frac{h_o}{h_1} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1} + \frac{\sigma_{xb} - \sigma_{xf}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A}}{(\ln \frac{h_o}{h_1} - 1) \frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}} - A}$$

$$A = \left[\frac{1}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A} \left(\sigma_{xb} - \frac{\sigma_{xf} - \sigma_{xb}}{\frac{h_o}{h_1} - 1} \right) - 1 \right] \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}$$

$$\left(\frac{\sigma_{xf}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A} \right) \text{ bağıl ön germe ve } \left(\frac{\sigma_{xb}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A} \right) \text{ bağıl arka germe}$$

omak üzere, $\sigma_{xf} = \sigma_{xb} = 0$ olduğu zaman bu bağıntılar şu şekli alır.

$$m = \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \frac{\ln \frac{h_o}{h_1} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}$$

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \frac{\ln \frac{h_o}{h_1} + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}$$

Aşağıdaki tabloda, deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılarak tirmalı olarak verilmiştir. Sadece Coulomb sürtünme rejimi ve sabit sürtünme faktörü için yapılan bu inceleme, daha sonra hidrodinamik yağlama için de yapılacaktır.

Tablo(14). Konik matrislerden akışta sürtünme katsayıları.

1	2	3	4	5	6	7	8	Ref(30)
%	α_{opt}	m	$\bar{m}$	σ_m	μ	$\bar{\mu}$	σ_{μ}	
DEG. RAD.								
Düşük karbonlu çelik.								
10	6,0	.1047	.1389	.1219	.01118	.08469	.08116	.007711
15	6,5	.1134	.1057	...	...	.06647	...	...
20	8,25	.1439	.1242	...	...	.08076	...	...
25	9,25	.1614	.1213	...	...	.08191	...	...
30	10,50	.1832	.1262	...	...	.08873	...	...
35	11,00	.1919	.1148	...	...	.08453	...	...
C-1024 çeliği.								
20	7,40	.1291	.09993	.09073	.006775	.06494	.06248	.001694
25	8,00	.1396	.09067	...	...	.06114	...	...
30	8,80	.1535	.08850	...	...	.06224	...	...
35	9,40	.1640	.08377	...	...	.06165	...	...
Bakır.								
5	2,80	.04886	.06209	.06166	.003115	.03679	.04232	.004097
10	3,90	.06806	.05867	...	...	.03576	...	...
15	5,00	.08726	.06255	...	...	.03931	...	...
20	6,00	.1047	.06565	...	...	.04266	...	...
25	6,80	.1186	.06546	...	...	.04147	...	...
30	7,50	.1308	.06428	...	...	.04517	...	...
35	8,00	.1396	.06061	...	...	.04460	...	...
40	8,20	.1483	.05776	...	...	.04579	...	...
45	9,20	.1605	.05790	...	...	.04768	...	...
Hidrostatik ekstrüzyon(Avitzur.) ³⁰ SAE 30 yağı.								
25	11,0	.1919	.1717	.1839	.009497	.08670	.07439	.01277
45	16,90	.2949	.1970	...	...	.08759	...	...
60	20,00	.3480	.1819	...	...	.07204	...	...
70	23,20	.4049	.1886	...	...	.06798	...	...
80	26,00	.4037	.1801	...	...	.05764	...	...

Hidrostatik ekstrüzyon.(Avitzur)³⁰

(SAE 30 MoS₂) .

45	11,40	.1989	.08910	.1149	.0223	.03960	.04220	.003491
70	19,20	.3351	.1281	..	..	.04617	..	..
80	22,20	.3839	.1276	..	..	.04083	..	..

Hidrostatik ekstrüzyon.(Pugh)³⁰

Bakır.

50	13,00	.2268	.1002	.1127	.0112	.04297	.03858	.003864
80	21,0	.3665	.1160	..	...	.03711	..	..
85,7	23,5	.4101	.1218	...	..	.03567	..	..

Hidrostatik ekstrüzyon (Pugh)³⁰

Armco demiri.

50	14,0	.2443	.1163	.1388	.01958	.04890	.05236	.003925
66,6	20,0	.3490	.1525	..	..	.05688	..	..
75,0	22,0	.3839	.1474	..	..	.5029	..	..

Aşağıda tabloda ise haddeleme için elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar görülmektedir.

Tablo(15).Haddeleme için sürtünme katsayısı değerleri.

Ref(30)

Merdane hızı :84 fit/dak.

Hadde motor gücü:15 HP.

Hadde malzemesi: 1 - 1/2"x10",1010 karbon çeliği.

$$\sigma_{xf} = \sigma_{xb} = 0.$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12.
A	1										
	2	TC.	.750	1-5 μ	1	.1000	.0850	15,0	.0837		
	3					.0800	.0620	22,5	.0854		
	4					.0605	.0420	30,6	.0816	.0806	.0046
	5					.0505	.0320	36,6	.0787		
B	1					.0569	.0165	54,2	.0735		
	2	TC.	.781	1-10 μ	2	.1005	.0830	17,4	.0866		
	3					.0795	.0545	31,5	.0937		
	4					.0610	.0350	42,6	.0894	.0894	.0030
	5					.0510	.0205	59,8	.0880		
C	1										
	2	TC.	2,750	5-8 μ	3	.1005	.0904	10,0	.0340		
	3					.0795	.0700	11,95	.0321		
	4					.0610	.0515	15,57	.0310	.0316	.0031
	5					.0510	.0410	19,61	.0310		
						.0335	.0255	38,17	.0298		

1:Gurup adı.

2:Test numarası.

3:Hadde malzemesi.

TC:Tungsten karbid.

TC:Alaşımlı takım çeliği.

4:Hadde yarıçapı. R_0

5:Hadde yüzey pürüzlülüğü.(mikro in)

6:Kullanılan yağ cinsi. 1-STANOİL-ind.no-31

2-STANOİL-"" ""

3-LANOLİN.

7:İlk kalınlık. t_0 (in)

8:Son kalınlık. t_1 (in)

9: % redüksiyon.

10:Sürtünme katsayısı μ .

11:Ortalama sürtünme katsayısı. $\bar{\mu}$.

12:Standard sapma. σ_{μ}

Haddedelemde uygulanabilecek minimum sürtünme ve sürtünme değerlerinin ölçümü.

Haddeleme işleminin oluşumundaki tek etki, sürtünme olayı olduğuna göre, herhangi bir incelmeye karşılık bir minimum sürtünme değeri aranabilmektedir. Aranan bu değer şöyle elde edilmektedir.

$$m_{\min} = \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \frac{\ln(h_0/h_1) + \frac{1}{4} \sqrt{h_1/R_0} \cdot \sqrt{h_0/h_1 - 1} + (C_{xb} - C_{xf}) / [(2/\sqrt{3}) C_A]}{\tan^{-1} \sqrt{h_0/h_1 - 1}}$$

Uygulanabilecek minimum sürtünme, incelme, h_1/R_0 oranı, ön ve arka germenin bir fonksiyonu olmaktadır. Gerçek sürtünme, uygulanabilecek minimum değere eşit olduğunda, tarafsız nokta, çıkış düzleminde yer almış demektir. Çok kararlı olmayan bu durumda, giriş kalınlığındaki veya sürtünmedeki en küçük bir değişiklik, haddelerin band üzerinde kayması ile kayma-yapışma durumuna neden olabilmektedir. Bundan dolayı gerçek haddelemenin, uygulanabilecek minimum sürtünmenin az üzerindeki değerlerle yapılması tavsiye edilmektedir. ¹⁷

Hidrodinamik yağlamanın geçerli olması halinde ise, sürtünme olayı, yağlayıcı viskozitesi, bandın şekil değiştirme direnci ve geometrisine bağlı olmaktadır. Bütün faktörler gerçek haddeleme öncesi saptanabilirler. Metal-metal teması olduğunda, sürtünme değerlerinin, ya gerçek işlem esnasında, ya da gerçek işleme benzetilmiş proseslerden deneysel olarak sağlanması gerekmektedir. Normal haddeleme durumları için $m_{\min}$ eşitliği uygulamaya konacak olursa, sürtünme değeri kolaylıkla saptanabilmektedir. Kayma başlangıcının esas alındığı bu durum, deneysel olarak kurulabilir ve kolaylıkla tanımlanıp, normal haddeleme durumlarından ayırd edilebilir. Kayma başladığında, sürtünme değerini saptamak için aşağıdaki eşitlikler tavsiye edilmektedir.

Sabit kayma faktörünün kabulü ile elde edilen $m_{\min}$ değeri, Coulomb sürtünmesi kabulünde şu şekli alır.

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \left\{ \ln(h_0/h_1) + \frac{1}{4} \sqrt{h_1/R_0} \cdot \sqrt{h_0/h_1 - 1} + (C_{xb} - C_{xf}) / [(2/\sqrt{3}) C_A] \right\} / \left\{ \left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right) \frac{C_{xf} - C_{xb}}{\frac{2}{\sqrt{3}} C_A \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1}} - \left\langle \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{3}} C_A} \left(C_{xb} - \frac{C_{xf} - C_{xb}}{\frac{h_0}{h_1} - 1} \right) - 1 \right\rangle \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1} \right\}$$

Kayma başlangıcı sağlanabilmişse, şu faktörlerin ölçümleri gereklidir. Bağlı ön $G_{xf}/[2/\sqrt{3}G_A]$ ve arka $G_{xb}/[2/\sqrt{3}G_A]$ germeler, hadde yarıçapı R_0 , bandın giriş h_0 ve çıkış h_1 kalınlıkları. Hiçbir ön ve arka germe uygulanmamışsa, kayma olayı, yalnız küçük hadde çapları için ortaya çıkabilmektedir.

$G_{xf} = G_{xb} = 0$ olduğunda, eşitlikler şu şekli alır.

$$m = \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \frac{\ln(h_0/h_1) + \frac{1}{4} \sqrt{h_1/R_0} \sqrt{h_0/h_1 - 1}}{\tan^{-1} \sqrt{h_0/h_1 - 1}}$$

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \frac{\ln(h_0/h_1) + \frac{1}{4} \sqrt{h_1/R_0} \sqrt{h_0/h_1 - 1}}{\tan^{-1} \sqrt{h_0/h_1 - 1}}$$

$G_{xf} = G_{xb} = 0$ olduğunda sadece geometrik parametrelerin ölçümleri (h_0, h_1, R_0) gerekmektedir. Herhangi bir hadde ayağı üzerinde hiçbir ek donatım kullanmadan, sürtünme katsayısının belirlenmesi için bu ölçümler kullanılabilir.

$G_{xf} = G_{xb} = 0$ olduğu ve kaymanın başladığı durum için şu bağıntı da ileri sürülmektedir:

$$\alpha_k = 2\mu.$$

Kapma açısının α_k , band kalınlıkları ve hadde yarıçapı cinsinden ifade edilmesi ile eşitlik şu şekli alır.

$$\mu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h_0}{R_0}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1}$$

Küçük incelmeler için ve $[h_1/R_0 \leq 1]$ olduğunda, eşitlikler aynı değeri vermektedir.

Avitzur⁴⁸ un, bu konuda göstermiş olduğu deneylerde eşit kalınlıktaki bandlar, değişik hadde aralıkları ile haddelenmektedirler. Operasyonu başlatmak için, band haddeler arasına itilmektedir. Bandın tümü haddelendikten sonra, hadde aralığı daraltılarak bir başka bandın haddelenmesine geçilmekte, bu işleme kayma başlangıcına kadar devam edilmektedir. Kayma başladığında, o bandın ilk ve son kalınlıkları ile hadde yarıçapı bir tablo üzerine kaydedilmektedir. Daha sonra aynı tavlama ve yüzey durumları ve aynı yağlayıcı ile daha küçük ilk kalınlıklardaki bir başka grup bandın haddelenmesine geçilmektedir. Yine kayma başlayıncaya kadar aynı prosedür tekrarlanmakta, çeşitli ilk kalınlık guruplarındaki bandlar denenmektedir.

Her bir gurup için sürtünme değerleri hesaplanmaktadır. Ayrıca her gurup için ortalama sürtünme katsayıları belirlenmektedir. Aşağıdaki tabloda, çeşitli malzeme gurupları ve çeşitli yağlar için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir.

Yağlayıcı.	Paso no.	%Redüks.	Sürtünme kats.
Çelik için.			
Yağlayıcı kullanılmadan	2	15,0	0,085
Parafin.	2	16,5	0,080
Parafin.	3	17,0	0,068
Parafin.	2	22,0	0,060
Parafin + %1 stearik asit.	1	16,7	0,075
Parafin + %5 bakır stearat.	2	16,8	0,063
Parafin + %5 Sodyum stearat.	3	24,0	0,060
Parafin + %1 Laurik asit.	3	24,3	0,053
Parafin + %5 Sodyum oleat.	4	23,0	0,049
Parafin + %1 palmitik asit.	3	22,0	0,043
Parafin.	4	24,5	0,047
Yağ RO 546.	1	15,0	0,070
Shell P.E.6.	3	23,0	0,050
Parafin 108.	2	21,4	0,054
Motor yağı.	4	23,0	0,045
Parafin.	4	26,5	0,041
Bakır ve alagimleri.			
Yağlayıcı kullanılmadan.	1	29,0	0,093
Yağlayıcı kullanılmadan.	3	31,0	0,069
Parafin.	1	24,0	0,075
Parafin.	1	23,2	0,067
Parafin.	3	24,3	0,054
Yağ RO-950.	1	24,3	0,059
Yağ RO-40A.	2	35,0	0,046
Motor yağı.	2	34,1	0,046

Tablo(16).Soğuk haddedeleme çeşitli malzeme gurupları için sürtünme katsayısı değerleri.(Courtesy of Institution of mechanical Engineers.LONDON.)Ref(13).

Yağlayıcı.	Paso no.	%Redüks.	Sürtünme kats.
-----	-----	-----	-----
Çelik için.			
Yağlayıcı kullanılmadan	2	15,0	0,085
Parafin.	2	16,5	0,080
Parafin.	3	17,0	0,068
Parafin.	2	22,0	0,060
Parafin + %1 stearik asit.	1	16,7	0,075
Parafin + %5 bakır stearat.	2	16,8	0,063
Parafin + %5 Sodyum stearat.	3	24,0	0,060
Parafin + %1 Laurik asit.	3	24,3	0,053
Parafin + %5 Sodyum oleat.	4	23,0	0,049
Parafin + %1 palmitik asit.	3	22,0	0,043
Grafit.	4	24,5	0,047
Vac RO 546.	1	15,0	0,070
Shell P.E.6.	3	23,0	0,050
Paranox 108.	2	21,4	0,054
Kastor yağı.	4	23,0	0,045
Lanolin.	4	26,5	0,041
Bakır ve alaşımları.			
Yağlayıcı kullanılmadan.	1	29,0	0,093
Yağlayıcı kullanılmadan.	3	31,0	0,069
Su.	1	26,0	0,075
Parafin.	1	23,9	0,067
Grafit.	3	36,8	0,054
Vac.RO-950.	1	26,9	0,059
Vac.RO-40A.	2	35,0	0,056
Kastor yağı.	2	34,1	0,046

4.3. Yapılan sürtünme kabulleri için sürtünme kayıplarının Pirine ve alasımları. ve bu değerlerin karşılaştırılması.

Yağlayıcı kullanılmadan.	1	15,1	0,093
Parafin.	1	15,0	0,067
Su.	1	29,2	0,061
Grafit.	2	27,8	0,049
Vac.RO-950.	4	22,2	0,052
Vac.RO-40A.	3	22,4	0,059
Lanolin.	5	28,0	0,043

Alüminyum ve alasımları.

Yağlayıcı kullanılmadan.	1	23,5	0,092
Yağlayıcı kullanılmadan.	4	22,0	0,099
Parafin.	1	24,5	0,081
Parafin.	3	28,3	0,069
Parafin %1 oléic asit.	1	24,8	0,059
Parafin %5 Kalsiyum stearat.	4	30,0	0,080
Parafin %5 Sodyum stearat.	3	27,9	0,059
Grafit.	1	33,5	0,055
Palmitik asit.	1	24,0	0,066
Kastor yağı.	3	21,6	0,057
Lanolin.	4	25,4	0,025

Şekil (52). Hız süreksizlik yüzeyleri ve kuvvetler. Ref (11)

Yüzeyi boyunca oluşan hız süreksizliği, birleştirilen malzemenin hareket etmesini sağlar. Bu yüzey boyunca malzemenin kayma dayanımı $\tau_{max} = \sigma_A / \sqrt{3}$ (V. Mises), kaymaya karşı direnci oluşturur. Buna ilişkin güç tüketimi de, kayma gerilmesiyle, hız süreksizliği çarpımının, $\int \tau_{max} \cdot v_s \cdot ds$ yüzeyi üzerindeki integrasyonu ile hesaplanır. Şekil 52

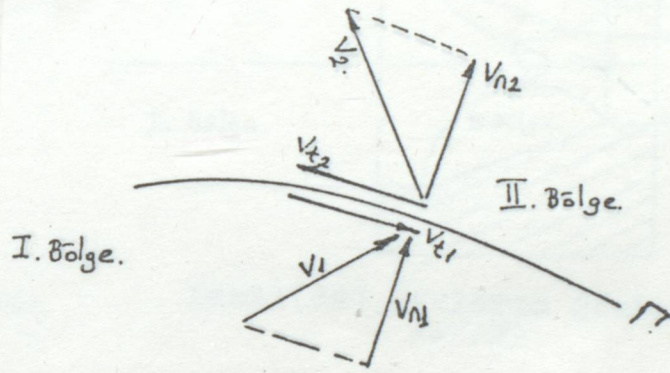
$$W_s = \int \tau_{max} \cdot v_s \cdot ds$$

Buradaki W_s : hız süreksizlik yüzeyleri boyunca kayma güç harcamaları olmaktadır. Malzeme dış yüzeyi sınır-
layan takımla hızı, burada geçerli olan hız olmaktadır. Şekil 52

4.3.Yapılan sürtünme kabulleri için sürtünme kayıplarının hesaplanması ve bu değerlerin karşılaştırılması.

Gerilme gücünün sağlanmasında bir hız alanının tariflenmesi esastır.Burada deformasyona uğratılan kütlenin çeşitli bölgelere ayrılması etüdlerde kolaylık sağlar.Bu bölgelerin her birinde de hız alanı ve türevlerinin sürekli olması gerekmektedir.Tariflenen hızın iki komşu bölgedeki ifadeleri özdeş olmamakla birlikte,iki komşu bölge arasındaki sınırda,normal bileşenlerin sürekli olması gerekmektedir.Sınır yüzeyine paralel konumlarda ise hız süreksizlikleri oluşabilir.Sınır üzerindeki her noktada v_1 ,birinci bölgedeki, v_2 ,ikinci bölgedeki hızları gösterebilir ve bunlar birbirinden farklı olsun.Bu hızlar v_{n1},v_{n2} normal ve v_{t1},v_{t2} teğetsel bileşenlerine ayrıldıklarında: $v_{n1}=v_{n2}$ olması gerekmektedir.Hız süreksizliği şu farkla tanımlanır.

$$\Delta V = v_{t1} - v_{t2} .$$



Şekil(58).Hız süreksizlik yüzeyindeki kuvvetler. Ref(17)

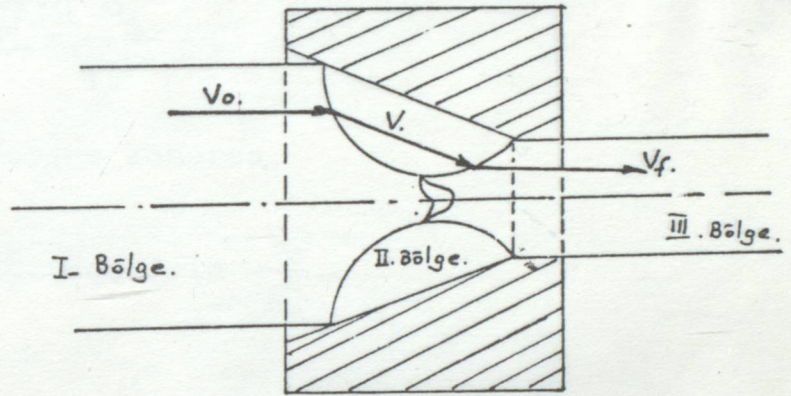
Γ yüzeyi boyunca oluşan hız süreksizliği,biçimlendirilen malzemenin hareket etmesini sağlar.Bu yüzey boyunca malzemenin kayma dayanımı $\tau_{max} = \sigma_A / \sqrt{3}$. (V.Mises), kaymaya karşı direnci oluşturur.Buna ilişkin güç tüketimi de; kayma gerilmesiyle,hız süreksizliği çarpımının, Γ süreksizlik yüzeyi üzerindeki integrasyonu ile hesaplanır. Şekil(59).

$$W'_s = \int_{\Gamma} \tau \cdot |\Delta V| \cdot ds .$$

Buradaki W'_s :hız süreksizlik yüzeyleri boyunca hesaplanan kayma güç kayıpları olmaktadır.Malzeme dış yüzeyini sınırlandıran takımın hızı,burada geçerli olan hız olmaktadır.Şe-

killendirilen malzame için,kabul edilen hız alanının normal bileşeni,temas yüzeyindeki takım hızı normal bileşeni-ne eşittir.Kabul edilen hız alanı modeli,uygun hız süreksizlikleri gösterdiğinde ve sınır hız değerleri ile uyumlu olduğunda,buna "uygun kinematik hız alanı" veya"uygun hız alanı " denmektedir.Herhangi bir plastik biçimlendirme prosesinin analizi için,bu hız alanı modelinin belirlenmesi esastır.Hız alanında, süreksizlik yüzeyi üzerinde gereksiz bir biçimlendirme (kırılma,kopma) olduğunda 1.ve 11.bölgelerdeki normal hız bileşenleri eşit kalmamış demektir.

4.3.1.Tel çekme ve ekstrüzyonda,sabit sürtünme faktörü kabulüyle,sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.



Şekil(59).Hızların gösterilişi.
Ref(18)

Γ_1 yüzeyi boyunca:

$$\Delta V = v_f \cdot \sin \theta.$$

Γ_2 yüzeyi boyunca:

$$\Delta V = v_0 \cdot \sin \theta.$$

Γ_3 yüzeyi boyunca:

$$\Delta V = v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2}.$$

Γ_4 yüzeyi boyunca:

$$\Delta V = v_f.$$

$$\begin{aligned} W_{sl-2} &= \int_{\Gamma_1} \tau \cdot \Delta v \cdot ds = \int_{\Gamma_1} \tau \cdot \Delta v \cdot dA + \int_{\Gamma_2} \tau \cdot \Delta v \cdot dA \\ &= 4 \cdot \pi \cdot r_f^2 \cdot v_f \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \int_{\theta=0}^{\alpha} \sin^2 \theta \cdot d\theta. \end{aligned}$$

$$W_{s1-2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot \pi \cdot v_f \cdot r_f^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha.)$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right).$$

$$\Gamma_3 \text{ hız süreksizlik yüzeyi boyunca } \Delta V = v_f \cdot \frac{r_f}{r^2} \cos \alpha.$$

$$\Delta V = v_f \cdot \left(\frac{R_f}{R} \right)^2 \cdot \cos \alpha.$$

$$ds = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{dR}{\sin \alpha}.$$

$$\text{sabit sürtünme için: } \tau = m \cdot \frac{\sigma_A}{\sqrt{3}}.$$

Konik yüzeyler boyunca sürtünme güç kaybı: Tel çekme için, bulunan bu değerler yerine konursa,

$$W_{s3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot m \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot (\cot \alpha) \cdot \ln \frac{R_0}{R_f}.$$

Ekstrüzyon için;

$$W_{s4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot m \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f \cdot L.$$

Bu değerlerden yararlanarak toplam sürtünme güç kaybı:

$$W_s = W_{s1,2} + W_{s3} + W_{s4} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + \right.$$

$$\left. + m \cdot \cot \alpha \cdot \ln \frac{R_0}{R_f} + m \cdot \frac{L}{R_f} \right)$$

Bu eşitliklerden güç eşitliğine geçilirse,
Tel çekme için:

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} = \left[\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} + 2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \right]$$

4.3.2. Tel çekme ve ekstrüzyonda, Coulomb sürtünme rejimi kabulüyle sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.

Tel çekme prosesinde, şekillendirilen malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme olaylarının analizi için Coulomb rejimini seçelim.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_{ee}.$$

Kalıp yüzeyindeki normal kuvvet σ_{ee} , sürtünmesiz durumda aşağıdaki değere eşittir. Bu eşitlik Sachs tarafından denge tekniğinden yararlanılarak çıkarılmıştır.

$$\sigma_{ee} = \sigma_{xb} + \sigma_A \left(\ln \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 - 1 \right)$$

Konik yüzeyler boyunca sürtünme güç kaybı: Tel çekme için,

$$W_{s3} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \cot \alpha \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \cdot \sigma_A \cdot \ln \frac{R_o}{R_f}.$$

Ekstrüzyon için;

$$W_{s3} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \cot \alpha \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \cdot \sigma_A \cdot \ln \frac{R_o}{R_f}.$$

Silindirik yüzeyler boyunca Von Mises akma kriterine göre, $p = \sigma_A - \sigma_{xf}$, sürtünme kaybı ise:

$$W_{s4} = \int \tau \cdot \Delta V \cdot ds = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot v_f \cdot R_f^2 \cdot \frac{L}{R_f} \cdot (\sigma_A - \sigma_{xf})$$

Bu eşitliklerden güç eşitliğine geçilirse, Tel çekme için:

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} = \left[\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} + 2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} - \cot \alpha \right) \right]$$

$$2\mu \left[(\cot \alpha) \left\{ 1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} - \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) \right\} \cdot \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) + \frac{L}{R_f} \right]$$

Tattersal kalıp ile şekillendirilen malzeme yüzeyi arasında bir yağ filmi oluşturarak şekillendirmeyi araştırdı. Hidrodinamik (1 + 2μ.L/R_f) hidrostatik ekstrüzyon analizleri ise Hillier tarafından yapılmıştır.

Ekstrüzyon için, önce bir yağ filmi ile engellendiği zaman, kalıp ile iş parçası arasındaki kayma gerilmesi,

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} = \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} - 2.f(\alpha) \cdot \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right)$$

$$-2\mu \left[(\cot \alpha) \left\{ 1 - \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} + \ln \frac{R_o}{R_f} \right\} \cdot \ln \frac{R_o}{R_f} + \left(1 - \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} \right) \frac{L}{R_f} \right]$$

Optimum α açısı ardışık yaklaşım metoduyla bulunabilir. Bu değer, çekme kuvvetini minimum yapan değer olduğu gibi, küçük α açıları için.

Kalibin en yüksek yerindeki ortalama hız:

Tel çekmede.

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \mu \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \cdot \ln \frac{R_o}{R_f}}$$

Ekstrüzyon için,

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \mu \left(1 - \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} + \ln \frac{R_o}{R_f} \right) \cdot \ln \frac{R_o}{R_f}}$$

bu eşitlikte v'nin değeri yerine konursa,

$$v_1 = v_f \cdot r_f^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h}{r}$$

Çıkıştaki yağ kalınlığı ε ise ve kalıbın bölme yüzeyi yarı-çapı R_f ise, çıkıştaki malzeme yarıçapı R_p - ε dir. Kalibin konik ayırma yüzeyindeki yağ filmi kalınlığı, r - r_p olarak,

$$h_f = \frac{\epsilon}{\cos \alpha}$$

cos α

Film kalınlığı r nin bir fonksiyonudur.

4.3.3. Tel çekme ve ekstrüzyonda ,hidrodinamik yağlama uygulaması ile sürtünme gücü kayıplarının hesabı.

Tattersal, kalıp ile şekillendirilen malzeme yüzeyi arasında bir yağ filmi oluşturarak şekillendirmeyi araştırdı. Hidrodinamik yağlamalı hidrostatik ekstrüzyon analizleri ise Hillier tarafından yapılmıştır.

Metalsel temas ince bir yağ filmi ile engellendiği zaman, kalıp ile is parçası arasındaki kayma gerilmesi,

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta v}{h}$$

olarak bulunmuştur. h ; yağ filmi kalınlığıdır ve çok incedir. Yağın kalıp yüzeyine yapıştığı zamanki hızı sıfırdır, yağın, hareket halindeki malzeme yüzeyine yapışma hızı, direkt olarak, yapışma başlangıcından, kalıbın en yüksek yerine doğru artar.

$$v = v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

Kalıbın en yüksek yerindeki ortalama hız:

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

Kalıp çevresi boyunca,

$$R = r \cdot \sin \alpha$$

h aralığı, yağlamanın oluşma, yağın akma aralığıdır.

$$V_1 = 2 \cdot \pi \cdot r(\sin \alpha) \cdot h \cdot \bar{v}$$

bu eşitlikte $\bar{v}$ nin değeri yerine konursa,

$$V_1 = v_f \cdot r_f^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h}{r}$$

Çıkıştaki yağ kalınlığı ϵ ise ve kalıp bölme yüzeyi yarıçapı R_f ise, çıkıştaki malzeme yarıçapı $R_f - \epsilon$ dur. Kalıbın konik ayırma yüzeyindeki yağ filmi kalınlığı, $r = r_f$ olarak,

$$h_f = \frac{\epsilon}{\cos \alpha}$$

Film kalınlığı r nin bir fonksiyonudur.

$$h = h_f \cdot \frac{r}{r_f} = \frac{\epsilon}{\cos \alpha} \cdot \frac{r}{r_f}$$

burada h kalınlığı sabit kabul edilebilir. Kayma kaybı, kalıp iç yüzeyiyle iş parçası arasındaki sürtünme güç kaybını veren temel ifadenin integrasyonu ile hesaplanabilir.

$$W_s = \int_s \tau \cdot \Delta V \cdot ds$$

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta V}{h}$$

$$\Delta V = v = v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2} = v_f \cdot \left(\frac{r_f}{R} \right) \cdot \cos \alpha$$

$$ds = 2\pi \cdot R \cdot \frac{dR}{\sin \alpha}$$

$$h = \frac{r}{r_f} \cdot \frac{\epsilon}{\cos \alpha} = \frac{R}{R_f} \cdot \frac{\epsilon}{\cos \alpha}$$

bu değerler yerine konursa,

$$W_s = \int_{R=R_f}^{R_0} \eta \cdot \frac{(v_f(R_f/R)^2 \cdot \cos \alpha)^2}{(R/R_f)(\epsilon/\cos \alpha)} \cdot 2\pi R \cdot \frac{dR}{\sin \alpha}$$

$$= 2\pi \cdot v_f^2 \cdot R_f^5 \cdot \frac{\cot \alpha}{\epsilon} \cos^2 \alpha \int_{R_f}^{R_0} \eta \cdot \frac{dR}{R^4}$$

bulunur. Viskozite sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonudur, bu prosesin izotermal bir proses olduğu kabulüyle ve kalıp yüzeyleri boyunca, basınç değişiminin önemsiz olduğu durumlarda, viskozitenin sabit olduğu kabul edilirse,

$$W_s = \frac{2}{3} \pi \cdot v_f^2 \cdot R_f^5 \cdot \cot \alpha (\cos^2 \alpha) \cdot \frac{\eta}{\epsilon} \left[1 - \left(\frac{R_f}{R_0} \right)^3 \right]$$

bağıntısı bulunur. Aynı yöntemle, silindirik bölme yüzeyli kalıplar için sürtünme kaybı,

$$W_s = 2\pi R_f \cdot L \cdot \frac{\eta}{\epsilon} \cdot v_f^2$$

Kalıptan çıkan malzemenin son çapı: $(R_f - \epsilon)$ ilgili bağıntılardan yararlanılarak bulunabilir.

Bu sonuçlar güç eşitliklerinde yerine konursa,

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{xf}}{\sigma_A} &= \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_A} + 2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln(R_o/R_f) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \\ &+ 2 \cdot f(\alpha) \cdot \ln\left(1 + \frac{\epsilon}{R_f}\right) + 2 \frac{v_f \cdot \eta}{R_f \cdot \sigma_A} \left[\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot (R_f/R_o)^3 + \frac{L}{R_f} \right] \\ &+ 2 \cdot \frac{v_f \cdot \eta}{(\epsilon/R_f) R_f \cdot \sigma_A} \left[\frac{\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3} \left[1 - (R_f/R_o)^3 \right] + \frac{L}{R_f} \right] \end{aligned}$$

ϵ aralığı çok küçükse, sürtünme kaybı artar, eğer ϵ aralığı çok genişse, deformasyon kuvveti fazlalaşır. Çekme kuvveti σ_{xf} , ϵ nun bir fonksiyonu olarak minimum durum gösterir.

Bu minimum aşağıdaki bağıntıların yardımı ile bulunabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\sigma_{xf}/\sigma_A)}{\partial(\epsilon/R_f)} &= 0 = 2 \cdot f(\alpha) - 2 \frac{v_f \cdot \eta}{(\epsilon/R_f)^2 \cdot R_f \cdot \sigma_A} \\ &\left[\frac{\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3} \left\{ 1 - (R_f/R_o)^3 \right\} + \frac{L}{R_f} \right] \\ \frac{\epsilon}{R_f} &= \sqrt{\frac{v_f \cdot \eta}{R_f \cdot \sigma_A} \cdot \frac{1}{f(\alpha)} \left[\frac{\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3} \left\{ 1 - \left(\frac{R_f}{R_o}\right)^3 \right\} + \frac{L}{R_f} \right]} \end{aligned}$$

Yapılan bu analizden elde edilen sonuçlar şunlardır:

Kalıpla iş parçası arasında sürekli bir yağ tabakası oluşturabilmek için kritik bir hıza erişilmelidir. Bu hız metal metal temas yüzeyi arasında olacaktır, ayrıca Coulomb sürtünme faktörü ve sabit sürtünme faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır. Kritik hıza ulaşıldığı veya geçildiği za-

man hidrodinamik yağlama başlar. Koni açısının genişlemesi ve sıvı hızının azalması, sabit bir çekim hızı sağlar. Çok geniş koni açılarında, çıkış hızı v_f , kritik hıza ulaşacak kadar büyük bir sıvı hızı sağlayamaz. Hidrodinamik yağlama küçük koni açılarıyla ilişkilidir.

$(v_f \cdot \eta / R_f \cdot \sigma_A)$ faktörü boyutsuzdur, yağlama olayını çok yakından etkiler. Bu terim yükselirken, kalıpla çalışma parçaları arasındaki mesafe artar, hidrodinamik yağlamanın oluşması için elverişli bir durum ortaya çıkar. η nın ve v_f hızının yükselmesi, R_f değerinin ve σ_A değerinin düşmesi; aralığın ve çekim gücünün artmasına neden olur.

Örneğin: koni açısının, çıkış hızının, akma gerilmesinin ve viskozitenin sabit olarak azaldığı bir durumda, daha küçük R_f için daha yüksek çekim güçleri gerekmektedir. Wistreich yaptığı araştırmalarda, çıkıştaki tel çapının kalıp çapından daha düşük olduğunu görmüştür. Hidrodinamik yağlamanın varolduğu bir proseste, bu boyut farkı, yağ kalınlığı ϵ a esittir.

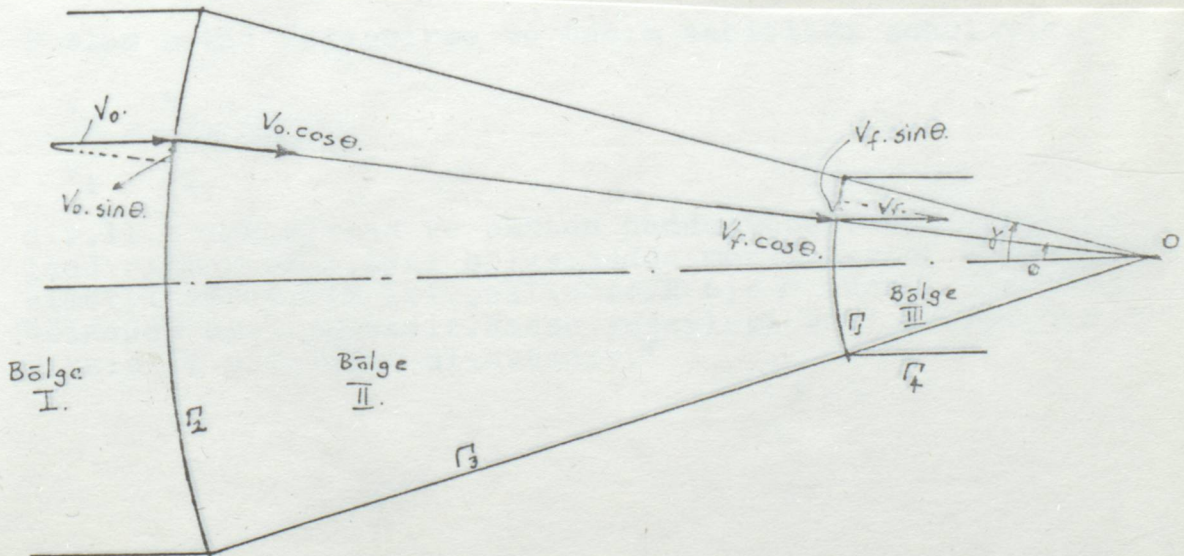
Hidrodinamik yağlamanın başlaması için gerekli hızı veren bağıntıyı tekrar etüd edersek,¹⁸

$$v = v_f \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2} \quad v_o = v_f \cdot (R_f / R_o)^2.$$

R_f : Çıkıştaki tel çapı.

R_o : Giriş tel çapı.

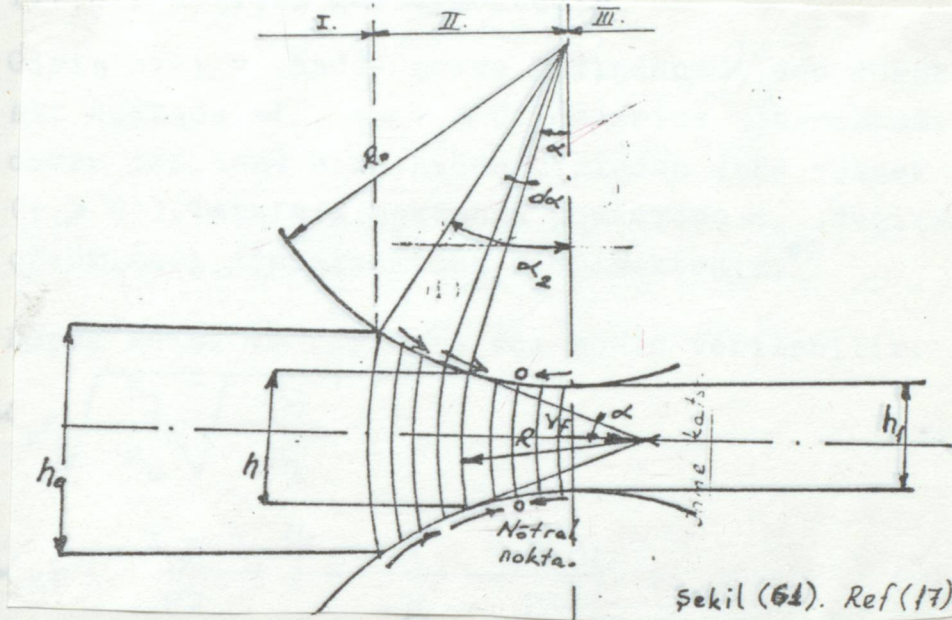
$$r / r_f = R_o / R_f. \quad r_f = R_f / \sin \alpha.$$



Şekil(60). Hız süreksizlik yüzeyleri ve kuvvet Ref(18)

4.3.4. Haddemele prosesinde sürtünme gücü kayıplarının hesaplanması.

Haddemele olaylarının analizi için, uygun bir kinematik hız alanının seçimi gereklidir. Sac bantların genişliği kalınlığına göre çok fazla olduğundan, yanal genişleme ihmal edilebilecek kadar küçük olmakta, düzlem şekil değiştirme kabul edilebilmektedir. Avitzur'un analizinde kullandığı hız alanı, şekil (64)deki gibidir.



Şekil (64). Ref (17)

Buradaki I ve III bölgelerde, yalnızca boyuna bileşenlerle ifade edilen, aşağıdaki uniform hız alanları doğmaktadır.

I. Bölgede:

$$v = v_0.$$

III. Bölgede:

$$v = v_1.$$

Düzlem şekil değiştirme ve hacim sabitliği kabulüyle:

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{h_0}{h_1}$$

dir. II. bölge, alttan ve üstten hadde yüzeyleri ile sınırlandırılmaktadır. Aynı bölge, hadde merkezlerini birleştiren simetri eksenine III., silindirik bir Γ yüzeyi ile de I. bölgeden ayrılmaktadır. Hadde yüzeyleri ve Γ yüzeyi, hız süreksizlik yüzeyleri olmaktadır.

11. bölgede, haddeler üzerinde alınan, birbirine zıt simetrik herhangi iki noktayı birleştiren yay boyunca, silindirik bir simetri doğmaktadır. Yaylar eksantrik olup, herbiri hadde yüzeyi ile bir dik açı altında birleşmektedir. Seçilen noktanın çıkışa doğru ilerlemesi ile, bu yayların yarıçapları da artmaktadır. Herhangi bir yay üzerinde alınan bir nokta, yaya normal ve yayın merkezi yönünde hareket etmektedir. Bir komşu yaya yaklaşıp malzemenin hızı artmakta ve yön değiştirmektedir. Bu şekilde, girişten çıkışa doğru hareket esnasında, hız yavaş yavaş artarken, yönü de hafif bir değişim göstermektedir.

Giriş hızı v_0 , hadde çevre hızından U' den düşük olup, tarafsız noktada α_t , $v = v_0 = U'$, değerine ulaşmaktadır. Çıkışa doğru ise, band hızı, hadde hızından daha yüksek olmaktadır. ($v_1 > U'$). Tarafsız noktanın pozisyonu α_t , değişken olarak çözümlenip, minimizasyona gidilmektedir.

Kapma açısı ve tarafsız açı şöyle verilebilir.

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{h_1}} - 1.$$

$$\alpha_t = \left(\frac{h_0 - h_1}{2R} \right)^{1/2} - \frac{1}{\mu} \frac{h_0 - h_1}{2R}.$$

Band haddelenmesinde, kalınlık h_0, h_1 , haddelene oranı $h_1/R_0 \ll 1$ ve incelme, $h_0/h_1 - 1 \ll 1$, değerleri küçük olmaktadır. Ayrıca, eşitlikten de görüleceği gibi kapma açısı da küçük kalmaktadır.

Band kalınlığı h , açısal pozisyonun (α) fonksiyonu olarak şöyle ifade edilebilir.

$$h = h_1 + 2R_0(1 - \cos\alpha).$$

küçük açılar için:

$$\sin\alpha \approx \alpha, \cos\alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}.$$

yazılabilmektedir. buna göre $h = f(\alpha)$ bağıntısı tekrar düzenlenirse.

$$h = h_1 + R_0 \cdot \alpha^2 = R_0 \left(\frac{h_1}{R_0} + \alpha^2 \right) = h_1 \left(1 + \frac{R_0}{h_1} \alpha^2 \right).$$

Hacım sabitliğinden,

$$v_h = v_1 h_1 = v_t h_t = U' \cdot h_t.$$

olmaktadır. Böylece II. bölgedeki hız alanı:

$$v = \frac{v_1 \cdot h_1}{R_o} \cdot \frac{1}{h_1/R_o + \alpha^2} = v_t \frac{h_1/R_o + \alpha_t^2}{h_1/R_o + \alpha^2} = U' \cdot \frac{h_1/R_o + \alpha_t^2}{h_1/R_o + \alpha^2}$$

olur. I. ve III. bölgelerde, gerinim hızları sıfır olup, bu bölgelerde hiçbir şekil değiştirme işi yoktur. II. bölge için gerinim hızları şöyle hesaplanmıştır.

$$\epsilon'_R = -\epsilon'_\theta = 2 \left(\frac{h_1}{R_o^2} \right) U' \cdot \frac{\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^2}$$

$\epsilon'_{ij} = 0$, yani diğer tüm bileşenler sıfır olmaktadır.

Kayma yüzeyi boyunca hız süreksizliği:

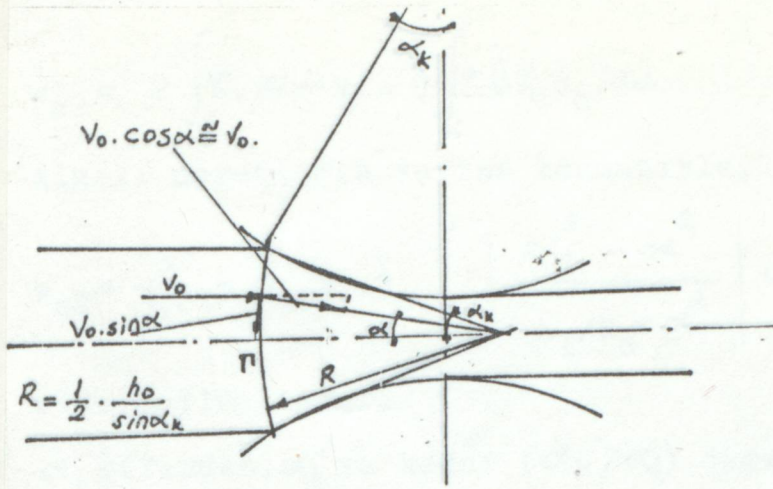
$$\Delta V = v_o \cdot \sin \alpha \approx v_o \cdot \alpha.$$

kayma gerilmesi, $\tau = \sigma_A / \sqrt{3}$ den fazla olamamakta, Γ nin uzunluğu da yaklaşık olarak $ds \approx R \cdot d\alpha$ olarak alınabilmektedir. Burada;

$$R \approx \frac{h_o}{2} \cdot \frac{\sqrt{R_o/h_1}}{\sqrt{h_o/h_1 - 1}} \quad \text{olmaktadır.}$$

Kayma güç kaybı, temel eşitliğe göre şöyle hesaplanabilir,

$$W_{sl} = \int_s \tau \cdot \Delta V \cdot ds = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot v_o \cdot h_o \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_o/h_1}{h_o/h_1 - 1}} \cdot \int_{\alpha=0}^{\alpha_k} \alpha \cdot d\alpha.$$



Şekil(62).Hız süreksizliği sınır yüzeyi.
Ref(18)

Buradan şu sonuç elde edilir.

$$W_{sl} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot v_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt{\frac{R_0/h_1}{h_0/h_1 - 1}} \cdot \alpha_k^2.$$

α_k değeri yerine konursa, şu sonuç elde edilir.

$$W_{sl} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_A \cdot U' \cdot h_1 \left(1 + \frac{R_0}{h_1} \cdot \alpha_t^2\right) \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1}$$

Kapma yüzeyi üzerinde, hadde çevre hızı U' ve band hızı v , daha önce belirlenmişti. Band ile haddeler arasındaki bağıl hız ise şöyle olmaktadır.

$$\begin{aligned} \Delta V = v - U' &= U' \left(\frac{h_1/R_0 + \alpha_t^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} - 1 \right) \\ &= U' \cdot \frac{\alpha_t^2 - \alpha^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} = U' \cdot \frac{(R_0/h_1) \alpha_t^2 - (R_0/h_1) \alpha^2}{1 + (R_0/h_1) \cdot \alpha^2} \end{aligned}$$

Sabit sürtünme faktörü $\tau = m \cdot \sigma_A / \sqrt{3}$ kabulüne göre, kapma yüzeyindeki kayma kayıpları şöyle olmaktadır.

$$W_{s2} = 2 \int_0^{\alpha_t} \tau \cdot |dv| \cdot ds = 2 \int_0^{\alpha_t} \tau \cdot |dv| \cdot R_0 \cdot d\alpha.$$

ilgili değerlerin yerine konmasıyla,

$$W_{s2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m \cdot \sigma_A \cdot U' \cdot R_0 \int_0^{\alpha_t} \left| \frac{\alpha_t^2 - \alpha^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} \right| d\alpha.$$

elde edilmektedir.

α ; sıfırdan, α_k 'ya kadar ($\alpha_k > \alpha_t$) değer aldığı anda, integrale edilecek terim işaret değiştirmektedir. İntegralin iki ayrı pozitif integrale ayrılması ile şu durum ortaya çıkar.

$$W_{s2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m \cdot \sigma_A \cdot U' \cdot R_0 \cdot \left(\int_0^{\alpha_t} \frac{\alpha_t^2 - \alpha^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} d\alpha - \int_{\alpha_t}^{\alpha_k} \frac{\alpha_t^2 - \alpha^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} d\alpha \right)$$

ifadenin düzenlenmesi, $\alpha=0$, α_t integralini, her iki integrale, bir pozitif bir de negatif olarak ilave edecek olursak. Çıkan sonucun integrali alındıktan sonra, çeşitli dönüşümlerin kullanılması ile şu sonuç elde edilir.

$$W_{s2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m \cdot \sigma_A \cdot U' \cdot R_0 \left\{ \left(1 + \frac{R_0}{h_1} \alpha_t^2 \right) \cdot \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \left(2 \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_0}{h_1}} \alpha_t \right) - \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_0}{h_1}} - 1 \right\} + (\alpha_k - 2\alpha_t).$$

Takımla(hadde) ile malzeme arasındaki sürtünme olayları Coulomb sürtünme rejimi ile açıklanırsa:

$$\tau = \mu \cdot p_{ort} = 2 \cdot \mu \left[\left(1 - \frac{1}{3} \frac{\sigma_{xf} + 2\sigma_{xb}}{(2\sqrt{3}) \sigma_A} \right) \frac{\exp(\mu \cdot L/h) - 1}{\mu \cdot L/h} \right] \cdot \frac{\sigma_A}{\sqrt{3}}.$$

Elde edilen bu değeri, haddelerle band arasındaki sürtünme gerilmesini ifade etmektedir.

Burada L, kapma uzunluğudur.

5. HADDELEME PROSESİNDE SÜRTÜNME ENERJİSİ KAYIPLARI.

Hadde aralığındaki enerji kaybı şu faktörlere bağlıdır.

- 1-Haddelenen malzeme cinsi.
- 2-İş merdanelerinin yüzey durumu.
- 3-Haddelenen malzemenin fiziki yüzeyi.
- 4-Kullanılan yağlayıcının yağlama özelliği.
- 5-Ezme oranı(yüzde şekil değiştirme miktarı.)
- 6-İş merdanelerinin çapı.
- 7-Tatbik edilen ön ve arka germelerin büyüklüğü.
- 8-Malzemenin giriş kalınlığı.

Üst sınır teoreminden yararlanılarak yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen verilerden,gerekli güç hesaplanırken,aşağıdaki dört ayrı terimin toplanması gerektiği ortaya çıkarılmıştır.

$$J = W_i' + W_s' + W_e' + W_f'$$

Burada:

$$W_i' = \frac{2}{\sqrt{3}} C_A \cdot U' \cdot h_1 \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}$$

iç deformasyon için gerekli ideal güçtür.

$$W_s' = \frac{2}{\sqrt{3}} C_A \cdot U' \cdot h_1 \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1} \right)$$

ise,iç yüzeylerdeki kayma hareketlerinin gösterdiği hız süreksizliklerine karşılık gerekli güçtür.Bu güç iç distorsiyonun bir ölçüsü olmakta ve bazı durumlarda fazladan bir iç sapma gücü olarak nitelendirilmektedir.

$$W_e' = \frac{2}{\sqrt{3}} C_A \cdot U' \cdot h_1 \cdot \frac{C_{xb} - C_{xf}}{(2/\sqrt{3}) C_A}$$

ifadesi de,uygulanan dış germeleri yenmek için gerekli güç olmaktadır.

$$W_f' = \frac{2}{\sqrt{3}} C_A \cdot U' \cdot h_1 \left[\frac{m}{\sqrt{h_1/R_0}} \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1} \right]$$

gücü ise, band ile haddeler arasındaki sürtünme kayıplarını yenmek için gereklidir.

Haddeleme olayı iki düzgün yüzeyin temasındaki sürtünme olaylarından uzak bir durum gösterir. Haddeleme proseslerinde, band ve haddeler arasındaki yüzeyler düzgün değildir, dahası burada kayma olayından ziyade, yuvarlanma sürtünmesi olayı da önemlidir. Şekil(63). Yağlayıcı hadde ve band yüzeylerinin her ikisi tarafından, kapma yönünde çekilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, band ile hadde arasında çok ince bir yağ filmi teşekkül etmektedir. Bu şartlar altında dört değişik sonuç elde edilebilir.

1-Haddeleme hızının artışı, hadde ve band yüzeyleri arasındaki yağ filmi kalınlığını arttırır. Şekil(64).

2-Yağlayıcı filminin kalınlaşması daha iyi bir yağlama yani daha düşük bir sürtünme katsayısı demektir. Burada haddeleme hızını arttırmakla, hadde kapmasını ilgilendiren sürtünme katsayısını azaltmış oluruz. Şekil(65). Ref(40)

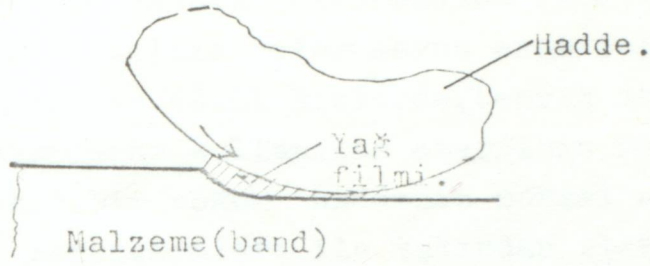
3-Hadde yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması sürtünme katsayısını arttırır. Şekil(66) den de görüldüğü gibi, pürüzlü yüzeyler kapma aralığına daha fazla yağ taşımaktadır. Yüzeyleri pürüzlü merdaneler ile çalışmada, tutulan yağ miktarı daha fazla olduğu halde, sürtünmeyi azaltmada pek etkili değildir.

4-Haddelenen band yüzeyinin pürüzlü oluşu, daha fazla yağ yağ tutulması demektir ve tutulan yağ kapma aralığına sürüklenmektedir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü fazla olan malzemelerin haddelenmesi esnasında daha iyi bir yağlama meydana gelmektedir. Burada hadde aralığına giren bandın yüzey pürüzlülüğündeki artış, sürtünme katsayısını azaltmaktadır. Şekil(67) de görüldüğü gibi bu durumun belirli bir değere kadar geçerli olduğu unutulmamalıdır. Bandın yüzey pürüzlülüğü çok fazla olduğu takdirde, sürtünme katsayısı, eğrinin kesikli bölgesindeki gibi yeniden artar.

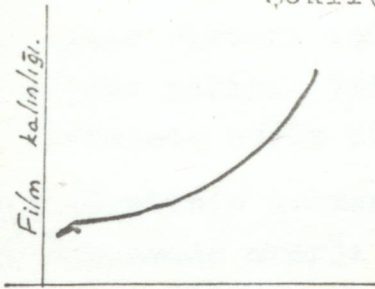
Bu sonuçların ışığı altında elde edilen sürtünme katsayısı, sürtünme enerjisi kaybının hesabında önemlidir. Sayılan sekiz faktör, ezme basıncının dağılışını ve merdane ağzında, temas yüzeyi boyunca band ile merdaneler arasındaki relatif kayma süratini etkiler ki bu iki faktör, sürtünme enerjisinin kaybını kontrol eder.

Kotünü bir haddede, bütün hadde guruplarındaki enerji kaybı (sürtünme enerjisi) sözü geçen faktörlerin çok daha komplike bir şekilde tesir etmeleri dolayısı ile, band, ilk had-

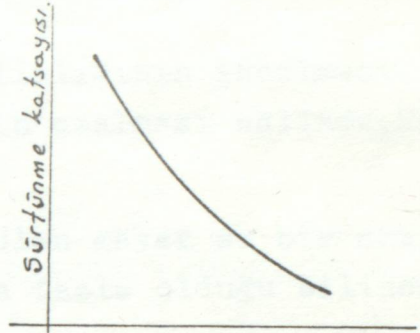
kurubandan sonra sertleşip kırılabilir ve bu işittikçe



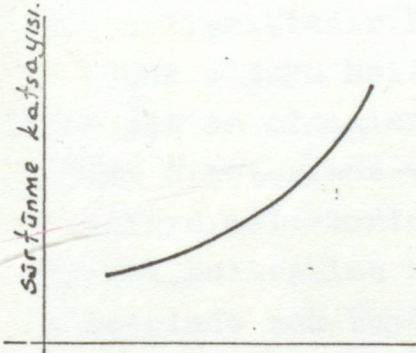
Şekil(63). Ref(40)



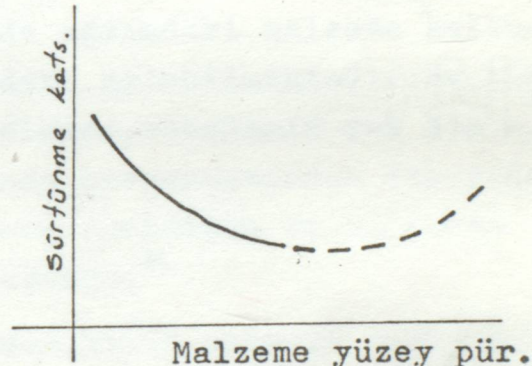
Hadde hızı.
Şekil(64). Ref(40)



Hadde hızı.
Şekil(65). Ref(40)



Hadde yüzey pür.
Şekil(66). Ref(40)



Malzeme yüzey pür.
Şekil(67). Ref(40)

haddelene sürati üzerinde bulunur.

şekil aşağıdaki şartlar ile mümkündür.

serdanelerinin çaplarının küçültülmesi.

malzemeye tatbik edilen ön ve arka germe kuvvetlerinin artırılması.

belirlenen haddelene yağının performansı artırılması.

de gurubundan sonra sertleşip kırılmanlasır ve bu hal gittikçe artarak devam eder. Bu nedenle sonuc yaklaşık tahminlerle elde edilebilir. Sürtünme kaybını deformasyon enerjisinin %10 u kabul etmek uygundur. Yalnız deformasyon enerjisinin, haddenin sürati ile değiştiğini ve düşük hızlarda, teorik deformasyon enerjisinin, normal şartlarda kullanılan enerjinin %65-75 i olduğunu unutmamak gerekir. Bir soğuk haddenin normal çalışma verimi, operasyonun bütün parametreleri ile yakından ilgilidir. Bununla birlikte,³⁸

- Aynı ezme miktarı için, bandın giriş kalınlığının incelenmesi.
- Haddeme yağının yağlama özelliklerinin azalması halinde, hadde veriminde büyük düşmeler görülür.

Hadde süratinin artması ile verimde görülen gayet az bir artışa karşılık, hadde enerji artışının çok daha fazla olduğu bilinen bir sonuçtur. :

İnce malzemelerin haddelenmesinde, haddeler çok yüksek basınçlar altında çalışmaktadır. Bu yüksek haddeleme basıncı, haddeleme gücünün düşük olduğu hallerde bile, hadde ağızındaki malzeme kalınlığının çok az olmasından dolayı meydana gelebilmektedir. Bu tip haddeleme olaylarında verimin düşük olması, enerjinin çok büyük bir kısmının, malzemenin deformasyonunda harcanmasından dolayıdır. Bu nedenle, kullanılan haddeleme yağları operasyon ve bilhassa verim üzerinde çok büyük tesirler gösterir.³⁰

Genel olarak yapılan tüm incelemelerden, kalın malzeme çeken haddelerin daha verimli çalıştığı neticesi çıkarılabilir. Hadde verimini, haddeleme sürati üzerinde büyük değişiklikler yapmadan arttırmak aşağıdaki şartlar ile mümkündür.³⁰

- 1- İş merdanelerinin çaplarının küçültülmesi.
- 2- Malzemeye tatbik edilen ön ve arka germe kuvvetlerinin artırılması.
- 3- Kullanılan haddeleme yağının performasyonunun geliştirilmesi.

$$\tau = \eta \frac{\Delta v}{\epsilon} = \eta \frac{v - v'}{\epsilon} = \frac{\eta}{\epsilon} v' \left(\frac{(R_0/h_0)\alpha^2}{1 + (R_0/h_0)\alpha^2} \right)$$

$$\left[\frac{2 + (R_0/h_0)\alpha^2 + (R_0/h_0)\alpha^2}{[1 + (R_0/h_0)\alpha^2] [2 + (R_0/h_0)\alpha^2]} \right]$$

5.1-Haddelemede hidrodinamik yağlama analizleri.

Hidrodinamik yağlamanın geçerli olduğunu kabul ederek, kayma gerilmesini şöyle ifade edebiliriz.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta V}{h} = \eta \cdot \frac{\Delta V}{\epsilon}$$

Buradaki ϵ , band ile haddeler arasındaki aralıktır. Haddelere yapışan yağlayıcı tabakasının hızı ise, hadde hızıyla U' verilmektedir. Banda yapışan yağlayıcı tabakasının hızı da sabit ivme ile sürekli artan band hızı olmaktadır. ^{17,18}

$$v = U' \cdot \frac{h_1/R_0 + \alpha_t^2}{h_1/R_0 + \alpha^2}$$

haddeler ile band arasındaki aralıktaki lineer bir hız gradyanının kabulü ile, yağlayıcının ortalama hızı şöyle olmaktadır.

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (v + U') = \frac{U'}{2} \left(1 + \frac{h_1/R_0 + \alpha_t^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} \right) = \frac{U'}{2} \left(\frac{2h_1/R_0 + \alpha_t^2 + \alpha^2}{h_1/R_0 + \alpha^2} \right)$$

çıkıştaki yağlayıcı kalınlığı ϵ , ise, yayılma olmadığı kabulü ile ve sıvıların sıkıştırılamayacağı kuralından,

$$\epsilon_{\bar{v}} = \text{sabit} = \epsilon_1 \cdot \bar{v} \Big|_{\alpha=0} = \epsilon_1 \cdot \frac{U'}{2} \left(\frac{2h_1/R_0 + \alpha_t^2}{h_1/R_0} \right)$$

yazılabilmektedir. Buradan da:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_f}{\bar{v}} \cdot \frac{U'}{2} \left(2 + \frac{R_0}{h_1} \alpha_t^2 \right) = \epsilon_f \cdot \frac{(h_1/R_0 + \alpha^2) [2 + (R_0/h_1) \alpha_t^2]}{2h_1/R_0 + \alpha_t^2 + \alpha^2}$$

$$\epsilon = \epsilon_1 \cdot \frac{[1 + (R_0/h_1) \alpha^2] [2 + (R_0/h_1) \alpha_t^2]}{2 + (R_0/h_1) \alpha^2 + (R_0/h_1) \alpha_t^2}$$

Yağlayıcının, teğetsel doğrultudaki hız gradyanı ihmal edildiğinde, yukarıdaki ifadeler yardımı ile, kayma gerilmesi şöyle düzenlenmektedir.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\epsilon} = \eta \cdot \frac{v - U'}{\epsilon} = \frac{\eta}{\epsilon_1} \cdot U' \left(\frac{(R_0/h_1) \alpha_t^2 - (R_0/h_1) \alpha^2}{1 + (R_0/h_1) \alpha^2} \right) \cdot \left\{ \frac{2 + (R_0/h_1) \alpha^2 + (R_0/h_1) \alpha_t^2}{[1 + (R_0/h_1) \alpha^2] [2 + (R_0/h_1) \alpha_t^2]} \right\}$$

$$\tau = \frac{\eta}{\epsilon_1} \cdot U' \cdot \frac{\left(\frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 - \frac{R_o}{h_1} \alpha^2 \right) \left(2 + \frac{R_o}{h_1} \alpha^2 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right)}{\left(1 + \frac{R_o}{h_1} \alpha^2 \right)^2 \left(2 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right)}$$

Hidrodinamik yağlamada sürtünme kayıpları:

$$W'_{s2} = 2 \int_S \tau \cdot |\Delta V| \cdot ds = 2 \int_{\alpha} \tau \cdot |\Delta V| \cdot d\alpha \cdot R_o$$

eşitlikte değerlerin yerine konması ile ve viskozitenin de sabit kaldığı kabulü ile:

$$W'_{s2} = 2 \int_S \tau \cdot |\Delta V| \cdot ds = \frac{2}{\sqrt{3}} m \cdot C_A \cdot \int_{\alpha=0}^{\alpha_2} [U' - v] R_o \cdot d\alpha$$

sabit sürtünme faktörüne benzer şekilde,

$$W'_{s2} = 2 \cdot \frac{\eta}{\epsilon_f} \cdot U'^2 \cdot R_o \cdot \frac{1}{2 + (R_o/h_1) \alpha_t^2} \left\{ \int_{\alpha} \left[\frac{(R_o/h_1) \alpha_t^2 - (R_o/h_1) \alpha^2}{1 + (R_o/h_1) \alpha^2} \right] d\alpha + \left(1 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right) \int_{\alpha} \frac{\left[(R_o/h_1) \alpha_t^2 - (R_o/h_1) \alpha^2 \right]^2}{\left[1 + (R_o/h_1) \alpha^2 \right]^3} d\alpha \right\}$$

$$W'_{s2} = 2 \cdot \frac{\eta}{\epsilon_f} \cdot U'^2 \cdot \frac{R_o}{2 + (R_o/h_1) \alpha_t^2} \left[\alpha_t^4 \int_{\alpha} \frac{d\alpha}{[(h_1/R_o) + \alpha^2]^2} - 2 \alpha_t^2 \int_{\alpha} \frac{\alpha^2 \cdot d\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^2} + \int_{\alpha} \frac{\alpha^4 \cdot d\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^2} + \left(1 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right) \frac{h_1}{R_o} \alpha_t^4 \int_{\alpha} \frac{d\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^3} - 2 \alpha_t^2 \int_{\alpha} \frac{\alpha^2 \cdot d\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^3} + \int_{\alpha} \frac{\alpha^4 \cdot d\alpha}{(h_1/R_o + \alpha^2)^3} \right]$$

$$\begin{aligned}
 W'_{s2} = 2 \cdot \frac{\eta}{\epsilon_f} \cdot U'^2 \cdot \frac{R_o}{2 + (R_o/h_1)\alpha_t^2} & \left\{ \alpha_t^4 \left[\frac{\alpha}{2(h_1/R_o)(h_1/R_o + \alpha^2)} \right. \right. \\
 & + \frac{1}{2(h_1/R_o)^{3/2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha \left. \right] - 2\alpha_t^2 \left[-\frac{\alpha}{2(h_1/R_o + \alpha^2)} \right. \\
 & + \frac{1}{2\sqrt{h_1/R_o}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha \left. \right] + \alpha + \frac{(h_1/R_o)\alpha}{2(h_1/R_o + \alpha^2)} \\
 & - \frac{3\sqrt{h_1/R_o}}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha + \left(1 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right) \frac{h_1}{R_o}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \alpha_t^4 \left[\frac{\alpha}{4(h_1/R_o)(h_1/R_o + \alpha^2)^2} + \frac{3\alpha}{8(h_1 + R_o)^2(h_1/R_o + \alpha^2)} \right. \right. \\
 & + \frac{3}{8(h_1/R_o)^{3/2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha \left. \right] - 2\alpha_t^2 \left[-\frac{\alpha}{4(h_1/R_o + \alpha^2)^2} \right. \\
 & + \frac{\alpha}{8(h_1/R_o)(h_1/R_o + \alpha^2)} + \frac{1}{8(h_1/R_o)^{3/2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha \left. \right] \\
 & + \frac{(h_1/R_o)\alpha}{4(h_1/R_o + \alpha^2)^2} - \frac{5\alpha}{8(h_1/R_o + \alpha^2)} + \frac{3}{8\sqrt{h_1/R_o}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R_o}{h_1}} \cdot \alpha \left. \right\}
 \end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \cdot \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}$$

Bu işlemlerin tamamlanması ile ve gerekli dönüşümlerin yapılması ile:

Hidrodinamik yağlama için sürtünme kayıpları, yağlayıcıda meydana gelmekte ve hız farkının karesi ile orantılı olmaktadır. Çözümde çeşitli dönüşümler sonucu : 18,17.

$$W'_{s2} = 2 \cdot \frac{2}{\epsilon_1} \cdot U^{1/2} \cdot \frac{R_o \sqrt{h_1/R_o}}{2 + (R_o/h_1) \cdot \alpha_t^2} \cdot A.$$

A ifadesi şöyle verilmektedir.

$$A = -\alpha_t^4 \left[\frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{2 \cdot \frac{h_o \cdot h_1}{R_o \cdot h_1}} + \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{2 \left(\frac{h_1}{R_o} \right)^2} \right]$$

$$-2\alpha_t^2 \left[\frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{2 \frac{h_1}{R_o} \cdot \frac{h_o}{h_1}} - \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{2 \frac{h_1}{R_o}} - \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1} \right]$$

$$- \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{2 \frac{h_o}{h_1}} + \frac{3}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1} + \left(1 + \frac{R_o}{h_1} \alpha_t^2 \right)$$

$$-\alpha_t^4 \left| \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{4 \left(\frac{h_1}{R_o} \right)^2 \left(\frac{h_o}{h_1} \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{3}{8} \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{\left(\frac{h_1}{R_o} \right)^2 \cdot \frac{h_o}{h_1}} + \frac{3}{8} \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{\left(\frac{h_1}{R_o} \right)^2} \right|$$

$$-2\alpha_t^2 \left| \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{4 \frac{h_1}{R_o} \cdot \left(\frac{h_o}{h_1} \right)^2} - \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{8 \frac{h_1}{R_o} \cdot \frac{h_o}{h_1}} - \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}}{8 \frac{h_1}{R_o}} \right|$$

$$-\frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1}}{4\left(\frac{h_o}{h_1}\right)^2} + \frac{5}{8} \frac{\sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1}}{\frac{h_o}{h_1}} - \frac{3}{8} \tan^{-1} \sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1} \right>$$

Rijit kabul edilen haddeler arasındaki aralık h_1 , çıkışta her yağlayıcı tabakasının kalınlığı da ϵ_1 olarak kabul edildiğinde, band kalınlığı $(h_1 - 2\epsilon_1)$ olacaktır. Ortaya çıkan band kalınlığı ifadesinin yerine konmasıyla.

$$\sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1} = \sqrt{\frac{h_o}{h_1-2\epsilon_1}-1} \approx \sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1} \left(1 + \frac{h_o/h_1}{h_o/h_1-1} \cdot \frac{\epsilon_1}{h_1}\right)$$

$$\frac{h_1}{h_o} = \frac{h_1-2\epsilon_1}{h_o} = \frac{h_1}{h_o} \left(1 - 2 \frac{\epsilon_1}{h_1}\right)$$

$$\left(\frac{h_1}{h_o}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_o}\right)^2 \left(1 - 2 \frac{\epsilon_1}{h_1}\right)^2 \approx \left(\frac{h_1}{h_o}\right)^2 \left(1 - 4 \frac{\epsilon_1}{h_1}\right)$$

$$A = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_o}{h_1}-1} \left[-\left(\frac{h_1}{h_o}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{h_1}{h_o} + \frac{1}{2} - \left\langle \frac{h_1}{h_o} \left(1 - 4 \frac{h_1}{h_o}\right) \right.$$

$$\left. + \frac{h_1/h_o}{h_o/h_1-1} - \frac{1}{2} \frac{1}{h_o/h_1-1} - \frac{1}{2} \frac{h_o/h_1}{h_o/h_1-1} \right> \frac{\epsilon_1}{h_1} \Bigg]$$

$$\sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \approx \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \left(1 - \frac{\epsilon_1}{h_1}\right)$$

ϵ_1 in küçük değerleri için $\alpha_t \approx 0$.

$$W'_{s2} = \frac{\eta}{h_1} \cdot U'^2 \cdot R_o \cdot \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \frac{1 - \epsilon_1/h_1}{\epsilon_1/h_1} \cdot A$$

$$W'_{s2} = + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{h_o} - 1} \cdot \frac{\eta}{h_1} \cdot U'^2 \cdot R_o \cdot \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \cdot \frac{1}{\epsilon_1/h_1} \left\{ - \left(\frac{h_1}{h_o} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{h_1}{h_o} \right. \\ + \frac{1}{2} - \left[\frac{h_1}{h_o} \left(1 - 4 \frac{h_1}{h_o} \right) + \frac{h_1/h_o}{h_o/h_1 - 1} - \frac{1}{2} \frac{1}{h_o/h_1 - 1} \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2} \frac{h_o/h_1}{h_o/h_1 - 1} + \left[- \left(\frac{h_1}{h_o} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{h_1}{h_o} + \frac{1}{2} \right] \right] \frac{\epsilon_1}{h_1} \right\}$$

Kayma güç kayıpları da:

$$W'_{s1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot C_A \cdot U' \cdot h_o \cdot \frac{h_1}{h_o} \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \cdot \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1}$$

$$W'_{s1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot C_A \cdot U' \cdot h_1 \cdot \sqrt{\frac{h_1}{R_o}} \sqrt{\frac{h_o}{h_1} - 1} \left[1 + \left(-2 - \frac{h_1}{R_o} + \frac{h_o/h_1}{h_o/h_1 - 1} \right) \frac{\epsilon_1}{h_1} \right]$$

Elde edilen bu sonuçların ortak değerlendirilmesi ile, hidrodinamik yağlama rejimi ile haddedeleme tüketicilen güç hesaplanmış olacaktır.

$$\dot{J} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot C_A \cdot U' \cdot (h_1 - 2\epsilon_1) \left(1 + \frac{R_o}{h_1 - 2\epsilon_1} \cdot \alpha_t^2 \right) \left[\ln \frac{h_o}{h_1 - 2\epsilon_1} \right. \\ + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1 - 2\epsilon_1}{R_o}} \cdot \sqrt{\frac{h_o}{h_1 - 2\epsilon_1} - 1} + \frac{C_{xb} - C_{xf}}{(2/\sqrt{3}) C_A} \\ \left. + \frac{2}{\epsilon_1} \cdot \frac{\eta}{(2/\sqrt{3}) C_A} \cdot \frac{U'}{h_1 - 2\epsilon_1} \cdot \frac{R_o \sqrt{(h_1 - 2\epsilon_1)/R_o}}{\left\{ 1 + [R_o/(h_1 - 2\epsilon_1)] \alpha_t^2 \right\}^2} \cdot A \right]$$

Buradaki A değeri, h_1 yerine $(h_1 - 2\epsilon_1)$ koyarak elde ettiğimiz değer olmalıdır. α_t ve ϵ_1 değişkenleri seçime bağlıdır. Gerçek haddeme işlemlerindeki toplam güç J, bunların bazı pozitif değerlerine karşılık, bir minimum değer gösterebilmektedir. Gücü $J_{\min}$ yapan α_t ve ϵ_1 değerleri, herbir haddeme durumu için, ardışık yaklaşım yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Minimum J ve J'yi minimum yapan α_t ve ϵ_1 değerlerine, gerçek değerler gözüyle bakılmaktadır. Ardışık yaklaşım için bilgisayarlardan yararlanılır.

Gerçek haddeme işlemlerinde tarafsız nokta bir doğru üzerinde değil de, belirli bir tarafsız yüzey üzerinde bulunmaktadır. Haddeme işlemi ile ilgili bağımsız değişkenler, incelme, sürtünme, haddeme oranı, bağıl ön ve arka germeler, olmaktadır. Tarafsız (nötral) noktanın yeri, bu değişkenlerin herbiri ile bağımlı olmakta ve endirekt olarak kontrol edilebilmektedir.

Haddeler arasından çıkan bandın hızı v_1 , hadde çevre hızından U' daha yüksek olduğuna göre, ileri kayma diye tanımlanan, çıkış hızının hadde hızına göre fazlalığı şöyle hesaplanabilmektedir.

$$i.K\% = \left(\frac{v_1}{U'} - 1 \right) \cdot 100.$$

çeşitli yerdeğiştirmelerin yapılması ile, ifade:

$$iK\% = 100 \left(\frac{h_0}{h_1} - 1 \right) \left(\frac{\alpha_t}{\alpha_k} \right)^2$$

elde edilir. Tarafsız noktanın pozisyonu hesaplanabilmekte, ancak deneysel haddeme işlemlerinden direkt olarak ölçülememektedir.

İşlemin büyüklüğü nedeniyle J'nin α_t ve ϵ_1 'e göre türevinin alınmasından kaçınılmaktadır. $\alpha_t = 0$ kabulü ve gerçek haddemede, yağlayıcı tabakası kalınlığının çok az olduğu dikkate alınarak, ϵ_1 ve J üzerinde bir yaklaşım uygulanabilmektedir. Ayrıca incelmenin de çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Yağlayıcı tabakasının kalınlığı şöyle verilmektedir.

$$\frac{\epsilon_1}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{h_1} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{\eta \cdot U'}{(2/\sqrt{3}) \zeta_A \cdot h_1}} (h_0/h_1 - 1)^{1/4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (h_1/h_0) - (h_1/h_0)^2}}{\left[2 \left(1 - \ln \frac{h_0}{h_1} - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h_1}{R_0}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{h_1} - 1} \right) \right]} \left[\left(1 - \frac{1}{h_0/h_1 - 1} + \frac{h_1}{R_0} \right) - 2 \frac{\zeta_{xb} - \zeta_{xf}}{(2/\sqrt{3}) \zeta_A} \right]^{-1/2}$$

17, 18

Avitzur'un hesaplamış olduğu bu yağ tabakası kalınlığını veren bağıntıda viskozitenin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimleri dikkate alınmamış, viskozite sabit kabul edilmiştir. Diğer araştırmacıların viskozitenin sıcaklık ve basınçla değişimini dikkate alarak yaptıkları hesaplamalardan daha sonra bahsedilecektir.

Verilen bağıntıların incelenmesinden görüleceği gibi, hidrodinamik yağlama olayı gerçekleştiğinde, yağlayıcı tabakası kalınlığının $(R_0/h_1)^{1/4}$ terimi ile orantılı olduğu görülmektedir. Malzeme kalınlığı azaldıkça veya hadde çapı büyüdükçe, hidrodinamik yağlamayı gerçekleştirmek güçleşmekte, daha yoğun yağlayıcı tabakaları sağlanması gerekmektedir. Yağlayıcı kalınlığının ayrıca $\{\eta/[(2/\sqrt{3})\zeta_A](U'/h_1)^{1/2}\}$ ifadesi ile de orantılı olduğu görülmektedir. Viskozite ve hadde hızındaki bir artış veya malzeme kalınlığındaki bir azalma, aralığın ϵ_1/h_1 artmasına sebep olacaktır.

Hidrodinamik yağlamalı haddeleme prosesinin başlıca avantajı, hadde kuvvetinin azalması, sürtünmede önemli ölçüde bir düşüm görülmesidir. Bunun sonucu olarak, daha düşük hadde kuvveti dağılımı ile, haddelerin aşınması, eğilmesi azalmakta, dolayısıyla hadde aralığı daha düşük tutulabilmektedir. İnce bantların haddelenmesinde hidrodinamik yağlamayı korumak daha kolay olmaktadır. İşlem esnasında hidrodinamik yağlamayı sağlamak için, yüksek haddeleme hızları, büyük hadde çapları ve yüksek viskozite değerleri istenmektedir. 17, 18.

5.2. HADDELEME PROSESLERİNDE HİDRODİNAMİK YAĞLAMA OLAYININ ISIL EĞRİLER YARDIMI İLE ANALİZİ.

İncelenen bu modelde, soğuk haddeleme olayı esnasında meydana gelen, ısı ve basınç etkilerinin, direkt olarak yağlayıcı film kalınlığına etki ettiği kabul edilmiştir. Hidrodinamik yağlamanın gerçekleşmesi için gerekli film kalınlığı hesaplanırken, deformasyon bölgesi basıncı ve kayma gerilmesi birkaç kısımda incelenmiş ve yağlayıcı sıvının Newtonien bir sıvı olduğu kabul edilmiştir. Bu aralanan yağlayıcı miktarına uygun olarak yapılan basınç ölçümleri, filmin basınç etkisi altındaki bölümünün analizi için kullanılabilir.³³

Hidrodinamik yağlamanın kullanıldığı soğuk haddeleme prosesleri, levha ve band haddelenmesinde oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Kalın yağlayıcı filmi, malzeme ile merdane arasında aşırı bir kontakt basıncı meydana getirir. Eğer yağlayıcı filmi üzerinde aşırı temas mücade edilirse, merdane yüzeylerinin çabuk yıprandığı izlenebilir. Bunun nedeni olarak, merdane ile malzeme arasında tutulan yağ miktarının fazla olmasının aşırı temas basınçları oluşturduğu gösterilebilir. Eğer sürtünme çok yüksekse, meydana gelen ısı, malzemenin kritik sıcaklığını aşar ve şekillendirme hızının düşmesine neden olur. Tam olarak açıklanamamakla beraber, kalın yağlayıcı filmleri **düşük** sürtünme olayının gerçekleştirememektedir. Yani kalın yağlayıcı filmi düşük sürtünme katsayısı demek değildir. Kalın hidrodinamik film, yüksek viskoziteli yağ kullanılarak oluşturulabileceği gibi, düşük viskoziteli bir yağ kullanarak, proses şartlarını ayarlıyarak, filmin yüzeyini muhafaza etmek mümkündür.

Levha ve folyo imalatındaki talep fazlalaştıkça, proses verimlerinin arttırılması çalışmaları hızlanmıştır. Hidrodinamik filmin kalınlığı haddeleme hızıyla belirlenir. Sabit olmayan ve kontrol imkanı olmayan durumlarda ortaya çıkan kalın yağ filmleri istenilmeyen yağlama problemlerinin ortaya çıkmasına neden olurlar.

Klasik haddeleme teorilerinde, sürtünme katsayısının belirlenmesinde sabit sürtünme faktöründen yararlanılmaktadır. Artan proses hızları ve malzeme kalitesi analizlerde, hidrodinamik yağlama modellerinin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Bu konuda yapılan çeşitli araştırmalardan daha sonra bahsedilecektir.

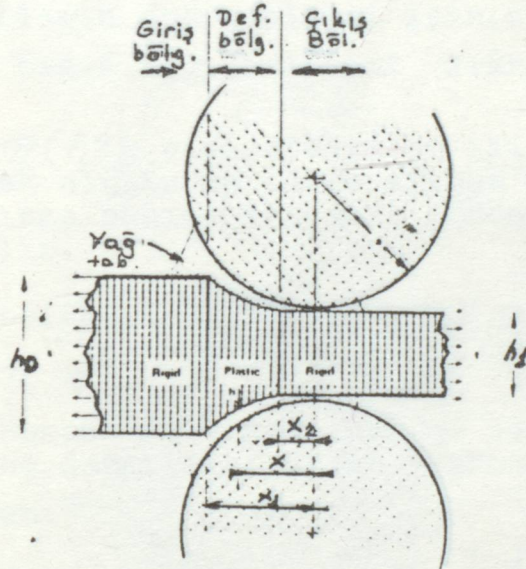
5.2.1. Teorik analiz.

Olayın analizi için, iş parçası ile haddeler arasındaki bölüm, şekil(68) de görüldüğü gibi üç kısımda incelenmiştir.

- 1-Giriş bölgesi: Bu bölgede malzemenin rijit olduğu düşünülmektedir.
- 2-Deformasyon bölgesi: Burası malzemenin deformasyona uğradığı bölgedir.
- 3-Çıkış bölgesi: Şekil değiştiren iş parçası tekrar rijit hale gelmektedir.

$$\frac{dp}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot (U+V) \left(\frac{h_1 - h_2}{h^3} \right)$$

Burada U_1 : Haddelenen band hızı, V : Mordane çevresel hızı, h_1 : Giriş bölgesindeki yağ film kalınlığıdır. Buradan elde edilecek



Şekil(68). Haddeleme prosesinin şematik diyagramı. Ref (34)

Hidrodinamik yağ filmi giriş bölgesinde meydana gelmektedir. Oluşan yağ filmi, deformasyon bölgesinde şekillendirilen malzeme ile birlikte şekillenmekte ve meydana gelen sürtünme kuvvetlerini ve basınç etkilerini üzerinde toplayarak prosesin akışını etkilemektedir. Çıkış bölgesi, meydana gelen kuvvetlerin dengelendiği bölgedir.

5.2.1,1.GİRİŞ BÖLGESİ:

Bu bölge hidrodinamik yağ filminin oluşması bakımından en önemli bölgedir. Bu bölgedeki yağlayıcı, artan basıncın ve yükselen viskozitenin etkisiyle deformasyon bölgesine doğru sürüklenir.

Hidrodinamik film kalınlığını hesaplayabilmek için, giriş bölgesindeki hareket ve enerji eşitliklerinin birlikte düşünülmesi gerekir. Ayrıca Reynolds denge eşitliklerinden de yararlanılır. Daha önceki incelemelerde, giriş bölgesindeki basınç dağılımını analiz eden Reynolds eşitliğini şöyle elde etmiştik. ³³

$$\frac{dP}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot (U_1 + V) \left(\frac{h_1 - h}{h^3} \right)$$

Burada U_1 : Haddelenen band hızı, V : Merdane çevresel hızı, h_1 : Giriş bölgesindeki film kalınlığıdır. Buradan elde edilecek sonuçların doğru olması için, viskozitenin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimlerini dikkate almalıyız. TABLO (17) Ref(33)

$\eta = \eta(P, T)$; viskoziteyi bu iki değişkene birden bağımlı olarak oluşturup çözüm aramak problemi zorlaştırdığından yalnızca basınç bileşeni gözönüne alınarak $\eta = \eta(P)$ işlem yapılır.

Viskozitenin basınç ile değişimini inceleyen bağıntı:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\gamma P}$$

dir. Burada γ : viskozitenin basınçla değişim katsayısıdır. Basınç dağılımını veren Reynolds eşitliğinin h_1 için çözümünden.

$$h_1 = \frac{3 \cdot \eta_0 \cdot \gamma \cdot (U_1 + V)}{\left[1 - e^{-\gamma (\sigma_A - \sigma_{xb})} \right]} \sqrt{\frac{R_0}{a \cdot y_1}}$$

Burada: σ_A : Malzemenin girişteki akma gerilmesi, σ_{xb} : Arka germe kuvveti, a : Redüksiyon miktarı, R_0 : Hadde yarıçapı, y_0 : Girişteki malzeme kalınlığı, η_0 : Yağlayıcının viskozitesidir.

Bağıntıdan görüldüğü gibi, operasyon parametreleri (U_1, V) ve yağlayıcının özellikleri (γ, η_0) film kalınlığını etkilemektedir. Haddemeleme hızı yükselttilirse yada yağlayıcı olarak yüksek viskoziteli yağ seçilirse hidrodinamik film ka-

lınlığı artar. Film kalınlığının hesaplanmasında kullanılan bağıntıda, yağlayıcı viskozitesinin sadece basınca bağlı olduğu kabul edilmişti. Sıcaklığın giriş bölgesinde sabit kaldığı kabulüyle elde edilen bu sonuç haddelendirme olayları için tam bir yaklaşım değildir. Çünkü giriş bölgesinde dahi sıcaklık devamlı değişmektedir. Yağlayıcıdaki sıcaklık yükselmesi viskoziteyi azaltmakta, dolayısıyla film kalınlığını azaltmaktadır. Viskozitenin hem sıcaklık hemde basınç ile değiştiğini kabul edersek;

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\delta P - \delta T_A}$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\delta P - \delta T_A)$$

δ -Sıcaklık viskozite katsayısıdır. T_A -Herhangi bir kontakt bölgesindeki film üzerindeki sıcaklıktır.

Burada, δ , katsayıları her üç bölge için incelenmeli ve bu bölgelerdeki basınç(P) ve sıcaklık(T_A) değerleri belirlendikten sonra işlemler yürütülmelidir. Aşağıdaki tabloda bu konu ile ilgili bazı sonuçlar görülebilir. **TABLO (17) Ref(33)**

sembol.	Yağ cinsi.	Viskozite 77°F, cp.	sıcaklık viskozite. $\delta(1/F), \delta(1/K)$		Sıcaklık basınç. $\gamma(10^{-5}/\text{psi})$	
C	Naftenitik endüstri yağı.	93.	0,0347	0,0625	19,9	2,9.
D	USP kastor yağı.	702.	0,0395	0,071	8,1	1,2
H	Yüksek vis. naftenitik end.yağı.	4738	0,0594	0,107	17,0	2,5

$$\delta \rightarrow \eta_0 = \eta_i / \exp(\delta T) \quad \eta_{cp} = 1,019 \cdot 10^{-4} \text{ kgf.s/m}^2$$

$$\gamma \rightarrow \eta = \eta_0 \cdot \exp(\gamma P)$$

Aşağıdaki şekil(18) de ise C yağı için yapılan incelemeler görülmektedir.

Analizde kullanılan temel eşitlikler şunlardır.

Momentum eşitlikleri.³⁴

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial U}{\partial y} \right).$$

Bu eşitlik film boyunca integré edilebilir ayrıca film boyunca sabit viskozite kabulü yapılabilir. Sınır şartları belirlenirken temas noktasındaki hız sabit alınabilir. Kırma gerilmesi şöyle gösterilebilir,

$$\tau = y \frac{dP}{dx} - \frac{\eta \cdot \Delta U}{h}.$$

$\Delta U = V - U_1$ olarak bağli hız farkıdır. Burada basınç değişimini Reynolds eşitliklerinden yararlanarak:

$$\frac{dP}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot (U_1 + V) \left(\frac{h - h_1}{h^3} \right)$$

Yağlayıcı film tabakası için enerji eşitliği yazılırsa,

$$K \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\tau^2}{\eta} = 0.$$

Bir akışkanın hareketi üzerine yüzey kuvvetlerinin etkisini tam olarak analiz edebilmek için, S maddesel yüzeyi içinde bulunan H hacımlı akışkan için enerji dengesini gözönüne almak gerekir. İş, bu akışkan kütlesi üzerinde hem hacim hem de yüzey kuvvetleri tarafından yapılmaktadır. Aynı zamanda olay esnasında ısı da kazanılmaktadır. Bu toplam enerji kazancının bir kısmı akışkanın kinetik enerjisini artırır, kalanı termodinamiğin birinci kanununa göre akışkanın iç enerjisinde bir artma olarak görünür. Bu dengeyi akışkanın verilen bir kütlesi için enerji dengesinden, akışkanın her noktasında geçerli bir diferansiyel denklem elde ederek açıklayabiliriz.

K katsayısı yağ filminin ısı iletim katsayısıdır. Basınç ve enerji değişimini veren bağıntıların birlikte çözülmesi ile:

$$M^2 K \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} = - \eta \cdot \phi^2.$$

$$\phi = M \cdot y - \frac{\Delta U}{h} \quad M = 6(U_1 + V) \frac{h - h_1}{h^3}.$$

buradan;

$$T = \frac{-\eta}{12 \cdot M^2 K} \cdot \phi^4 + C_1 \cdot \phi + C_2.$$

C_1 ve C_2 integral sabitleri, malzeme ve haddelerle sınırlı

bir yüzey elemanı için geçerli olan sınır şartlarından elde edilir.

Ortalama T_A sıcaklığı ise şöyle belirlenebilir.

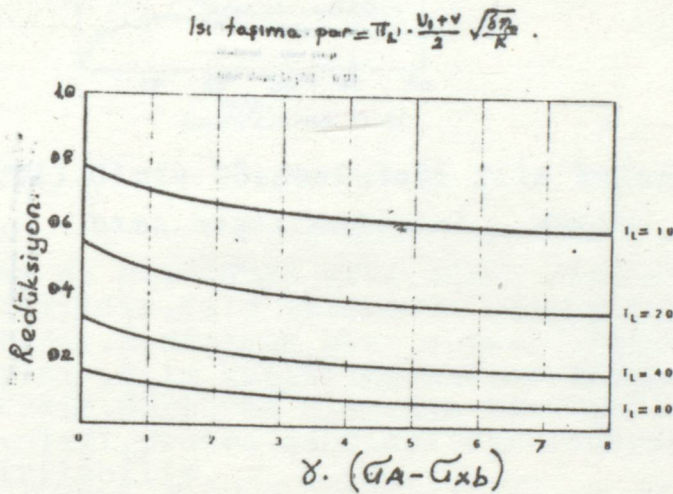
$$\bar{T}_A = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{+h/2} T. dy = \frac{1}{M.h.} \int_{\phi_l}^{\phi_u} T. d\phi.$$

T değeri yerine konup integre edilirse,

$$T = \frac{1}{M.h.} \left[\frac{\eta}{60.M^2.k} (\phi_u^5 - \phi_l^5) + \frac{C_1}{2} (\phi_u^2 - \phi_l^2) + C_2 (\phi_u - \phi_l) \right].$$

$$\phi_u = \frac{M.h.}{2} - \frac{\Delta U}{h} \quad \phi_l = \frac{-M.h.}{2} - \frac{\Delta U}{h}.$$

Isıl etkilerin oluşturduğu değişimlerden yararlanılarak elde edilen sonuçlardan ortaya çıkan bilgiler şekil(70) den görülebilir.



Şekil(70).Giriş film kalınlığının T_L ile değişimi.
Ref (33)

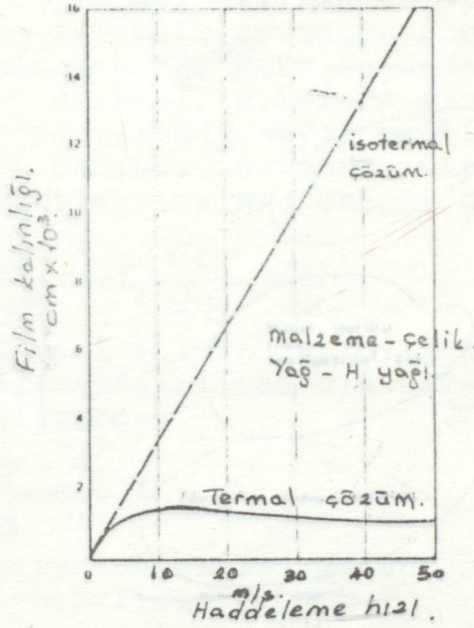
Şekilde iki değişik parametreden yararlanılmıştır.İlki ısı taşıma (thermal loading) parametresi (T_L) şöyle belirlenir.

$$T_L = \frac{U_1 + V}{2} \sqrt{\frac{\delta \cdot \eta_0}{K}}$$

T_L parametresi,haddeleme işleminin sürati ve kullanılan yağın fiziksel özelliklerine bağlıdır.Burada önemli olan δ ,sıcaklık viskozite katsayısıdır,ikinci parametre $\delta (G_A - G_{xb})$ dir,bu parametre de proses şartları ile,arka germe ile (G_{xb})

ve yağlayıcı maddenin fiziksel şartları ile belirlenir.

Hesaplanan ısı taşıma parametresi T_L ve $\delta(C_A - C_{vb})$ film kalınlığının belirlenmesinde kullanılır. Hidrodinamik filmin şekli, haddelme süratine önemli bir şekilde bağlıdır. Yüksek hızda haddelme hızının etkisi şekil(71) den görülebilmektedir.



Şekil(71). Giriş bölgesindeki film kalınlığının hızla bağlı değişimi. Ref(25)

Şekilden de görüldüğü gibi, düşük hızlarda ısı etkileri önemli değildir, film kalınlığı süratine bağlı olarak lineer artmaktadır. Haddelme hızı yükseldiğinde ısı etkisi kendini gösterir. Film kalınlığı azalan viskozite ile birlikte düşmektedir. Sürtünme olayının temelini oluşturan yağ filmi kalınlığı, proses şartları ayarlanarak amaçlanan değere getirilebilir.

5.2.1.2. Deformasyon bölgesi. (Kayma yayı.)

Bu bölge iş parçasının plastik olarak deformasyona uğratıldığı bölgedir. Bu bölgede sürtünmenin büyüklüğü, deformasyon miktarı ve hızı bakımından gereklidir. Hidrodinamik yağlama durumunda sürtünme, yağlama maddesinin özelliklerine bağlı olarak, kayma gerilmesi ile belirlenir. Bu özellikler deformasyon bölgesinde sıcaklık ve basıncın etkisi ile değişiklikler gösterebilir. Akışkan tabakalarına uygulanabilen Reynolds enerji denklemleri, plastik malzemeleri de viskoz bir akışkan kabul ettiğimizden, metaller için de kullanılabilir.

Viskozitenin sıcaklık ve basınçla değişimini belirleyen bağıntıyı şöyle elde etmiştik.

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\gamma P - \delta T)$$

Giriş bölgesindeki enerji hesapları burada da uygulanırsa kayma gerilmesi belirlenebilir. Olayın analizi esnasında yapılan işlemler aynıdır. Deformasyon bölgesinde basınç gradyanı oldukça küçüktür, bu nedenle yağlayıcı filmi boyunca τ sabiti alınabilir. Deformasyon bölgesinin uzunluğu boyunca her pozisyonda, kayma gerilmesi ile kayma gerinimi arasındaki bağıntı, Newtonien bir model kullanılarak verilebilir. Basitleştirilmiş enerji denklemi şöyle yazılabilir.

$$K \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \tau_1 \frac{\partial U}{\partial y} = 0.$$

K, yağlayıcı filmin ısı iletkenlik katsayısıdır. τ_1 ise y den bağımsızdır. İfadenin parametrelerden birine göre integrali alınır.

$$K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \tau_1 U = C_1.$$

C integrasyon sabiti y den bağımsızdır, bu eşitlik şöyle düzenlenebilir.

$$\frac{K \cdot \tau_1}{\eta} \cdot \frac{\partial T}{\partial U} + \tau_1 U = C_1.$$

Sınır şartları, hız ve sıcaklık durumları ile şöyle belirlenir.

$$U(y=h/2) = -V. \text{ (Hadde yüzey hızı.) (m/s)}$$

$$U(y=-h/2) = -U. \text{ (Band hızı.) (m/s)}$$

$$T(y=h/2) = T_r. \text{ (Hadde yüzey sıcaklığı.)}$$

$$T(y=-h/2) = T_s. \text{ (Band yüzey sıcaklığı.) (°C)}$$

Giriş bölgesi
üzerinde.

Bu değerlerin yerine konması ile,

$$\int_{-U}^{U(y)} \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial T}{\partial U} \cdot dU = \int_{T_s}^{T(y)} \frac{1}{\eta} \cdot dT.$$

integrasyondaki u ya gelince;

$$K \cdot \tau_1 \cdot \int_{T_s}^{T(y)} \frac{1}{\eta} dT + \frac{\tau_1}{2} (U^2 - U^2) = C_1 (U + U)$$

Bu integrasyonda η değeri yerine bulunan bağıntının konması ile.

$$\int_{T_s}^{T(y)} \frac{1}{\eta} dT = \frac{\exp(\delta T) - \exp(\delta T_s)}{\delta \cdot \eta_0 \cdot \exp(\delta P)}.$$

diğer taraftan integrasyon sabiti bulunup, yerine konursa,

$$\frac{\exp(\delta T) - \exp(\delta T_s)}{\eta_i \cdot \exp(\delta P)} + \frac{\delta}{2K} (U^2 - V^2) = \frac{U + V}{U - V} \left\{ \frac{\exp(\delta T_r) - \exp(\delta T_s)}{\eta_i \cdot \exp(\delta P)} + \frac{\delta}{2K} (V^2 - U^2) \right\}$$

U hızı sadece y nin fonksiyonudur. Enerji eşitliğinden,

$$(y + \frac{h}{2}) \tau_i = \int_{-h/2}^y \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \cdot dy$$

buradan,

$$\int_{-h/2}^y \eta \cdot \frac{\partial u}{\partial y} dy - \int_{-U}^U \eta \cdot du = \eta_0 \cdot \exp(\delta P) \int_U^u \frac{du}{\exp(\delta T)}$$

sonuç olarak,

$$(y + \frac{h}{2}) \tau_i = \eta_0 \cdot \exp(\delta P) \int_U^u \frac{du}{\exp(\delta T)}$$

integralin sağ tarafındaki değer hesaplanıp yerine konduğunda,

$$\tau_i = \frac{\eta_0 \cdot \exp(\delta P)}{h} \int_{-U}^{-V} \frac{du}{\exp(\delta T)}$$

burada,

$$\xi = \frac{U + V}{U - V}, \quad A^2 = \frac{\eta_0 \cdot \delta \cdot \exp(\delta P) \cdot V^2 \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2}{8K}.$$

dönüşümlerinin yapılması ile,

$$\int_{-U}^U \frac{du}{\exp(\delta T)} = (U - V) \int_0^\xi \frac{d\xi}{a\xi^2 + b\xi + c}$$

$$a = -4A^2.$$

$$b = \exp(\delta T_r) - \exp(\delta T_s) + 4A^2.$$

$$c = \exp(\delta T_s).$$

$$b^2 - 4ac = \left\{ \exp(\delta T_r) - \exp(\delta T_s) \right\}^2 + 16A^2 \cdot \exp(\delta T_s) > 0.$$

$$\int_{-U}^U \frac{du}{\exp(\delta T)} = (U - V) \frac{2}{b^2 - 4ac} \cdot \ln \frac{2a\xi + b - b^2 + 4ac}{a\xi^2 + b\xi + c} \Big|_0^\xi$$

Bu değerlerden yararlanarak, sürtünme gerilmesi F' yi bul-
la vermştir.

$$\tau = \frac{2 \eta_0 \cdot \exp(\delta P) (V - U)}{h \cdot (4 \eta \cdot A)} \left\{ -\frac{\delta(T_r + T_s)}{2} + \right.$$

$$\ln \left[\frac{4 \cdot \phi \cdot A}{2} + \frac{\exp(\delta T_r) + \exp(\delta T_s)}{2} + 2 A^2 \right] \left. \right\}$$

$$4 \cdot \phi \cdot A = \left[16 A^2 \cdot \exp(\delta T_s) + \left\{ \exp(\delta T_r) - \exp(\delta T_s) + 4 A^2 \right\}^2 \right]^{1/2}$$

Kayma gerilmesi τ için kullanılan diferansiyel denklem sadece deformasyon bölgesi için kullanılabilir. Deformasyon bölgesinde, iş parçası için Von Mises kriterini uygularsak,

$$y \cdot \frac{dP}{dx} - \frac{d}{dx} (y \cdot \sigma) + 2\sigma = 0.$$

bu bağıntı, Runge-Kutta tarafından hesaplanarak, temas böl-
gesindeki basınç dağılımını belirlemede kullanılmıştır.

Wilson ve Walowit³³, deformasyon bölgesi için yaptıkları araştı-
tırmalar sonucunda denge eşitliğini şöyle belirlemişlerdir.

$$Y \cdot \frac{dB}{dx} + G \cdot B \cdot \frac{dY}{dx} - \frac{2R \cdot F' \cdot G(Y - z(1-R))}{3H_1 \cdot H \cdot Y(1 + z(1-R))} = 0.$$

B-malzemenin spesifik bir katsayısıdır.

$$X = x/x_1.$$

$$Y = y/y_1.$$

$$F' = \tau \cdot h / \eta \cdot e^{\delta P} (U_r - U).$$

x-Hadde ayağı merkezinin deformasyon bölgesine uzaklığı. (mm)

y-Deformasyon bölgesindeki malzeme kalınlığı. (mm)

τ -Kayma gerilmesidir. (kgf/mm^2)

U-Deformasyon bölgesindeki malzeme hızıdır. (m/s)

Geometriden,

$$Y = 1 - R + RX^2.$$

$$\frac{dY}{dX} = 2 \cdot R \cdot X.$$

$$\frac{dY}{dX}$$

36
Mahdavian ve Wilson, boyutsuz sürtünme gerilmesi F' 'yi şöyle vermiştir.

$$F' = \frac{2 \cdot C_1 \cdot (1 - \theta)^2}{\left[s(1 - \theta)^2 + 8 \right]^{1/2} \left[s(1 - \theta)^2 + 8\theta^2 \right]^{1/2}}$$

$$C_1 = 4 \ln \left\{ \left[\frac{s(1 - \theta)^2 + 8\theta^2}{8(1 - \theta)^2} \right] \left[\frac{s(1 - \theta)^2 + 8}{8(1 - \theta^2)} \right]^{1/2} \right\}$$

Çalışma bölgesinde ısı kayma parametresi S :

$$\theta = \tanh(D/4), \quad S = \eta_0 \cdot e^{\delta P} \cdot \delta \cdot (U - U_r)^2 / k.$$

boyutsuz formda,

$$S = 4L(Y - Z(1 - R))^2 / BY^2(1 + Z(1 - R))^2.$$

Boyutsuz sıcaklık değişimi katsayısı D :

$$D = \delta \cdot T_s.$$

Burada T_s ; malzeme ile hadde arasındaki sıcaklık farkıdır, plastik deformasyon proseslerinde, sıcaklığın dikkate alınması ile, D büyük bir yaklaşıklıkla,

$$D = -K \cdot \ln Y.$$

K -Plastikliğin ısı parametresidir.

$$K = \delta \cdot G_A / S.$$

δ -Sıcaklık viskozite katsayısı.

S -Malzemenin spesifik hız katsayısıdır.

Mahdavian ve Wilson, boyutsuz akma gerilmesi W 'yi kullanarak, her ünite için akma hızını belirlemişlerdir.

$$W = (V - U_r \cdot h) / (U - U_r) \cdot h.$$

$$V = (U_1 + U_r) \cdot h_1 / 2 = U_r \cdot h + (U - U_r) \cdot h \cdot W.$$

bu bağıntı boyutsuz formda düzenlenirse, $H(h/h_1)$ boyutsuz film kalınlığı için,

$$H = \frac{Y(1 + Z(1 - R))}{2Y + 2W(Z(1 - R) - Y)}$$

W ise şöyle belirlenmiştir.

5.2.2.Çözüm metodu:

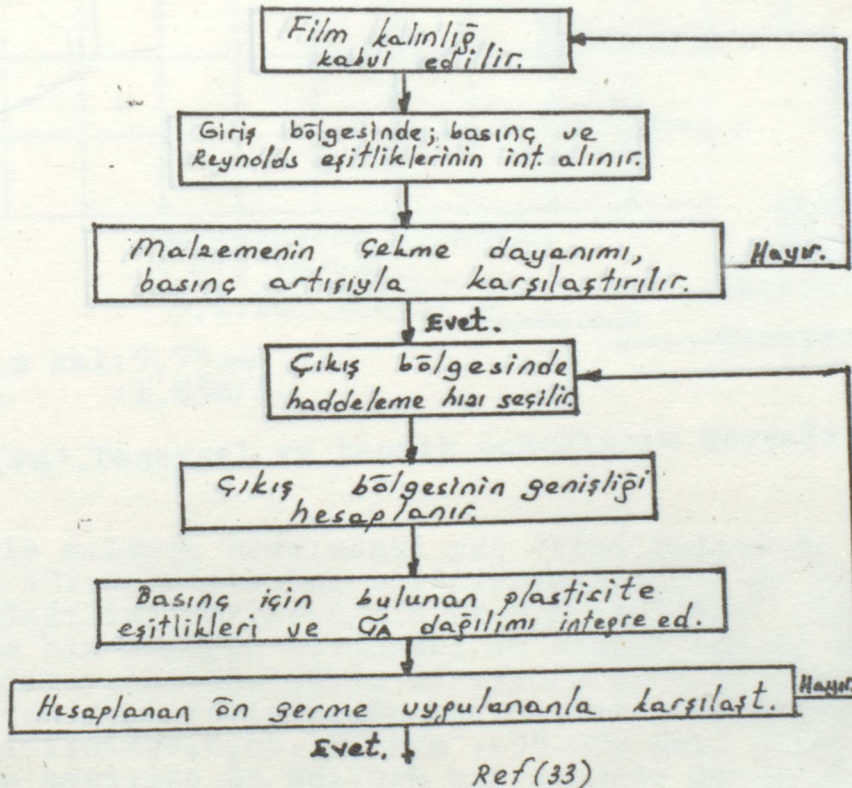
Verilen proses şartlarında,basınç ve kayma gerilmesini hesaplamak için,iki problem vardır.

1-Giriş bölgesindeki film kalınlığı bulunmalıdır.

2-Bulunan film kalınlığı kullanılarak,basınç ve kayma gerilmesi sonucu meydana gelen deformasyon miktarı belirlenmelidir.

Sekil(73) de çözüm metodunun programlama kartı görülmektedir.Deformasyon bölgesindeki basıncı belirlemek için çıkış bölgesi malzeme hızı ile,hadde çevre hızı arasındaki oran belirlenir.Bu da deformasyon bölgesi uzunluğunun hesaplanmasına yarar.Deformasyon bölgesindeki basınç ve kayma gerilmeleri hesaplanırken,işleme giriş bölgesinden başlanır,çünkü giriş şartları bilinmektedir.İşlem çıkış bölgesindeki ön germe kuvveti ile son bulur.Ön germe kuvvetinin verilen haddeleme şartları ile karşılaştırılması gerekir,deformasyon bölgesindeki integrasyona,hesaplanmış ön germe değerinin verilen haddeleme şartlarıyla bir noktada toplanıncaya kadar devam edilir.

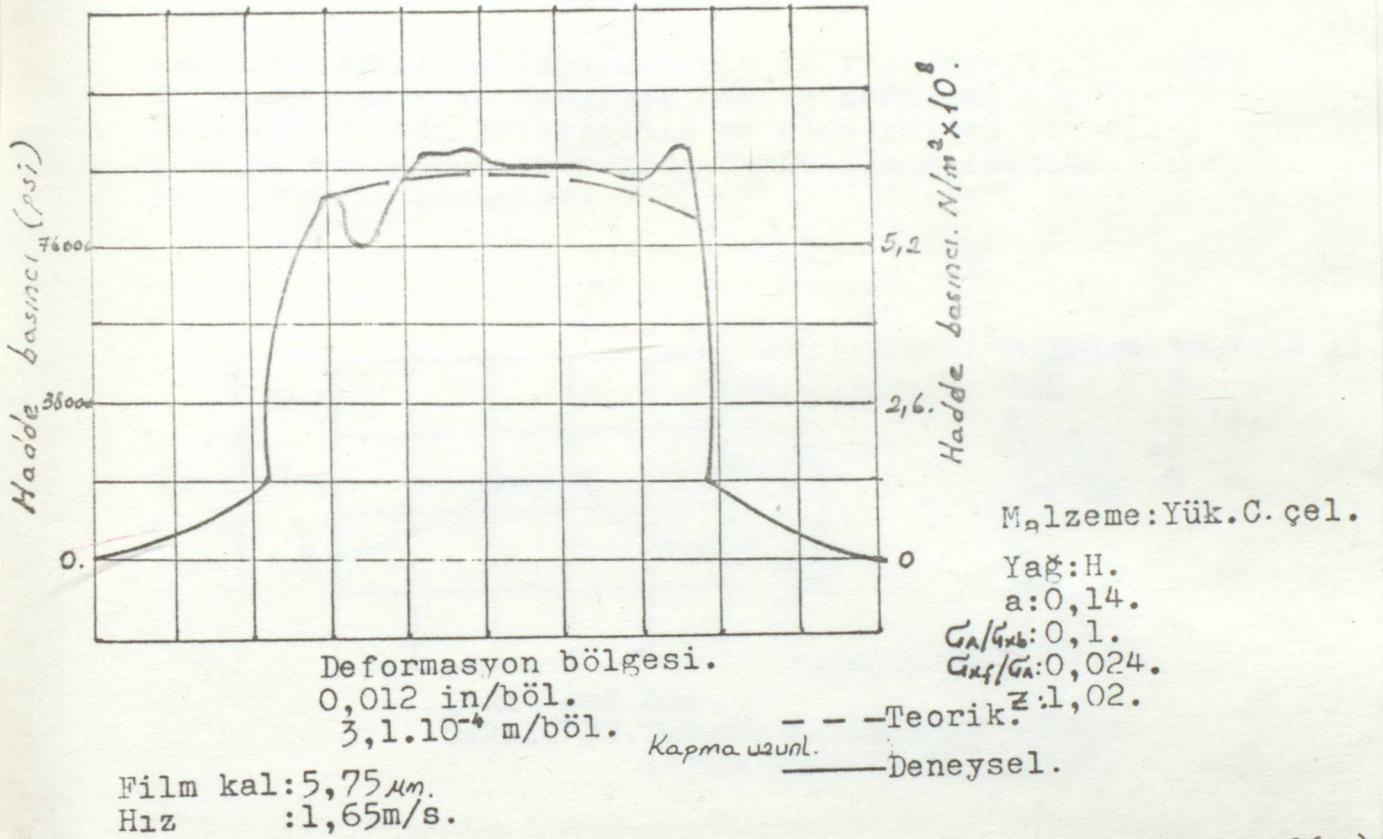
Sekil(73).İşlemin akışı.



5.2.3. Deneysel ve teorik basınç dağılımının karşılaştırılması.

Çeliğin haddelenmesi.

Çeliğin hidrodinamik yağlama ile haddelenmesi sırasında, haddelenen yüzey üzerinden transfer edilen mangan kullanılarak geliştirilen basınç izi şekil(74) deki gibidir. Bu deneysel iz, tutulan manganın buharlaşmasının direncindeki değişimi temsil eder. Bu değişim ise şekil değiştirme şartlarını ortaya çıkarır.³⁴



Şekil(74). Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması. Ref(34)

Hadde ile malzeme arasındaki yağ filmi kalınlığı elde edilen malzemenin yüzey kalitesini belirler. Şekil(74) de görüldüğü gibi, basınç dağılımı yaklaşık olarak $5,85 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (85.000 psi) gibi maksimum bir değer solundaki en yüksek basınç noktasından başlar. Bu değer, çeliğin çekme deneyinde elde edilen çekme mukavemetinden çok daha fazladır. Bu basınç, deformasyon bölgesine (kapma yayı) girildikçe, $6,65 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ (95.000 psi) değerine yükselmektedir, bu seviyede de üniform bir şekilde devam etmektedir. Şekil (74) de görüldüğü gibi, basıncın dönen kenarındaki önemsiz yükseklik, elastohidrokinamik yağlama şartlarıyla açıklanabilir. Basınç dağılımının teorik görünümü şekilde kesikli çizgilerle gösterilmiştir.³⁴

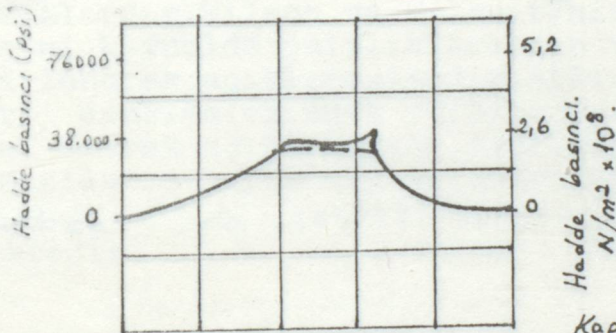
Şekilden de görüldüğü gibi, teorik iz, giriş bölgesini takip eden, basıncın en düşük noktasını tahmin edemez, bu nedenle düz bir şekle sahiptir, bu düzgünlüğün sebebi, çıkış bölgesinin yanında (çok yakınında) nötral noktanın bulunmasıdır.

Manganın basınç izi, haddelenen malzemenin akma gerilmesini redüksiyon esnasında gözlemlemek için güzel bir uygulamadır. Elde edilen σ_a değeri maksimum basınç gibi alınıp giriş ve deformasyon bölgelerinin birleşme yerindeki basınç gibi teoride kullanılabilir. Redüksiyon içinde ortalama akma gerilmesini şöyle gösterebiliriz.

$$\sigma_{ort} = 0,4 \sigma_{gir} + 0,6 \sigma_{çık}$$

Alüminyum haddelenmesi.

Aynı çalışmalar alüminyum için de yapılmıştır. Şekil (75) de hesaplanmış ve deneysel basınç dağılımı görülmektedir. Analizde H yağı kullanılmış ve elde edilen yağ filmi kalınlığı operasyon esnasında hadde ile malzemeyi ayırmak için yeterli olmuştur.



Malzeme: 3003H14 Al.

Yağ : H.

a : 0,16.

σ_{xb}/σ_a : 0

σ_{xf}/σ_a : 0

Z : 1,04.

h_1 : 4,7 μm .

Hız : 1,52 m/s.

Kapma Uzunluğu. --- Teorik. — Deneysel.

Şekil değ. böl.

Şekil (75). Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması. Ref (34)

5.2.4. SONUÇLAR:

Soğuk haddelemede yağlayıcının davranışı ile ilgili ısı bir newtonien model geliştirilmiştir. Çelik ve alüminyum band haddelenmesi için çıkarılan örnek çözümler, deneysel ölçüm değerleri ile mukayese edilmektedir. Bu analizlerin başlıca sonuçları şunlardır.

1-Yağlayıcı viskozitesi üzerindeki ısı etkileri, giriş bölgesinde şekillenen, hidrodinamik filmin büyüklüğü üzerin-

de ve şekillendirme bölgesindeki basınç dağılımı üzerinde önemli bir rol oynar.

2-Hidrodinamik yağlama durumundaki basınç dağılımı, metal-metal temasının yeraldığı durumlardan daha üniform olmaktadır. Basınçtaki tepe noktaları daha düşüktür.

3-Bu teorinin kullanılması ile, bir hidrodinamik haddeleme yağlayıcısının performansı büyük bir yaklaşıklıkla hesaplanabilmektedir. Ayrıca değişik özelliklerdeki yağlayıcıların, basınç dağılımı ve film kalınlığı üzerindeki etkileri değerlendirilebilmektedir.

4-Hesaplanan film kalınlığı, yüzeylerin pürüzlülüğü toplamından daha fazla olduğu durumlarda bu teori kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.

5.3. Haddelirmede hidrodinamik yağlama modelleri.

Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Cheng²⁸ in yayınladığı plastohidrodinamik yağlama teorisinde, yağlayıcı film kalınlığının belirlenmesinde elastohidrodinamik teoriden yararlanılmıştır. Bedi, Hillier ve Avitzur²⁹, hidrodinamik film kalınlığını hesaplamak için enerji eşitliklerinden yararlanmışlardır. Wilson ve Walowit³⁰, hidrodinamik haddeleme teorisini Reynolds eşitliklerinden ve izotermal eğrilerden yararlanarak açıklamışlardır. Atkins³¹ ise teoriyi Reynolds enerji denklemlerinden yararlanarak ve koet akımlarını ihmal ederek açıklamıştır. Aşağıdaki tabloda çeşitli araştırmacıların kabulleri ve sonuçları görülmektedir.

Tabloda da, çeşitli kabullerin karşılaştırılması görülmektedir.

1970

ATKINS³¹
1970

Nöklasa/
elastik
deform.

Rijit, ara
sıra plastik

$\eta \cdot \eta_0 \exp(\eta \cdot \eta_0)$

Reynolds
eşitlikleri

Geniş
alan
değişimi

WILSON³⁰
ve
WALOWIT
1971

Rijit

" "

$\eta \cdot \eta_0 \exp(\eta \cdot \eta_0)$

Reynolds
eşitlikleri

Geniş
alan
değişimi

AVITZUR²⁹
ve
GROSSEMAN
1971

"

" "

$\eta = \text{Sabit}$

"

Geniş
alan
değişimi

Yağlayıcı için newtonien bir model kullanılması ve deformasyon bölgesinde sadece koet akımları kabul edilmiştir. Ref (31)

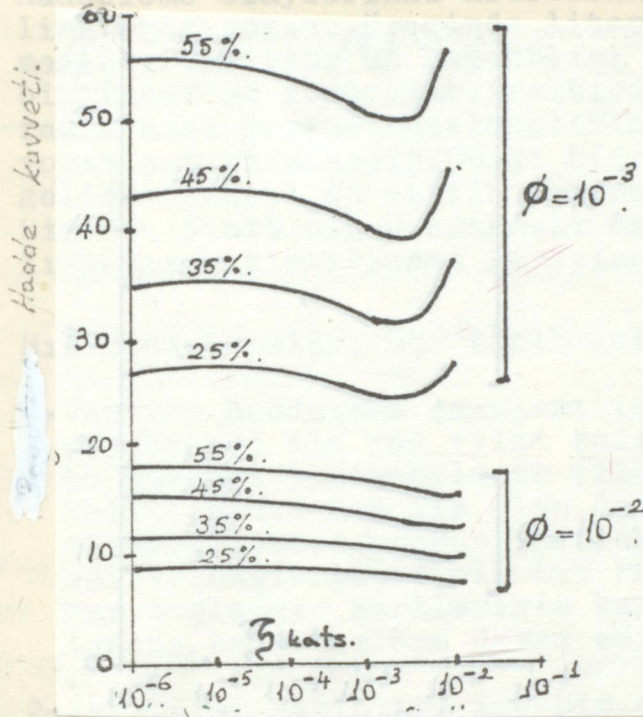
5.4. Hız etkisi.

ARAŞTIRMACI	Hadde	Band	Yağlayıcı özellik. (viskozite)	Giriş ve çıkış bölgesi için kabuller.	Film kalınlığının hesabı.
³¹ NADAI.1939	Rijit.	Rijit ARA-SIRA PLASTİK	$\eta = \text{Sabit.}$	—	Sabit. (Anlaşılır bir açıklama yok.)
²⁸ CHENG 1966	Rijit.	// //	$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\delta p - \delta T)$	—	Parabolik. Dowson ve Higginson formülüyle.
³¹ ROBERTS 1967	//	// //	$\eta = \text{Sabit.}$	—	Sabit enerji dengesi.
²⁹ BEDI ve HILLIER 1969	Şekil değiştirmiş çap.	// //	$\eta = \text{Sabit.}$	—	Sabit minimum oran ve entropi değ.
³¹ BEDI ve HILLIER 1970	Rijit.	Rijit - Pekleşme etkileri hesaba kat.	$\eta = \eta'_0 \cdot \exp(\delta p)$	—	Entropi değişimi ve exponansiyel.
³³ ATKINS 1970	Noktasal elastik deform.	Rijit, ara sıra plastik.	$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\delta p - \delta T)$	Reynolds eşitlikleri.	Giriş bölgesi zallinde noktasal değişme.
³³ WILSON ve WALOWIT 1971	Rijit.	// //	$\eta = \eta'_0 \cdot \exp(\delta p)$	Reynolds eşitlikleri.	Giriş bölgesi parabolik formda.
³² AVITZUR ve GROSSMAN 1971.	//	// //	$\eta = \text{Sabit.}$	—	Sabit enerji dengesi.

Yağlayıcı için newtonien bir model kullanılmış ve deformasyon bölgesinde sadece koet akımları kabul edilmiştir. Ref(31)

5.4.Hız etkisi.

Sekil(76) da çeşitli kesit redüksiyonları için,haddeleme yükü hız bağıntısı görülmektedir.Bu sonuçlar Atkins isimli araştırmacı tarafından çıkarılmıştır.



Sekil(76).Hadde kuvvetinin
hıza bağlı değişimi.
Ref(31)

$$\xi = \frac{p_0 \cdot V_f}{2 \cdot k \cdot f_0}$$

$\phi=10^{-3}$ için, $\xi=3 \cdot 10^{-3}$ değerine karşılık hadde kuvveti eğrilerinde bir minumum noktanın ortaya çıktığı görülmektedir.Bu noktadan sonra hadde yükü,hız artışı ile artma göstermektedir. $\phi=10^{-2}$ için eğriler $\xi=10^{-2}$ değerinde düşüm göstererek yatay duruma girmektedir.Şekil de yer almayan $\xi=10^{-3}$ de $\phi=5 \cdot 10^{-5}$ için haddeleme yükünde bir minumuma yönelme görülür.

Billigmann ve Pomp³¹ isimli araştırmacılar haddeleme olayında hız etkilerini araştırmak için,kaymalı yataklarda kullanılan Sommerfeld diyagramlarından yararlanmayı düşünmüşlerdir.

ξ sayısına modifiye olmuş Sommerfeld sayısı diyebiliriz. Hız artarken sürtünmedeki artışla gayet iyi bilindiği gibi eğrilerde bir minumum nokta tanımlanabilir.Minimumun altındaki hızlarda,sınır veya karışık yağlama ortaya çıktığında,pratikteki minumum nokta teorisinin ileri sürdüğünden daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.Büyük ξ değerlerinde,haddeleme yükü arttığında,filmin en kalın olduğu küçük ϕ değerinde,hız etkisinin daha dikkate değer olması gerektiği görülmüştür.Yüklerin artmaya başladığı $\xi=10^{-4}$ den itibaren haddeleme hızları yaklaşık 10000 fit/dak

(~ 50 m/s.)

ya çıkmaktadır. $\phi = 10^{-3}$ için hadde yükünde işaret edilen minimum değer $\zeta = 3 \times 10^{-3}$ e karşılık gelmekteydi, buradaki hadde hızı ise, pratikte kullanılan değer çok daha üstünde, yaklaşık 100.000 fit/dak (500 m/s) dir.

Haddeleme olaylarında hidrodinamik yağlama için gerekli limit hız konusu, üzerinde literatürde bir bilgiye rastlanmamıştır. Avitzur'un bahsettiği gibi hız araştırması ayrı bir inceleme konusudur. Araştırmacıların çoğu, limit hız araştırması yerine incelemelerini film kalınlığı üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Çünkü hidrodinamik yağlama olayının gelişmesindeki en etkili parametre yağ filmi kalınlığıdır. biz de limit hız üzerindeki araştırmalarımızı, film kalınlığı-hız bağıntısından yararlanarak sürdüreceğiz.

Hız hesaplamaları üç türlü geliştirilebilir:

1-Verilen haddeleme şartları için maksimum basınç hesaplanır, basınç ile yağ filmi kalınlığı arasındaki bağıntıdan bu basıncı taşıyabilecek film kalınlığı hesaplanır. Film kalınlığının hız ile olan değişimini veren bağıntı ve diyagramlardan, proses şartları için gerekli hız tesbit edilir. Başlangıçta bir hız kabulü yapıldığı için bu değer başlangıç şartlarıyla karşılaştırılır. Uygunluk sağlanana kadar işleme devam edilir.

2-Yağ filmi kalınlığı ile hız arasındaki bağıntıdan yararlanılır. Hidrodinamik yağlamanın oluşması için gerekli yağ filmi kalınlığı tespit edilir. Bu veriden yararlanılarak hız tespitine gidilir. Yağ filmi kalınlığının tespit edilmesinde, hadde ve band yüzeylerinin maksimum yüzey pürüzlülüklerinden yararlanılır.

3-Billigmann ve Pomp isimli araştırmacıların yaptığı gibi kaymalı yataklar için çıkarılmış olan Sommerfeld diyagramlarından yararlanılır.

Yapacağımız örnek uygulamada, Dow, Kannel ve Buparanın çıkar-³⁴mış olduğu yağ filmi hız arasındaki ilişkilerden yararlanacağız.

$$\frac{V}{U_1} = 1,06$$

$$y_1 \geq (R_{th} + R_{th})(3 \dots 5)$$

$$y_1 \approx 20 \mu m \text{ alınabilir}$$

ÖRNEK uygulama: 2,5 mm kalınlığındaki tavllanmış Ck10 çeliği, 2 mm kalınlığa, çapı 350 mm olan çelik haddelerle haddeleniyor, genişlik 200 mm olduğuna göre, hidrodinamik yağlama için gerekli hızı hesaplıyalım.

Haddeleme operasyonunda, viskozitesi $\eta_0 = 4738 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ olan yüksek viskoziteli bir yağ kullanılmaktadır. Bu yağın basınç viskozite katsayısı $\delta = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ dur. a redüksiyon miktarı 0,20 dir. Çeliğin akma gerilmesi, logaritmik şekil değiştirme miktarından yararlanılarak Ck10 çeliği için $\sigma_A = 50 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ alınabilir. Pekleşme etkilerini gözönüne almadan, ayrıca ön ve arka germeleri de yok kabul edersek, yağ filmi kalınlığını veren bağıntı:

$$h_f = \frac{3 \cdot \eta_0 \cdot \delta \cdot (U_1 + V)}{1 - e^{-\delta(\sigma_A - \sigma_{yb})}} \sqrt{\frac{R_0}{\alpha \cdot h_1}}$$

Burada tespit edilmesi gereken iki değer vardır. İlki haddede çevre hızı V ile, haddelenen band hızı U_1 arasındaki oran, diğeri ise hidrodinamik yağlamayı gerçekleştirecek (metal-metal temasını engelliyecek) yağ filmi kalınlığıdır. $\mu = 0,05$ alınabilir.

$$\frac{V}{U_1} = 1 + \left(\frac{h_0}{h_1} - 1 \right) \left(\frac{\alpha_t}{\alpha_k} \right)^2$$

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = 0,053 \text{ rad.}$$

$$\alpha_t = \frac{\alpha_k}{2} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\alpha_k}{2} \right)^2 = 0,012$$

$$\frac{V}{U_1} = 1,06$$

$$y_1 \geq (R_{tb} + R_{th})(3 \text{ --- } 5)$$

$$y_1 \approx 20 \mu\text{m} \text{ alınabilir.}$$

bu değerler yerine konursa;

$$20 \cdot 10^{-6} = \frac{3.4738 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot (1+1,06) \cdot V}{1 - e^{-2,5 \cdot 10^{-8} (50 \cdot 10^7 - 0)}} \sqrt{\frac{0,175}{0,20 \cdot 0,002}}$$

$V \approx 1,3$ m/s bulunur. Bu hız yeterli gibi gözükürse pratikte bu hızın en az beş katına erişilmesi gereklidir. Biz burada band ve hadde yüzeylerini mükemmel düzgünlükte aldık pratikte bu değerler çok daha fazladır. Uygulamada yaklaşık bir hesap için $y_1 = 1$ mm alınmalıdır, bu değer için de hız yaklaşık 6,5 m/s çıkar. Dow, Kannel ve Bupara'nın alüminyum ve çelik için yaptıkları araştırmalarda, alüminyum bantların haddelenmesi esnasında $5,75 \mu\text{m}$ lik yağ filmi kalınlığının, 1,65 m/s lik bir haddeleme hızında, metal-metal temasını engellemeye yettiğini göstermişlerdir. Aynı araştırmacıların çeşitli redüksiyonlar için elde ettikleri sonuçları şöyle özetliyebiliriz. *Ref(33)*

Malzeme. Yağ. Redüksiyon. V/U_1 . y_1 (mm) V (m/s)

Yük.C
çeliği. H. 0,14. 1,02. 5,75. 1,65.

Yük.C
çeliği. C 0,14 1,04. 0,1. 1,65.

3003H14
Al. H 0,16 1,04. 4,7. 1,52.

Yük.C
çeliği. C 0,30 1,09. 2,8. 1,65,

HADDE	Kotor gücü	DİRELİ.	Çalışma hızı	Redüksiyon
Yük.C çeliği. C	0,30	1,09	2,8	1,65,
F 1	2-50	Düşük vites.	24000 kran	1,65
F 1	50	Yüksek vites	48000 kran	1,65
F 1	2-50	Yüksek vites	96000 kran	1,65
F 2 ve F 3	30	Düşük vites	70000 kran	1,65
F 2 ve F 3	2-30	Düşük vites	140000 kran	1,65
F 2 ve F 3	30	Yüksek vites	228000 kran	1,65
F 2 ve F 3	2-30	Yüksek vit.	456000 kran	1,65

5.5.Uygulamada,hidrodinamik yağlamanın haddeleme prosesi- ne uygulanışı.

Hidrodinamik yağlamanın haddelemede uygulaması en güzel şekliyle,Ereğli Demir Çelik İşletmelerinde ve Nasas in folyo haddehanelerinde görülebilir.Burada,Nasas in uygulamalarındaki bazı pratik değerlerden bahsedilecektir. **39**

Nasas haddehanesindeki hadde ayaklarının bazı karakteristik değerleri şunlardır.

İş merdanesi:

Çap (max)-254 mm. (çıkış) :2 adet 30 HP.

Çap (min)-228,6 mm. (çıkış):400 m/dak-1600 m/dak.

Uzunluk-1625,6mm. :219 Amp.

Hadde hızı: Düşük vites- 400 m/dak.

Yüksek vites-958 m/dak.

Ezme-Min %20.

Bobin çapı-Max.1346 mm,Min.546 ve 406 mm.

Bobin genişliği-max.1372 mm,min.635 mm.

Bobin ağırlığı-Max.4400 kg.

Destek merdanesi.

Çap (max)-660,4 mm.

Çap (min)-609,6 mm.

Uzunluk-1613 mm.

ELEKTRİK MOTORLARI:

HADDE	Motor gücü	DİSLİ.	Çıkış mom.	Giriş mom
F 1	50	Düşük vites	121000 kgmm	176000 kgmm
F 1	2-50	Düşük vites.	242000 kgmm	352000 kgmm
F 1	50	Yüksek vites	38000 kgmm	55200 kgmm
F 1	2-50	Yüksek vites	76000 kgmm	110400 kgmm
F 2 ve F 3	30	Düşük vites	70000 kgmm	104000 kgmm
F 2 ve F 3	2-30	Düşük vites	140000 kgmm	208000 kgmm
F 2 ve F 3	30	Yüksek vites	22800 kgmm	34000 kgmm
F 2 ve F 3	2-30	Yüksek vit.	45600 kgmm	68000kgmm

Hadde motor gücü-500 HP.

F 1 Haddesi.

Motor gücü (giriş ve çıkış) : 2 adet 50 HP.

Motor devri (giriş ve çıkış): 400 m/dak -1600 m/dak.

Motor amperi :173 Amp.

Motor gerilimi :120 Volt.

F 2 ve F 3 Haddeleri.

Motor gücü (giriş ve çıkış) :2 adet 30 HP.

Motor devri.(giriş ve çıkış):400 m/dak-1600 m/dak.

Motor amperi. :219 Amp.

Motor gerilimi :120 Volt.

HADDELEME UYGULAMASI.

Bir malzeme haddelenirken aşağıdaki faktörlerin bilinmesi ve uygulanması gerekir.

1-Taşlanmış merdane:Merdane çok iyi taşlanmış olmalıdır, merdane yüzeyinde taşlama izleri olmamalı, simetrik taşlama yapılması gereklidir.İyi bir haddeleme için iyi taşlanmış merdane şarttır.

2-Merdane bombesi (crown):Bombenin istenen miktarda ve simetrik olması gerekir.

3-Ezme:Ön yükleme basıncı ile temin edilir.

4-Metalin eni:Metalin eni gergi değerlerine tesir eder.

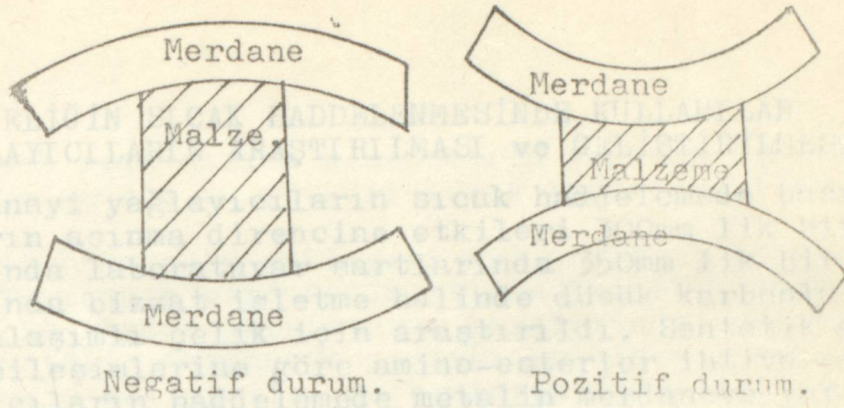
5-Metalin giriş kalınlığı:Malzemenin giriş kalınlığının değişmesi ,hadde hızını etkiler.

6-Hadde hızı:Hız arttıkça metal incelir,hız azaldıkça metal kalınlaşır.

7-Bobin giriş gergisi:Giriş gergisi arttıkça malzeme incelir,giriş gergisi azaldıkça malzeme kalınlaşır.

8-Bobin çıkış gergisi:Metalin yüzey düzgünlüğünü bu gergi ile ayarlarız.

9-Hadde yağı:Her kalınlık için yağ değişik sıcaklıklarda kullanılır.Hadde yağının iki önemli vazifesi vardır,ilki metal metal temasını engelliyerek,haddelemeyi kolaylaştırmak,digeri soğutmayı temin etmektir.



- Hadde hızındaki bir artış, merdanelerin negatif duruma geçmesi demektir.
- Hadde hızındaki bir azalış, merdanelerin pozitif duruma geçmesi demektir.

3-Hadde soğutma yağı:

Genellikle haddenin ilk çalıştırılmasında, yüzey düzgünlüğü ile hızın arttırılmasına ihtiyaç vardır. Malzemede dalga olan yere isabet eden soğutma yağı vanaları diğer kısımlara nazaran daha fazla açılır. İlk haddelemeye başlamadan önce, merdanelerde hız ve ön yükleme basıncının arttırılması mecburiyeti ve merdanelerin soğuk olması nedeniyle kenar dalgalanmaları meydana gelir. Bu durumda merdaneyi pozitif duruma getirmek dolayısıyla kenar dalgalanmalarını gidermek için, orta kısımlara isabet eden yağ vanaları biraz daha kısılıp diğer taraflar biraz daha açılır.

Sac halindeki transformator çeligi (KT) 2,5-3,5 mm kalınlıklarında hazırlanıp silikatlı çinko ile kaplanarak 1000°C'ye kadar ısıtılmıştır. Isıtılan sac parçalarının 1000°C'ye kadar tezgahına kadar geçen zaman içindeki ΔT_1 ısıtılma süresi parçanın her iki ucuna ve ortasına yerleştirilen adet termokupl vasıtasıyla ölçülür. Sac parçalarının 1000°C'den 700°C'ye kadar ısıtılma süresi ΔT_2 olarak hesaplanabilir. Plakların 700°C'den 300°C'ye kadar radyasyonla kaybettikleri ısıdan plastik deformasyonla kazandırdıkları ısı çıkarılması ile elde edilir.

$$T = \Delta T_1 - \Delta T_2$$

Deneyde deformasyon sırasında numunenin ısıtılma süresi 1000°C ile 300°C arasında tespit edilmiştir.

Yeni ve ilaveciolar kullanmaya başlamadan önce 1000°C'ye kadar ısıtılan sac parçaları benzer ile yıkanıp, aseton ile yıkanır ve kurutulur.

Deneyden önce sac parçaları 1000°C'ye kadar ısıtılır. Yağın ısıtılma süresi 1000°C ile 300°C arasında tespit edilmiştir. Deneyden sonra sac parçaları 1000°C'ye kadar ısıtılır ve 1000°C'ye kadar ısıtılma süresi 1000°C ile 300°C arasında tespit edilmiştir.

5.6.-ÇELİĞİN SICAK HADDELENMESİNDE KULLANILAN YAĞLAYICILARIN ARAŞTIRILMASI ve GELİŞTİRİLMESİ

Katı sanayi yağlayıcıların sıcak haddelenmede basınca ve pasoların aşınma direncine etkileri 300mm lik bir hadde tezgahında laboratuvar şartlarında 350mm lik bir hadde tezgahında bizzat işletme halinde düşük karbonlu çelik hemde alaşımlı çelik için araştırıldı. Sentetik mum esaslı ve bileşimlerine göre amino-esterler ihtiva eden bazı yağlayıcıların haddelenmede metalin merdaneve yaptırılmasını 1,2-2 defa azalttığı ve pasolardaki aşınma direncini 1,4-2,5 defa arttırdığı keşfedildi. Alaşımlı çeliklerin (10KhSND ve 45SKhl) sıcak haddelenmesinde yağlayıcı kullanılması halinde merdaneve aşınma direncinde merdaneve gelen artış düşük karbonlu çeliğin (St3sp) haddelenmesinde göre 1,8 defa fazla olmaktadır. ²²

Yağlayıcıların geniş miktarda üretim sahasına girmesi ile haddelenme teknolojisinde, hadde mamülünün kalitesinin yükselmesinde ve haddehanelerin verimliliğinin artmasında ümit verici gelişmeler olacaktır.

²⁶
Zhdanow Metalurji Enstitüsü ve Donetsk İşletmelerinde laboratuvar ve imalat düzeyinde araştırmalar yapılmıştır.

Laboratuvar şartlarında araştırmalarda 300mmlik bir hadde tezgahı kullanılmış ve yassı çelik numuneler sıcak olarak haddelenmiştir. Sentetik mum esaslı (TU 33-30705-70) 26 çeşit yağlayıcı hazırlanmıştır. Çoğu petrolün rafinerilerinden elde edilen ürünler olup sıcak haddelenme sırasında sağlığa aykırı duman vs. çıkarmazlar. Sentetik mum esaslı bu yağlayıcılar dönen merdane ile temas ettirilerek hadde yüzeyinde ince bir tabaka oluşturmurlar.

Saç halindeki transformatör çeliği (EZh) 2,5x50x900 mm ölçülerinde hazırlanıp silikatlı elektrik fırınında 930°C'ye kadar ısıtılmıştır. Isıtılan deney parçasının fırından hadde tezgahına kadar geçen zaman içindeki ΔT_1 sıcaklık düşümü parçanın her iki ucuna ve ortasına yerleştirilen 3 adet termokupl vasıtasıyla ölçülür. Radyasyonla kaybedildiği ΔT_1 ısı hesapla bulunur. Plakanın kaybettiği toplam ısı radyasyonla kaybettiği ısıdan plastik deformasyonla kazandığı ısı ile çıkarılması ile elde edilir:

$$T = \Delta T_1 - \Delta T_d.$$

Deneyde deformasyon sırasında numunenin sıcaklığı 865°C ile 875°C arasında tespit edilmiştir.

Yeni yağlayıcılar kullanmaya başlamadan önce hadde merdaneleri benzer ile yıkanıp, aseton ile yağları temizlendikten sonra iyice kurulanmıştır. Yağlamanın etkisini mukayese

yapabilmek için ayrıca numunelerin yağlama yapılmadan merdaneye sadece su püskürtülerek haddelenmesi yapılmıştır.

Az sayıda numunenin yağlayıcı kullanılarak haddelenmesi ile yağlayıcının merdanenin aşınmasına etkisinin tespiti zordur. Bu yüzden laboratuvar şartlarında yağlayıcının etkisi metalin merdaneye yaptığı ortalama basınçtan gidilerek tayin edilmiştir. Deformasyon kuvveti P 'yi ölçmek için bir dinamometre yerleştirilirmiş bir osilograf verisiyle P deki değişim bir fotoğraf kağıt seridi üzerine kaydedilmiştir. Buradan metalin merdaneye tatbik ettiği ortalama basınç;

$$P_{\text{ort}} = \frac{P}{b \sqrt{R \cdot \Delta h}}$$

Burada b (mm) plakanın ortalama genişliği, R (mm) merdane yarıçapı, h (mm) her bir pasodaki redüksiyon miktarını göstermektedir.

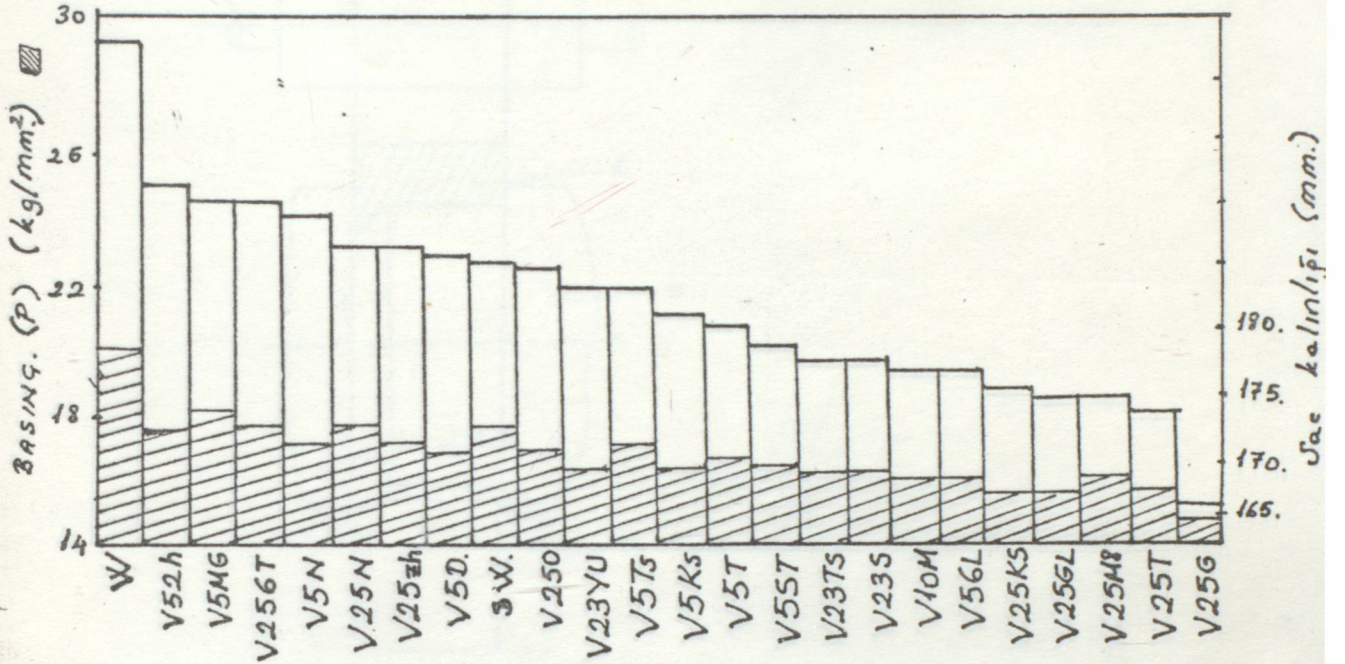
Deneylerden çıkan sonuca göre kullanılan bütün katı yağlayıcılar metalin merdaneye tatbik ettiği ortalama basınca hiç yağlayıcı kullanılmaması durumuna göre düşmektedirlerdir. Şekil (77))

En büyük basınç düşmesi (2 mislinden daha fazla) katı yağlayıcı olarak % 25 grafit ihtiva eden V25G kullanıldığında zaman elde edilmiştir. V5KS ile V25T arasındaki yağlayıcının kullanılması ile % 37-65 basınç düşümü gibi yeterli etkiler elde edilmiştir. V5TS, V23Yu, V25Dve saf sentetik mumun kullanılması halinde de % 18-34 basınç düşümü gibi önemli etkiler görülmüştür.

Gene Şekil (77) 'da haddelenmiş plakanın kalınlığının nasıl değiştiği görülmektedir. Bu aynı zamanda araştırılan yağlayıcıların etkinliğini dolaylı olarak göstermektedir.

Şekil 77- 300mm lik hadde tezgahında 2,5x50x90 ölçülerindeki transformator çeliğinin 4,5 m/3lik hızla % 25-35 redüksiyon oranında haddelenmesi durumunda metalin merdaneye tatbik ettiği basınç ve sağın kalınlığının farklı yağlayıcılar için değerleri (W Su; SW: Sentetik mum). Ref (26)

Donetsk işletmelerinde deneyler işletme şartlarında 350mm lik 2li bir hadde tezgahında 26mm yuvarlak 32x32mm kare, 45x6mm ölçülerinde yay çeliğinden sac ve 6 ve 7 no.lu kütlesi özel profil için yapılmıştır. 6 çeşit yağlayıcı denenmiştir. Bunlardan 3 tanesi laboratuvar deneylerinde kullanılanların aynı olup mum esaslı ile yalnız farklı yağlayıcılar ihtiva eden V40Gve V5K dir. Diğer yağlayıcılar



Şekil(77). Ref(26)

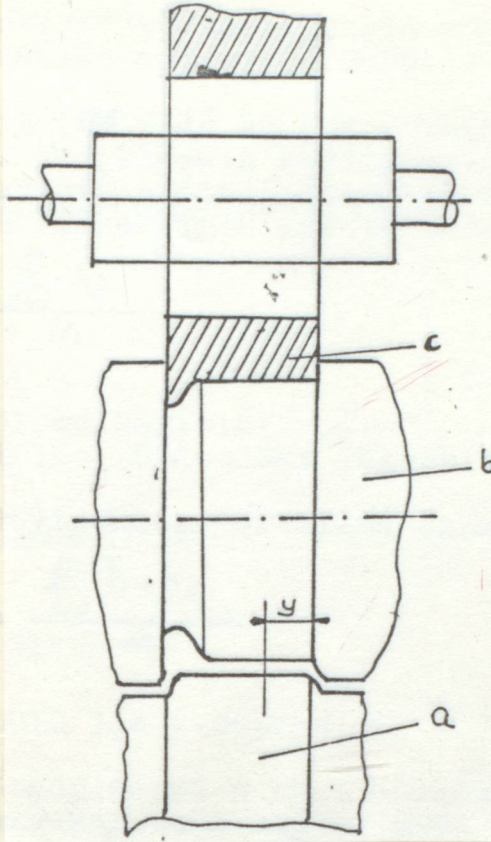
kalsiyum intibitör esaslı LP-1 ve L40G (9038-50701-70) ve kalsine soda esaslı amino ester ihtiva eden A5KS dir.

350 mmlık hadde tezgahında yapılan bu deneylerin sonucunda V5KS ve yağlayıcı ile merdane arasındaki tutucu özel bir arttırıcı kalsine soda ihtiva eden A5KS ile en fazla düşürülünmeyi azaltıcı etki elde edilmiştir. Saf halde veya diğer ilaveler ihtiva eden kalsiyum esaslı olan LP-1, mum esaslı V401 ve V40G merdanelerin yüzeyine daha az bağlanır ve merdaneyi aşınmaya karşı korumada daha zayıf kalır.

Şekil (78) de üst merdanenin finis pasosuna özel bir düzenekle monte edilmiş ve pasonun sekline uydurulmuş katı bir yağlayıcı gösterilmiştir. Ref(26)

Şekil78- Özel bir profil haddelenmesinde üst merdanenin finis pasosunun katı yağlayıcı ile beslenmesi

a,b alt ve üst merdaneler; c; katı yağlayıcı; d gayd borusu.



Şekil(78). Ref(26)

Deneyler farklı yağlayıcılar ile üzerinde birkaç finis pasosu aşmış aynı merdane takımı üzerinde yapılmıştır. Her paso özel birleşimdeki katı yağlayıcı ile beslenmiştir. Pasolar tamamen aşınıncaya kadar haddelenen maksimum profil miktarı tespit edilmiştir. Daha sonra diğer yağlayıcı kullanılarak diğer pasaya geçilmiştir. Mukayese yapabilmek için profil bir de normal teknoloji ile yağlayıcı kullanılmadan su ile soğutulularak haddelenmiştir.

Sıcak haddelerde katı yağlayıcıların, yağlayıcı kullanılmaması durumuna üstündekileri aşağıdaki kriterlerden değerlendirilebilir: Cerekli motor gücünde düşme miktarı, metalin merdaneye yaptığı basıncıdaki düşme miktarı, deformasyon bölgesindeki sürtünme kuvvetindeki düşme miktarı, sürtünme katsayısı ve ileri kaymadaki azalma miktarı, pasadaki aşınmanın düşme miktarı, pasadan aşınıncaya kadar haddelenen malzemenin artmasının miktarı.

Profil haddelenmesinde yağlayıcıların yararları iki parametre ile en iyi şekilde tanımlanabilir. Haddelenen mamulün kalitesinin artması, haddenin verimliliğinin artması.

Mamulün yüzey kalitesinin ve şekil kalitesinin geliştirilmesi ayrıca paso değişimi için geçen zaman kaybını azaltmak için herseyden önce finis pasolarının, karışık şekilli

pasoların ve aşırı zorlanmalara maruz pasoların aşınma direncini arttırmak gerekir.

Şekil (78)'de en çok aşınmaya uğrayacak bölge y bölgesi dir. Bu bölgenin kesiti dikdörtgen olup zamanla aşınma dolayısıyla dikdörtgenden sapma olur. Bu bölgedeki ortalama yüksekliğin pratik hesabı:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

n: ölçme sayısını

h_i : i inci ölçmedeki yüksekliği gösterir.

Dikdörtgendeki ortalama sapma

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{h} - h_i}{n}$$

formülü ile hesaplanır.

y bölgesindeki n adet malzemenin haddelenmesinden sonra aşınma boyutsuz bir katsayı ile değerlendirilebilir.

$$K_{\text{Aşınma}} = \frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_1}$$

$\bar{\delta}_n$ ve $\bar{\delta}_1$ haddelenen mamulün n'inci ve 1'inci parçadan sonra dikdörtgenden sapmasını gösterir.

Şekil (79)'da görüldüğü gibi gerek yağlayıcı kullanılarak ve gerek kullanılmadan aşınma katsayısı ile haddelenme sayısı n arasında doğrusal bir bağıntı elde edilmistir.

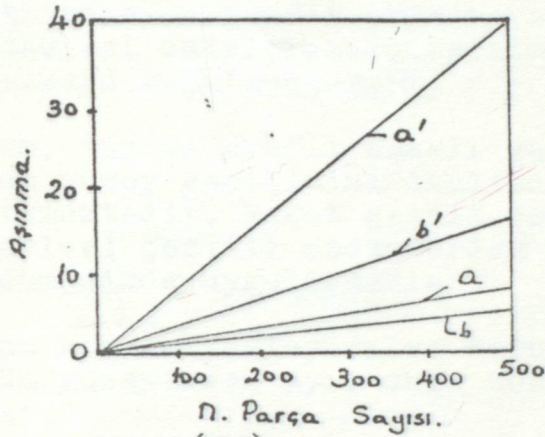
Şekil(79)- Deneydeki haddeler özel profilde haddelenen malzeme sayısı ile aşınma katsayısı arasındaki bağıntıyı gösteren diyagram düşük karbonlu çeliğin; a: yağlayıcısız, b: yağlayıcı ile haddelenmesi; alaşımlı çeliğin a':yağlayıcısız, b': yağlayıcı ile haddelenmesi . Ref (22)

$$\frac{0,014}{0,010} = 1,4$$

deney artarken, alaşımlı çelik durumunda artış daha fazla gözlemlenmektedir.

0,079/0,032 = 2,5 de 'a bir artış meydana gelir.

5.7. ÇELİKİN SICAK HADDELENMESİNDE KATI YAĞLAYICILARIN



Sekil(79).

Bu doğrusal bağıntının sonucu

$K_{\text{Aşınma}} = K_{\text{şiddet}} \cdot n$. İbağıntısı ile gösterilebilir

$K_{\text{şiddet}}$: Aşınma şiddeti

$K_{\text{şiddet}}$ farklı haddeleme koşulları ve farklı çelik tipleri için değişik değerler verir. Yapılan deneyde bulunan $K_{\text{şiddet}}$ değerleri aşağıdaki gibidir.

Az karbonlu çelik için 0,014/0,010.

Alaşımlı çelik için 0,079/0,032.

Sol taraftaki değerler yağlama yapılmadan, sağ taraftaki değerler ise ASKSyağlayıcı olarak kullanıldığında elde edilen sonuçlardır.

Sekil 79'dan elde edilen bu bilgileri incelediğimizde şu sonucu elde edebiliriz. Az karbonlu çelik ASKS ile yağlandıığında aşınma direnci; olarak merdanenin üzerine ve aynı miktarda bakılır.

$$\frac{0,014}{0,010} = 1,4.$$

defa artarken, alaşımlı çelik durumunda aynı yağlayıcı kullanıldığında zaman

0,079/0,032 = 2,5 defa bir artma meydana gelir.

5.7.ÇELİĞİN SICAK HADDELENMESİNDE KATI YAĞLAYICILARIN KULLANILMASI

Çeliğin sıcak haddelenmesinde grafit esaslı 6 tür yağlayıcı geliştirilmiştir. Yüzey gerilimini azaltıcı ilaveler ihtiva eden grafit esaslı yağlayıcıların optimum bileşimi deneysel datalardan çıkarılmış ve haddehanelerde kullanılmaya sunulmuştur.²⁶

Cam, tuz ve grafit esaslı yağlayıcılar ve su ile karışabilen yüzey gerilimini azaltan sentetik esaslı maddeler bilinmektedir. Fakat grafit esaslı yağlayıcılar hariç diğerleri çeşitli nedenlerden dolayı çeliğin sıcak haddelenmesinde uygulanmazlar.

Cam esaslı yağlayıcılar deformasyondan sonra onları mamulün yüzeyinden ayırmanın zorluğundan dolayı kullanılmazlar.

Tuz esaslı yağlayıcılar sulu çözeltiler halinde metal ve cihazların korozyonunun artmasına yolaçarlar.

Molibden disülfid (MoS_2) esaslı yağlayıcılar merdanelerin su ile soğutulması halinde kullanılmazlar. Çünkü $900-1200^\circ\text{C}$ de briketler bozularak MoS_2 oksitlenmesi neticesinde MoO_3 ve H_2SO_4 oluşur.

Sıcak haddelemede bir yağlayıcı seçilirken onun sadece yağlayıcı kapasitesi gözönüne alınmayıp, yağlayıcının mamulün yüzeyinden ayrılması, anti korozitif özellikleri ve sağlığa zararlı olması gibi özellikleri de dikkate alınır.

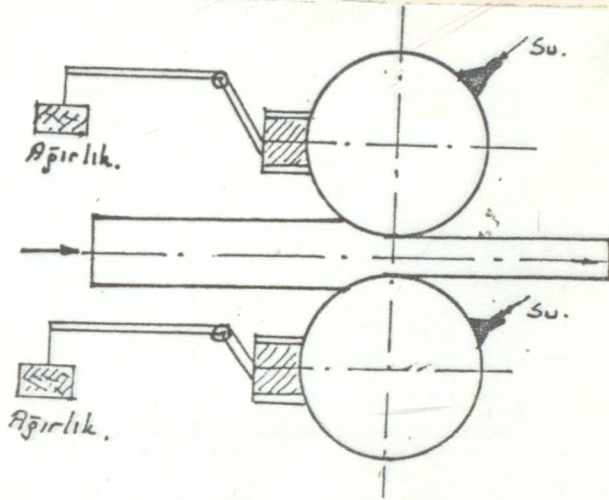
Sanayiye uygulanabilen 6 çeşit yağlayıcı yapılmış olup bunlar biriket şeklinde yüksek mekanik mukavemete sahip olup refrakter kil ve yüzey gerilimini azaltıcı ilavelerle zenginleştirilmiştir. Şekil(80)de görüldüğü gibi özel bir düzende katı biriketler merdaneye bastırılmış ve aşınma yoluyla merdane yüzeyinde ince bir tabaka yaratılmıştır. Baskı kuvveti değiştirilerek yağlayıcı tabakanın kalınlığı ayarlanmıştır.

Merdane üzerinde optimum yağlayıcı tabaka oluşturan, en iyi yağlama ve en az yağlayıcı tüketimi meydana getiren basınç $1,5$ ila 3kg/cm^2 dir ve esas olarak merdanelerin cinsine ve ezme miktarına bağlıdır.

Araştırmalar 300mm 'lik hadde tezgahında $0,35\text{m/s}$ haddeleme hızında ve $\Delta 5$ yüzey kalitesinde işlenmiş st5 çelikten yapılmış 346 mm çapındaki merdaneler kullanılarak yapılmıştır. Bir başka araştırma 300mm 'lik hadde tezgahında $9,7\text{ m/s}$ haddeleme hızında $\Delta 8$ kalitesinde işlenmiş 9Kh2F çelikten 288 mm çapında merdaneler kullanılarak yapılmıştır.

Deney parçaları özel fırınlarda tufal teşekkül etmesi önlenen koşullarda ısıtılmıştır. Numune üzerindeen fazla 5 C sıcaklık farkı oluşması temin edilmiştir.

Düzgün bir sürtünme şartı yaratmak için merdane haddelenmeden önce benzeri ile yıkanmış bezle iyice kurulandıktan sonra 40-45°C ye kadar ısıtılmıştır. Katı yağlayıcıların etkinliği metalin merdaneye tatbik ettiği kuvvetteki ve momentteki düşüşle tarif edilmiştir.



Sekil(80).Katı yağlayıcıların merdaneye uygulanması.

Deformasyon kuvveti bir dinamometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Dinamometreler her iki ayarlama vidasının altına yerleştirilmiştir. Moment tayini için duyarlı element direk olarak shaft üzerine yerleştirilir. Neticeler bir osilograf vasıtasıyla fotoğraf kağıt şeridi üzerine kaydedilir. ^{26,23}

Metalin merdane üzerine tatbik ettiği ortama basınç aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$P_{ort} = \frac{P}{B \cdot \sqrt{\Delta h \cdot R}}$$

P(kg) = deformasyon kuvveti.

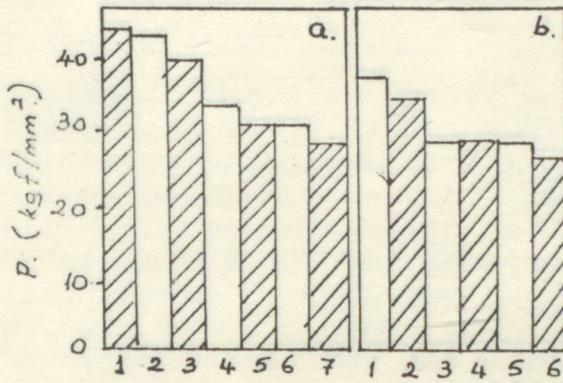
R(mm) = merdane yarıçapı.

h(mm) = mutlak redüksiyon.

B(mm) = ortalama genişlik.

Sıcaklığın etkisini bertaraf etmek için birinci grup testler 1150-1160°C arasında bir sıcaklıkta yapılır. Numuneler St3sp çelikten 4X62X450 mm boyutlarında hazırlanmış ve 1,3-1,6 mm mutlak redüksiyon;

$(100 \frac{\Delta h}{H} = \% 32,5-40)$ olacak şekilde haddelenmişlerdir. Şekil (81)de grafit esaslı ve yüzey gerilimini azaltıcı ilaveler ihtiva eden katı yağlayıcı (T,2T,MT,2m ve 3m) kullanılarak elde edilen sonuçlarını göstermektedir.



Şekil (81). a-Yağlayıcı kullanmadan.
Ref (26) b-Yağlayıcı kullanarak.
Su soğutmalı ve soğutmasız.

Buna göre deformasyon kuvveti ve metalin merdane üzerinde tatbik ettiği basınçta ortalama olarak %20-30 nispetinde bir azalma görülür. Tamamen kuru haddelemeye göre saf su kullanılması halinde metalin merdaneye uyguladığı basıncın %13-14 azaldığı görülür. Her tip katı yağlayıcı ile su kullanılmasında bu özellik görülür.

6M tipi yağlayıcı merdane su ile soğutulsun veya soğutulmasın metalin merdane üzerine uyguladığı basıncı en az düşüren yağlayıcıdır (%6-12). Bu yağ empreyenleri ihtiva etmeyen grafit esaslı bir yağlayıcıdır. Grafitin merdane üzerine yapışma özelliğinin zayıf olmasından ve haddelenen metal tarafından metal yüzeyinden götürülmesinden ve 500°C nin üzerinde grafitin oksitlenip yağlayıcı özelliğini kaybetmesinden ileri gelir.²⁶

Bu yüzden su-grafit karışımı sıcak haddede etkisiz olup kullanılmaz. Belirtilen haddeme sıcaklığında soğutma yapılsın veya yapılmazın yağlayıcılar merdane yüzeyine yüniform olarak dağılmışlar, yanma, buharlaşma mey-

dana getirmemişlerdir.

Yağlayıcılar finis haddelerinde sıcaklık 1150 °C den düşük iken kullanılmalari istenir.

İkinci grup deneyler 900 °C de su soğutmalı merdanelerde yapılmıştır. Ezme miktarını ve merdane yüzey kalitesinin sıcak haddede yağlayıcıların etkinliği üzerine tesirlerin incelenmesine önem verilmiştir. Bu yüzden ikinci grup testler aynı numuneler ile 300 mm'lik birinci tip ve daha hızlı olan ikinci tip hadde tezgahlarında yapılmıştır. Birinci durumda mutlak redüksiyon 1,2-1,5 mm

$(100 \cdot \frac{\Delta h}{H} = \% 30-37,5)$ ikinci durumda mutlak redüksiyon

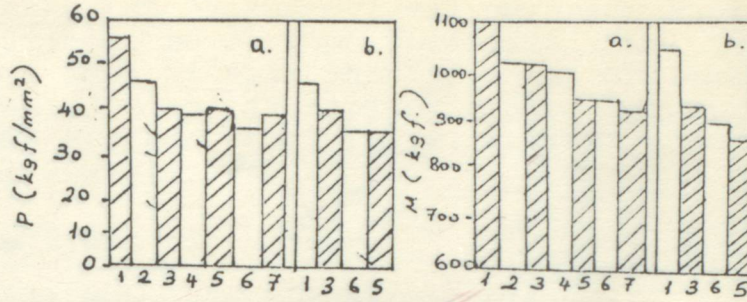
1-1,1 mm $(100 \cdot \frac{\Delta h}{H} = \% 25-27,5)$ alınmış. Grafit esaslı ve

yağlayıcı emprenye ihtiva eden yağlayıcıların kullanılmasıyla 0,35 ve 9,7 m/s hızlarda haddelenmesinde malzemenin merdaneye yaptığı basınçta ve momentte önemli bir düşme ortaya çıkmıştır ve Şekil (82) de gösterilmiştir. Böylece birinci durumda metalin merdaneye uyguladığı basınçta ortalama % 25-30 ve momentte % 8-15 lik bir düşme gözlenmiş, ikinci durumda ise basınçta % 10-20 ve momentte % 9,5-15 lik bir düşme gözlenmiştir. biriketi merdaneye bastıran kuvvet her iki durumda da aynı olup 1,5 kg/cm² alınmıştır.

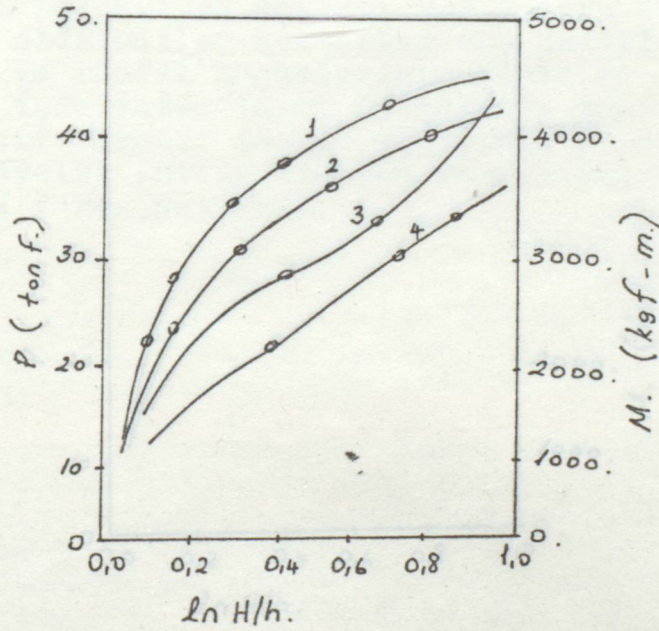
Farklı haddehanelerde sıcak haddelenmelerde yüzde redüksiyon miktarı birbirinden farklılıklar gösterir. Onun için yağlayıcıların etkisini redüksiyonun bir fonksiyonu olarak çıkarma yoluna gidilmiştir. Aynı haddeleme koşulunu temin edebilmek için 60 mm genişliğinde düşük karbonlu (st 3) çelikten yükseklikleri 20,25,30,35,40,45 ve 50 mm olmak üzere muhtelif numuneler alınmıştır. Herbirinin boyu 100 mm olup 18 mm kalınlığa haddelenmişlerdir. Böylece % 10 dan % 64 e kadar muhtelif redüksiyon oranlarında yağlama yapılmadan ve MT ile yağlama yapılarak haddeleme yapılmıştır. Haddeleme sırasında su ile soğutma yapılmış ve haddeleme sıcaklığı 1100- 1040 C olmuştur. Sonuçlar Şekil (83) de gösterilmiştir.

Gerek yağlama yapılsın ve gerekse yapılmazın haddeleme kuvveti ve momenti artan redüksiyon oranı ile artmıştır. Bunun yanında haddeleme kuvveti ve momentinin mutlak değeri yağlama yapıldığı durumda daha düşük kalmıştır. Yağlayıcı kullanılması durumunda daha düşük kalmıştır. Yağlayıcı kullanılması durumunda haddeleme kuvvetindeki düşme ortalama % 10 momentteki düşme ise ortalama % 20 olmuştur.

Karşılaştırmalı olarak, aynı elmas için bir seri deney yapılmıştır. Karbonlu 1100 D de impenyeveler 6 deney 35 m/s hız- ormulden



Şekil(82).Hadde basıncı ve momentinin, iki ayrı haddehanede, muhtelif yağlayıcılarla yapılan araştırması. Ref(26)



Şekil(83).Çeliğin sıcak haddelenmesinde yağlayıcı kullanılmaması(1),MT yağlayıcı kullanılması(2).Su soğutmalı(3),su soğutmasız(4). Ref(22)

6. TEL ÇEKME PROSESİNDE HİDRODİNAMİK YAĞLAMA ANALİZLERİ.

6.1. Kapma açısını tayin etmek için bir seri deney yapılmıştır. 60X200 mm ölçülerinde dikdörtgen kesitli düşük karbonlu çelikten (st 3) numuneler alınmıştır. Haddeleme 1100 C de yapılmış ve su soğutma kullanılmıştır. Yağlı empenyeler ihtiva eden HT katı yağlayıcı kullanılmıştır. 6 deney parçası 300 mm lik birinci hadde tezgahında 0,35 m/s haddeleme hızında yapılmıştır. Kavrama açısı şu formülden hesaplanmıştır.²⁶

$$\alpha = 2 \text{ arc sin. } \sqrt{\frac{\Delta h}{2D}}$$

Δh (mm): Maksimum redüksiyon miktarı
 $D = 346$ mm merdane çapıdır.

Yağlayıcı kullanılmadan yapılan haddelirmede $\Delta h = 25,4$ mm ye kadar çıkmış, yağlayıcı kullanıldığı durumda ise $\Delta h = 10,8-12,2$ mm değerine düşmüştür.

Buna göre kavrama açısı yağlayıcı kullanılması halinde $22^\circ 05'$ den $14^\circ 20' - 15^\circ 10'$ değerine düşmüştür. Böylece grafit esaslı ve içinde yüzey gerilimini düşürücü ilaveler ihtiva eden katı yağlayıcı kullanılması durumunda maksimum redüksiyon miktarı 2-2,2 defa düşmüştür. Fakat yine de elde edilen miktarlar saç haddelerinin finis tezgahları ve profil haddelerinin finis ve finis öncesi tezgahları için yeterlidir. Bu durumda yağlayıcı kullanılması yararlıdır. Grafit esaslı ve içinde yüzey gerilimini düşürücü ilaveler ihtiva etmeyen katı yağlayıcılar kullanılması ise yarar getirmez.

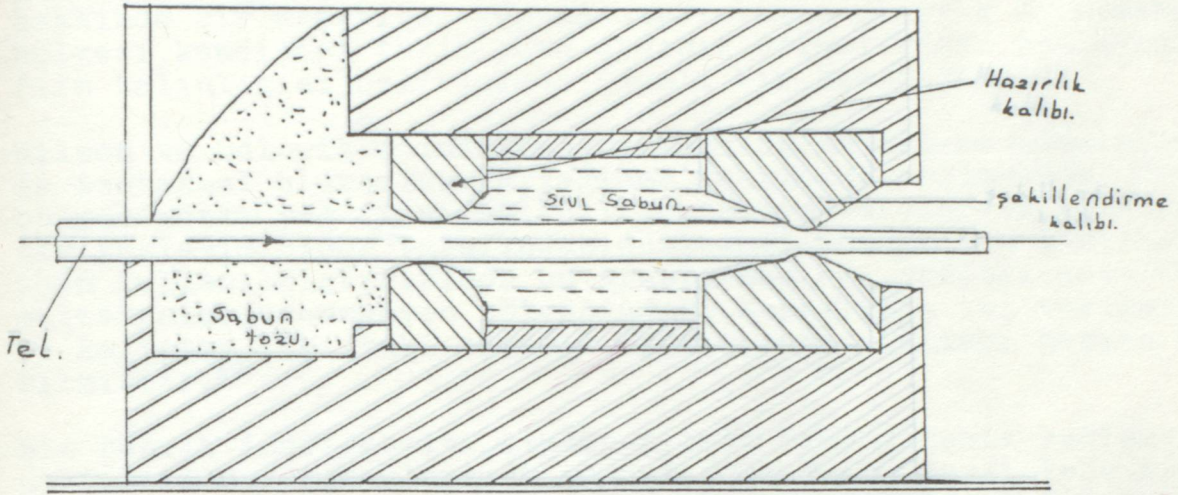
6.TEL ÇEKME PROSESİNDE HİDRODİNAMİK YAĞLAMA ANALİZLERİ.

6.1.Tel çekme prosesinde hidrodinamik yağlama teorileri.

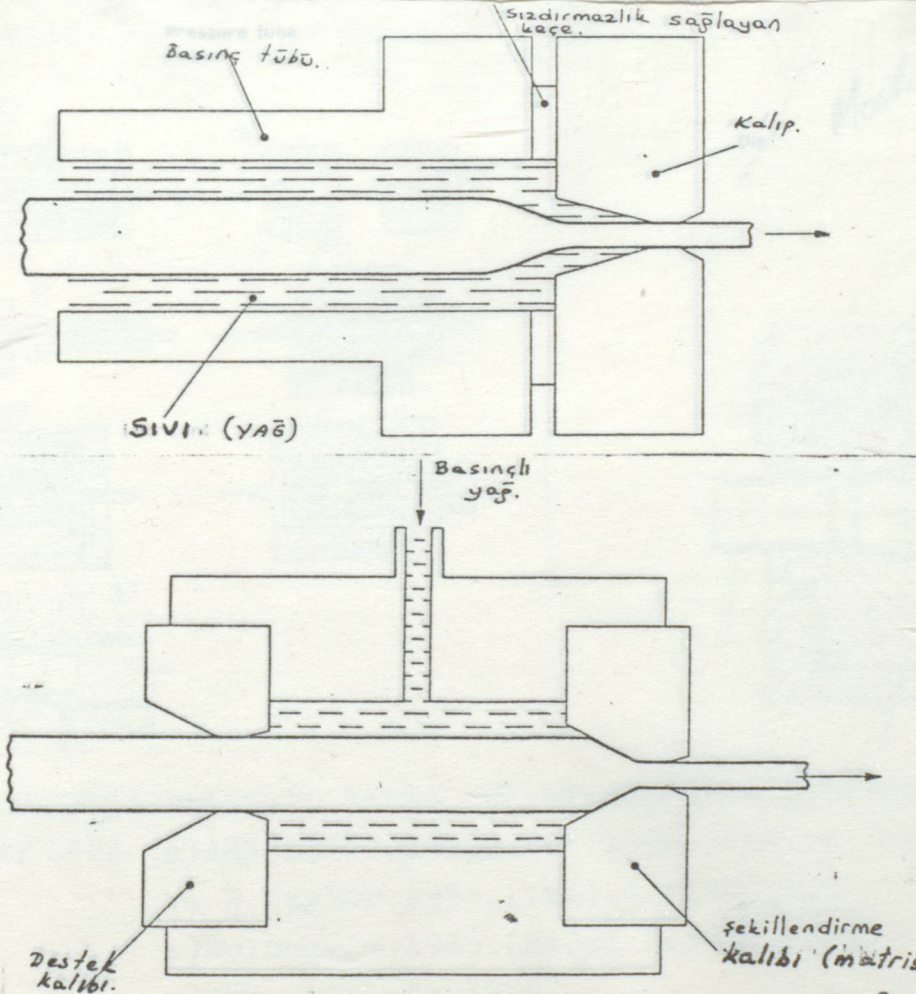
Bu konuyla ilgili ilk çalışmalar, Wisterich isimli araştırmacı tarafından yapılmıştır. Teorisini oluşturmadaki temel, kuru tel çekme uygulamalarında, yağlayıcı vazifesi ile kullanılan sabun taneciklerinin, malzeme kalıptan çıktıktan sonra yüzeyde kalmasıdır. Yüzeyde rastlanılan sabun tabakası, kalıp içinden geçen malzeme ile kalıp arasında metal-metal temasının olmadığı sonucunu verir. Bu konu üzerindeki araştırmalarını genişleten Ranger ve Wistreich, çekme hızı, kalıp açısı ve yağlayıcı viskozitesinin, hidrodinamik çalışma şartları üzerindeki etkilerini inceleyen deneyler yapmışlardır. Parsons ise ardışık sürekli kalıplarda, hidrodinamik yağlama olayını geliştirerek 45-65 m/s (900 fit/min) gibi yüksek çekim hızlarının elde edilebileceğini göstermiştir. Buradan elde edilen sonuca göre, böyle yüksek bir hızda, film kalınlığı, yağlayıcı cinsine bağlı olmaksızın hidrodinamik etkiyi ortaya çıkarabilecek bir parametredir. Yağ filmi kalınlığı olayda en az hız kadar etkilidir. Bu nedenle araştırmacıların üzerinde durduğu en önemli konu, hidrodinamik yağlama olayını meydana getirebilecek yağ filmi kalınlığıdır.

Tel çekme proseslerinde hidrodinamik yağlamanın uygulanması konusundaki ilk çalışmalar 1954 yılında Christopherson tarafından yapılmıştır. Bu uygulamanın temelini, kalıbın giriş yerine bir basınç tüpünün yerleştirilmesi oluşturur. Basınç tübü tel ile kalıp arasında uygun bir aralık olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çekilecek malzemenin tüp içindeki hareketi, bir hidrodinamik basınç etkisinin oluşmasına yardımcı olur. Kolmoro⁴⁷ isimli araştırmacı, girişteki basınç tübüyle ilgili değişik teknolojiler ileri sürmüştür. Bu önerilerin bir kısmı, teknolojik kullanım imkanı olan Middlemiss⁵¹ isimli araştırmacının geliştirdiği, basınç nozulları içeren bir sistemin, malzeme kalitesi için, basınç tübünden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Tel çekme uygulamalarında, daha fazla hidrodinamik etki meydana getirilmesi ve yağlamayı geliştirme çalışmaları, yeni gelişmeler ortaya çıkarmıştır. Malzeme ile kalıp arasında oluşturulan kalın yağ tabakası, çekme kuvvetini azaltmada ve kalıp aşınmasını minimuma indirmede yararlıdır. Fakat elde edilen yüzey hassasiyeti, yağ filmi kalınlığı ile direkt olarak ilgilidir. Christopherson'un geliştirmiş olduğu basınç tübü uygulamasında, tübte üretilen yüksek basınç sayesinde, malzeme kalıba ulaşmadan önce bir miktar şekil değiştirir. İlk çalışmalarda uzunluğu tel çapının 500 katı olan bir tüb kullanılmıştır. Tel ile kalıp arasında, kalıbın giriş tarafında bir boşluk bırakılmaktadır. Yağ tabakası basınç tübü ile tel arasına hız etkisi ile çekilir veya basınç etkisi ile verilir. Yaklaşık 600 fit/daklık hız için kalıp basıncı 10.000-40.000 psi ye ulaşır.⁴⁷



Şekil(84).Sabun tozlarından yararlanarak hidrodinamik yağlama. Ref(43)

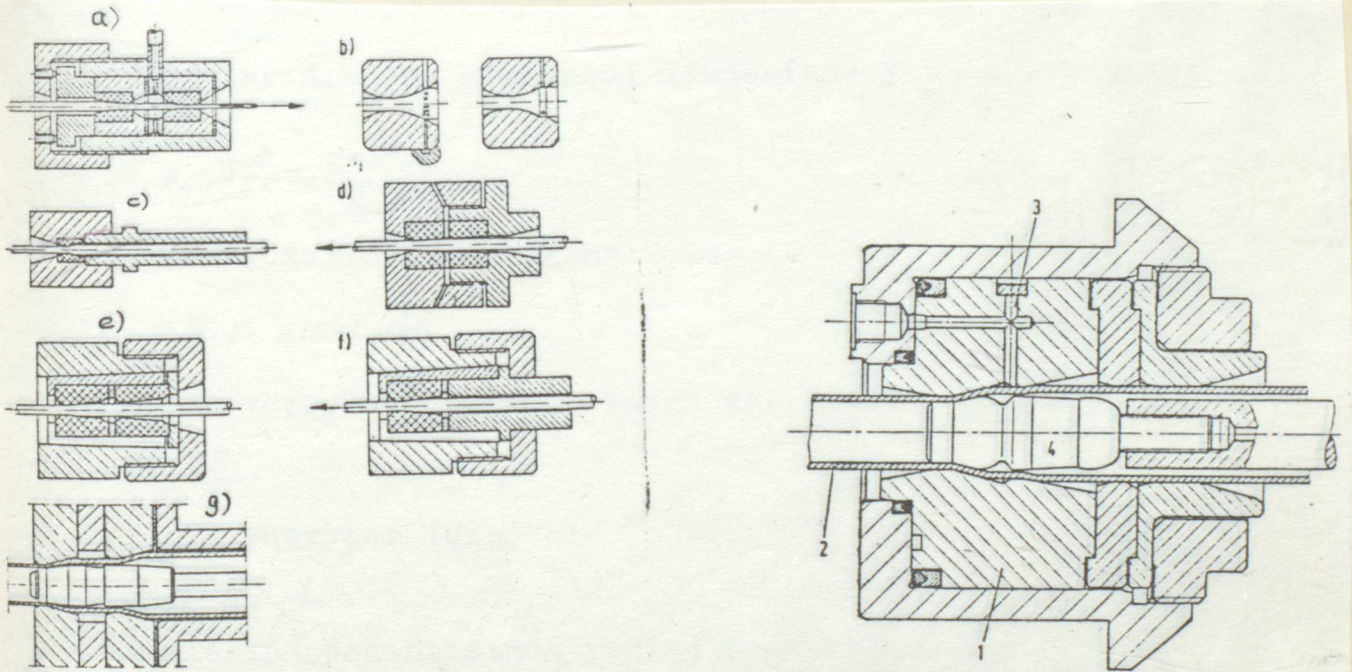


Şekil(85).Baskın yağ ile hidrodinamik yağlama. Ref(43)

Malzeme ve yağlayıcı üzerindeki ısı etkileri incelenmiş fakat, giriş bölgesinden plastik deformasyon bölgesine doğru olan yağlayıcı akımı ve hidrodinamik yağlama için limit hız hakkında bir araştırma yapılmamıştır. Oysa plastik deformasyon bölgesi, kendisini takip eden ardışık bölgelerdeki yağlayıcı film kalınlığını belirlemede önemli bir basamaktır.

Wilson ve Walowit isimli araştırmacılar, haddeleme proseslerinde izotermal hidrodinamik yağlama teorisini kullanarak, giriş bölgesindeki yağ filmi kalınlığını belirlemişlerdir. Buna yakın bir yaklaşım Bloor tarafından, düzlemsel yüzeylerin çekilmesi için kullanılmıştır. Bloor'un araştırmasında, yağlayıcının ve malzemenin, deformasyon bölgesindeki karşılıklı ısı etkileri ve kalıptan çıkıştaki elastik deformasyon etkileri hesaba katılmıştır.⁵³

Biz teorik incelememizi, elasto-plasto hidrodinamik yağlama analizlerinden yararlanarak yürüteceğiz. Esas önemli konu giriş bölgesidir. Çünkü giriş bölgesinde hesaplanabilecek minimum film kalınlığı, hidrodinamik yağlama olayının gelişmesi için en önemli parametredir. Önemli işlem parametrelerinin, sıvı film kalınlığı üzerindeki etkileri ve ısı etkileri de dikkate alınmıştır.



Şekil (86). Basınçlı çekme kalıplarının değişik uygulamaları.

Ref(47) a) AEG(1931). b) Tourett 1956. (yağ). c) Christopherson ve H. Naylor. 1955. (Yağ). d) BISRA. 1954. (Sabun tozu) e) Kolmogrov. 1963. (Sabun tozu) f) Gleiwitz. 1968. g) IMZ Gleiwitz. 1970.

1-Kalıp. 2-Basınç tübü. 3-Yağ girişi. 4-Mandrel.

6.2. Hidrodinamik yağlamalı tel çekmede sürtünme gücü kayıplarının üst sınır çözümü ile bulunması, geliştirilen modelin incelenmesi.

Tel çekme prosesleri için kinematik uygun hız elanını ve hız süreksizliklerini daha evvel açıklamıştık. Sürtünme ortalama-sındaki değişiklikler $(v_f \cdot \eta) / (R_f \cdot G_A)$ in bir fonksiyonu olarak şöyle tanımlanabilir.

$$\bar{\tau} = \frac{\int r \cdot ds}{s}$$

Hidrodinamik yağlama için kayma gerilmesi dağılımı,

$$\tau = \frac{\eta \cdot \Delta v}{h}$$

konik yüzeyler üzerindeki hız dağılımı.

$$\Delta v = v = v_f^2 \cdot r_f^2 \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

Yağlayıcı film kalınlığı,

$$h = \frac{r}{r_f} \cdot \frac{\varepsilon}{\cos \alpha}$$

bu eşitliklerin, kayma gerilmesi ifadesinde yerine konulması ile,

$$\tau = \eta \cdot v_f \cdot r_f^3 \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{\varepsilon \cdot r^3}$$

silindirik yüzeyin bir elemanı için,

$$ds = 2 \pi \cdot r \cdot \sin \alpha \cdot dr$$

silindirik yüzeyler üzerinde kayma gerilmesi dağılımı.

$$\tau = \eta \cdot \frac{v_f}{\varepsilon}$$

Silindirik yüzeyler için,

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot L$$

bu değerlerin $\bar{\tau}$ bağıntısında yerine konulması ile,

$$\bar{\tau} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_f \cdot R_f^3 \cdot (\cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha / \varepsilon) \int_{r_f}^{r_0} r^{-2} dr + 2 \pi R_f \cdot L \cdot \eta \cdot (v_f / \varepsilon)}{2 \pi \sin \alpha \cdot \int_{r_f}^{r_0} r \cdot dr + 2 \pi R_f \cdot L}$$

limit sınırlar arasında integrasyon yapılırsa,

$$\frac{\bar{\tau}}{\zeta_A} = 2 \frac{\eta \cdot V_f / (R_f \cdot \zeta_A)}{\epsilon / R_f} \frac{(\cos^2 \alpha / \sin \alpha)(1 - R_f / R_o) + L / R_f}{(1 / \sin \alpha)[(R_o / R_f)^2 - 1] + L / R_f}$$

burada h yerine yağlayıcı film kalınlığı konursa, ortalama kayma kuvveti ve kayma gerilmesi ile yağlama kalınlığını veren bağıntılar elde edilir.

$$\frac{\bar{\tau}}{\zeta_A} = 2 \frac{(\cos^2 \alpha / \sin \alpha)(1 - R_f / R_o) + L / R_f}{(1 / \sin \alpha)[(R_o / R_f)^2 - 1] + L / R_f}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\eta \cdot V_f}{R_o \cdot \zeta_A} \right) \cdot \frac{f(\alpha)}{[\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha / 3][1 - (R_f / R_o)^3] + L / R_f}}$$

$$\frac{\epsilon}{R_f} = \sqrt{\left(\frac{\eta \cdot V_f}{R_f \cdot \zeta_A} \right) \cdot \frac{1}{f(\alpha)} \left\{ \frac{\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3} \left[1 - \left(\frac{R_f}{R_o} \right)^3 \right] + \frac{L}{R_f} \right\}}$$

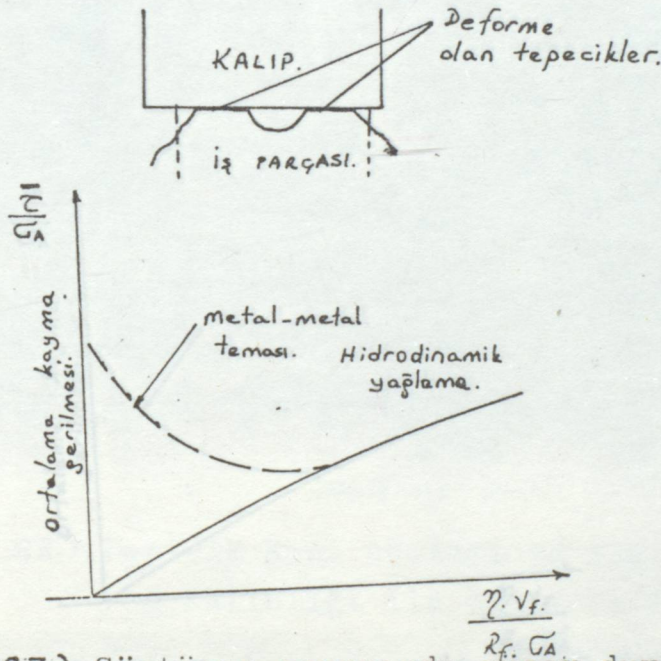
Bu eşitlikler hidrodinamik yağlama şartları için geçerlidir.

Boyutsuz terim arttığı zaman ilgili ortalama kayma kuvveti ($\bar{\tau} / \zeta_A$) ve yağlayıcının bağıl yağlama kalınlığı (ϵ / R_f) de artmaya başlar. Fakat pratikte sürtünme kuvveti, ($\eta \cdot V_f / R_f \cdot \zeta_A$) küçük değerlerinde dahi tahmin edilenden daha yüksektir. Bunun nedeni, ($\eta \cdot V_f / R_f \cdot \zeta_A$) küçük değerlerinde, ortaya çıkan yağ kalınlığı da küçüktür. Bu şartlarda kalıp ve malzeme yüzeyinin pürüzlülükleri, hidrodinamik yağlamanın gerçekleşmesine müade etmez.

Kalıp ve iş parçası yüzeyleri asla tam olarak düzgün değildir, yağlama sağlanmadığı zaman, yüzey pürüzlülükleri arasındaki ilişki sürdürülür. Sürtünme esnasında pürüzlülükler deforme olurlar. İş parçalarının yassılaştırmış yüzeyleri ile kalıp arasındaki temas yüzeyi küçülür. Görülebilir temas alanında, iş parçaları ile kalıp arasında bir mesafe vardır.

Şekil (87) de görüldüğü gibi, yağlama sağlandığı zaman, yağ tabakası hareketli yüzey arasında sürüklenir ($\eta \cdot V_f / R_f \cdot \zeta_A$) değeri yükselirken, iki yüzey arasındaki boşluk yağ ile dolar. Bu şartlarda, malzeme üzerindeki basınç değerinin daha fazlası yağ tabakasına geçirilmiş olur, bunun sonucu daha az basınç değeri malzemenin şekil değiştirmesi için harcanır.

$(\eta \cdot V_f / R_f \cdot G_A)$ değerinin yeterince yüksek değerlerinde ve bunun yanında kritik değerlerde, yeteri kadar yağ iç yüzeye sürüklenir, bu da iki yüzey arasında tamamiyle bir ayrılma sağlanmasını sağlar. Alçak sürtünme değerlerinin olduğu hidrodinamik yağlamada metal-metal teması görülmez. Yağ tabakası kalınlığının, hidrodinamik yağlamayı sürdürmek için gerekli kritik değerin üzerinde olduğu varsayılınsın, bu durumda elde edilen hidrodinamik yağlama şartları, viskozite, koni açısı, redüksiyon gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Ayrıca yağlayıcının ıslatma kabiliyeti denilen özellik de önemli bir parametredir. ^{18,43.}

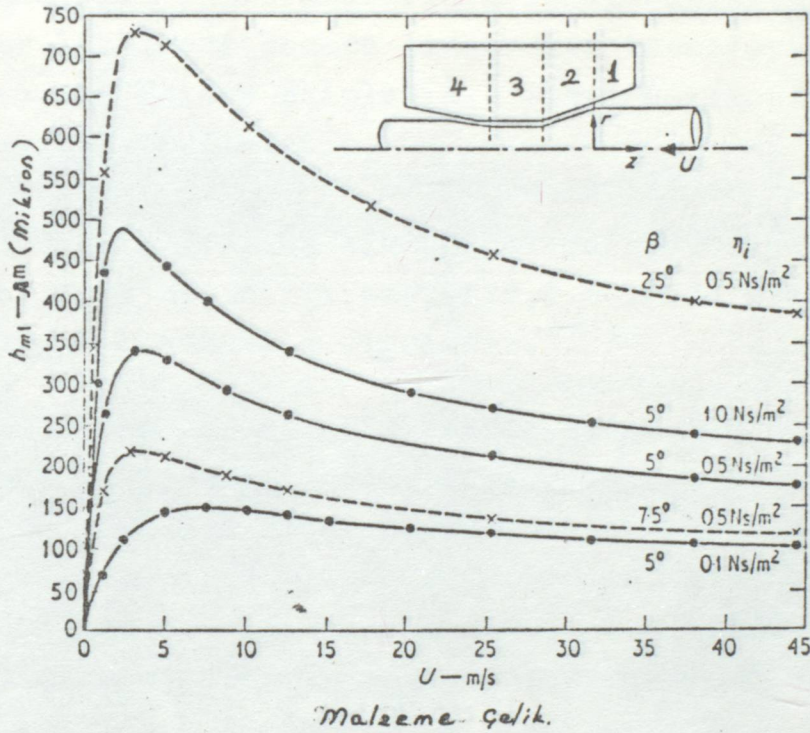


Sekil(87). Sürtünme esnasında yüzey durumu.
Ref(18)

6.3. Tel çekme proseslerinde elasto-plasto-hidrodinamik yağlama analizleri.

6.3.1. Analitik model.

Tel ile *matris* arasındaki temas bölgesi şekil(88) deki gibi 4 bölgeye ayrılır.



Şekil(88). Değişik koni açıları ve yağ viskoziteleri için yağ kalınlığı ile hız arasındaki bağıntı. Ref(46)

1.bölge elastohidrodinamik giriş bölgesidir,tel ile kalıp arasındaki boşluğun yağ ile dolduğu kabul edilir.Tel kalıp içine doğru hareket ederken,malzemenin akma gerilmesine eşit bir hidrodinamik basınç elde edilir.Kalıp ve tel bu basıncın etkisi altında elastik deformasyona uğrar,yapılan analiz sadece malzemenin deformasyonu ile ilgilidir.Yani kalıbtaki elastik deformasyonlar ihmal edilir.Ayrıca ısıнын lineer dağıldığı ve

kalıb ~~sıcaklığının~~ çevre ~~sıcaklığının~~ eşit olduğu kabul edilir. Basıncın ve ısıнын yağlayıcı viskozitesi üzerindeki etkileri göz önüne alınarak, Reynolds ısı ve enerji denklemlerine uygun sonuçlar elde etmek için iterativ yaklaşım tekniği uygulanır. Basıncın telin akma gerilmesine ulaştığı nokta 1. ve 2. bölge arasındaki sınırı belirler. 2. bölgede tel, kalıb içine doğru ilerlerken kalıb çapına uygun bir biçimde plastik olarak şekillendirilir.

Tel ısısı, malzemenin plastik deformasyonuna ve yağlayıcıdan tele doğru olan ısı transferinin ihmal edilmesine bağlı olarak artar. 1. bölgede sadece lineer ısı transferi gözönüne alınmıştır, ayrıca Poisey akımlarının ihmal edilmesiyle analiz daha da basitleştirilmiştir.

3. ve 4. bölgeler kalıba ait bölümlerdir. 3. bölgede tel hızı ve yağlayıcı film kalınlığı sabittir, 2. bölgede uygulanan ısı analizine uygun bir analiz uygulanır. ⁴⁶

3. ve 4. bölgeler arasındaki sınırı, telin tekrar elastiklik özelliklerini kazanması belirler. Kullanılan kalıbın şekli hakkında daha gerçekçi birşeyler söylemek için teoride, çıkış bölgesi konik veya parabolik formda kabul edilir. Elastiklik özelliklerinin kazanılması bu bölümde de devam eder. Sınır kavitasyon şartları bu bölgede doyuma ulaşmıştır. Kavitasyon olayı: hareket halinde bulunan bir akışkanın içinde, dikkate alınan bir bölgedeki lokal basınç, akışkanın hızının doğrultu ve büyüklük bakımından, herhangi bir sebeple değişmesi halinde, sıvının o bölgedeki sıcaklığına karşılık gelen, buharlaşma basıncının altına düştüğü takdirde, o bölgede lokal bir buharlaşmanın meydana gelmesi ve neticede bazı noktalarda, sıvı ile dolu olmamanın habbeciklerin teşekkülü ve genel akışkan hareketine iştirak eden bu habbeciklerin, sıvının buhar basıncını aştığı bir bölgeye gelince, ani olarak yok olmaları ve boşalan geometrik hacme, sıvı kütlesinin ani hücumu neticesi meydana gelen sert darbelerdir. Kavitasyon sınır şartı olan, akışkanın hangi bölgesinde basıncın buhar basıncının altına düştüğü tespit edilemez.

6.3.2-1. Bölgede elastohidrodinamik analiz.

Bu bölgedeki hidrodinamik basınç değişimi, Reynolds un integral formuna uygun bir esitlikle tanımlanabilir. ⁴⁶.

$$\frac{\delta p}{\delta z} = - 6. \eta. U \left[\frac{h - h_{m1}}{h^3} \right] \quad h_{m1} - \text{Ortalama film kalınlığı.}$$

h_{m1} , 1. ve 2. bölgeler arasındaki film kalınlığıdır. En önemli problem, bu sınırı tesbit ederek, h_{m1} film kalınlığını belirlemektir. Bu amaçla, Reynolds ısı ve enerji esitliklerine uygun sonuçlar elde etmek gereklidir. Burada iterativ yaklaşım tekniğinden yararlanılır. Bu konudan daha sonra tekrar bahsedilecektir.

Film kalınlığı h in hesaplanması, her bölgede malzemede oluşan elastik deformasyon miktarının bilinmesini gerektirir. Çünkü proses için çok önemli olan yüksek basınçlar, bu bölgenin sonunda küçük bir alanla sınırlandırılmıştır. Ayrıca plastik deformasyon bölgesi boyunca basıncın sabit bir değerde kalması beklendiğinden, elastik deformasyona uğratılan telin şeklini tahmin edebilmek için, basitleştirilmiş bir model kullanılır. Bu durum, üniform basınç hattına uymak zorunda olan bir sapma durumu gibi kabul edilebilir. Buradaki basınç malzemenin akma gerilmesine eşittir. Tel yüzeyinin elastik deformasyonu şu bağıntı ile verilebilir. ($U_{r=a} = \text{Gerinim.}$)

$$U_{r=a} = \frac{-P.a}{\pi.G} \times \int_0^\infty \frac{2(1-\nu)I_1^2(\beta_1) \cdot \sin(\beta_1.c/a) \cdot \cos(\beta_1.z/a) \cdot d\beta_1}{\beta_1^3 [I_0^2(\beta_1) - I_1^2(\beta_1) - 2\beta_1(1-\nu)I_1^2\beta_1]}$$

a -elastik şekil değiştirmiş telin yarıçapı, r ise simetri ekseninde herhangi bir yarıçaptır. Bu eşitlik sayısal yaklaşımlara uygun sonuçlar elde edebilmek amacıyla yeniden düzenlenmiştir. Conway ve Farnham⁵¹, üniform basınç bandındaki bir silindir yüzeyindeki radyal yerdeğiştirmeleri analiz etmişlerdir. β_1 in büyük değerleri için integraller kosinüs integralleri ile yer değiştirir. β_1 nin orta değerleri için ($40 < \beta_1 < 200$) integraller asimtotik yaklaşımla, Bessel fonksiyonları ile yer değiştirir. β_1 in ($0 < \beta_1 < 40$) değerleri için Simpson kaidesi geçerlidir.

$$I_0(\beta_1) \cong e^{\beta_1} \left(\frac{1 + \frac{1}{2} \beta_1}{\sqrt{2\pi} \beta_1} \right)$$

$$I_1(\beta_1) \cong e^{\beta_1} \left(\frac{1 - \frac{3}{8} \beta_1}{\sqrt{2\pi} \beta_1} \right)$$

Basınç bloğu ucunun, 1. ve 2. bölgenin sınırına kadar uzandığı kabul edilir.

6.3.3. Isı analizi.

Enerji eşitliği şöyle yazılabilir.

$$K_1 \cdot \nabla^2 T_1 = f_1 \cdot C_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} - \frac{\phi}{J}$$

Burada yapılan kabuller şunlardır.

- 1- Herhangi bir bölgede, $w = f(r, \partial P / \partial z)$ dir.
- 2- $u = v = 0$.
- 3- $(\partial T / \partial r)$ en etkili ısı gradyanıdır.
- 4- Tamamen gelişmiş sabit bir laminar akım kabul edilir.
- 5- $\partial P / \partial r = \partial P / \partial \theta = 0$.
- 6- Tüm bölgelerdeki akım izoviskozdur.
- 7- $(\partial T / \partial r)$ oranı büyük olmasına rağmen, yağ filmi incedir ve Reynolds enerji eşitliklerindeki, viskozite değerinde kullanılan bir oran olarak kabul edilir.

Bu kabuller yardımıyla, enerji eşitliği şu şekli alır.

$$\frac{k_1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = - \frac{\eta}{J} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \dots$$

Navier-Stokes denklemlerinin uygulanışı ile,

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{r}{2\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{A}{r}$$

integrali alınırsa.

$$w = \frac{r^2}{4\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + A \cdot \ln r + B \dots$$

$r = r_1, w = -U, r = r_0, w = 0$, sınır şartlarının kullanılması ile A ve B katsayıları belirlenerek yerine konursa,

$$\frac{\partial T_l}{\partial r} = - \frac{1}{J \cdot k_l} \left[\frac{r^3}{16\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 + A^2 \eta \frac{\ln r}{r} + \frac{A \cdot r}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{c}{r} \right]$$

$$T_l = \frac{1}{J \cdot k_l} \left[\frac{r^4}{64\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 + \frac{A^2 \eta}{2} (\ln r)^2 + \frac{A \cdot r^2}{4} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + c \cdot \ln r + D \right]$$

$$r=r_i, T_l=\theta_w, r=r_o, \text{ ve } T_l=\theta_d.$$

sınır şartları kullanılarak C ve D sabitleri belirlenir.

Sadece giriş bölgesi için,

$$\theta_w = \theta_l.$$

6.3.4. Kalıp yüzey ısısının tahmini.

Kalıp ısısının çevre ısısına döndüğü nokta, kalıp eksenine simetrik bir yüzey olarak seçilir. İç ısı kaynağının olmadığı sabit durumlar için,

$$\nabla^2 T_d = 0.$$

başta yaptığımız üçüncü kabule göre, bu bağıntı basitleştirilirse,

$$\frac{\partial T_d}{\partial r} = \frac{F}{r}.$$

integre edilirse.

$$T_d = F \cdot \ln r + H.$$

$r=r_o, T_d=\theta_d, r=R, T_d=\theta_l$, sınır şartları kullanılarak F ve H sabitleri belirlenir.

Sürekli ısı akımı için,

$$2\pi \cdot r_o \cdot k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial r} \right)_{r=r_o} = 2\pi \cdot R \cdot k_d \left(\frac{\partial T_d}{\partial r} \right)_{r=R}$$

burada, $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{4}{t_2} (\tau + \tan \beta \cdot \sigma_y)$

$$\tau = \eta \cdot (u_2/h_2).$$

$$\Theta_d = \Theta_i - \frac{1}{\mathcal{J} \cdot k_l / \ln(r_i/r_o) + \mathcal{J} \cdot k_d / \ln(r_o/R)} \left[\frac{r_o^4}{16\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right.$$

$$\left. + A^2 \cdot \eta \cdot \ln r_o + \frac{A \cdot r_o^2}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\ln(r_i/r_o)} \times \left[- \frac{1}{64\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 (r_i^4 - r_o^4) \right. \right.$$

$$\left. T_d = \left[- \frac{A^2 \cdot \eta}{2} \times \left\{ (\ln r_i)^2 - (\ln r_o)^2 \right\} - \frac{A}{4} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot (r_i^2 - r_o^2) \right] \right]$$

Ortalama yağ sıcaklığı şöyle hesaplanabilir.

$$2 \pi \cdot \mathcal{J}_l \cdot C_l \int_{r_i}^{r_o} r \cdot T_l \cdot dr = \mathcal{J}_l \cdot C_l \cdot T_m \cdot \pi \cdot (r_o^2 - r_i^2)$$

$$T_m = \frac{2}{\mathcal{J} \cdot k_l} \left[\frac{1}{384\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 (r_i^6 - r_o^6) + \frac{A^2 \cdot \eta}{4} \left\{ (r_i \cdot \ln r_i)^2 \right. \right.$$

$$\left. - (r_o \cdot \ln r_o)^2 - (r_i^2 \cdot \ln r_i - \ln r_o \cdot r_o^2) + \frac{1}{2} (r_i^2 - r_o^2) \right\}$$

$$+ \frac{A}{16} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} (r_i^4 - r_o^4) + C \left\{ \frac{1}{2} (r_i^2 \cdot \ln r_i - r_o^2 \cdot \ln r_o) \right.$$

$$\left. - \frac{1}{4} (r_i^2 - r_o^2) \right\} + \frac{D}{2} (r_i^2 - r_o^2) \Big]$$

6.3.4-2. Bölgede plasto-hidrokinematik analiz.

Bu bölgedeki denge eşitliği şöyle yazılabilir,

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{4}{t_2} (\tau + \tan \beta \cdot \sigma_y).$$

$$\tau = \eta \cdot (U_2/h_2).$$

$$U_2 = (t_i/t_2)^2 \cdot U. \quad (\text{matris})$$

$$h_2 = (t_2/t_i) \cdot h_{m1}.$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{4}{t_2} \left[\eta \cdot \frac{U}{h_{m1}} \left(\frac{t_i}{t_2} \right)^3 + C_y \cdot \tan \beta. \right]$$

Pusey akımlarını ihmal ederek, ısı analizi uygulanırsa,

$$T_d = \left[\frac{1}{\gamma + \{1/[\ln(r_i/r_o)]\}} \right] \left[\gamma \cdot \theta_i - W \cdot r_o^2 + \left\{ \theta_s - \frac{W \cdot h_2}{2} \right. \right. \\ \left. \left. (2r_o - h_2) \right\} \frac{1}{\ln(r_i/r_o)} \right].$$

$$T_m = - \frac{W}{4} (r_o^2 + r_i^2) + A \left\{ \frac{r_o^2 \cdot \ln r_o - r_i^2 \cdot \ln r_i}{r_o^2 - r_i^2} \right\} - \frac{A}{2} + B.$$

Tel sıcaklığı θ_w , şöyle verilebilir.

$$\theta_w = \theta_i + \frac{C_y}{P_w \cdot C_w \cdot J} \cdot \ln \left(\frac{t_i}{t_2} \right)^2.$$

Analiz boyunca viskozite şöyle hesaplanabilir,

$$\ln \left(\frac{\eta}{\eta_0} \right) = \frac{A_1 + A_1 \bar{p} + A_2 \bar{\theta} + A_3 \cdot \bar{p} \bar{\theta}}{A_4 + A_5 \bar{p} + A_6 \bar{\theta} + A_7 \cdot \bar{p} \bar{\theta}}.$$

Von-Mises akma kriteri kullanılarak,

$$C_x + p = C_y.$$

Arka germe C_b , akma noktası C_x kullanılarak.

$$C_x = C_b \rightarrow p = C_y - C_b.$$

bağıntıları bulunur.

6.3.5. Kalıba ait bölüm. (matris)

Bu bölgeyi oluşturan 3 ve 4 nolu kısımlar kalıba ait kısımlardır. Kullanılan model, kısa ve paralel bir bölgeyi içerir. Bu bölgedeki zorlama türü çıkış bölgesini aşındıracak yöndedir. 3. bölge elastiklik özellikler elde edilmeden önceki bölgedir. Paralel bölümde bulunan bu bölge plastik bölgedir. Sürekli bir akım sağlamak için bu bölge dışarıya doğru genişletilebilir. Film kalınlığı ve tel ısı bu bölgede sabittir ve ikinci bölgedekine benzer bir analiz uygulanabilir. (β sıfır durumunu gösterir). 4. bölgedeki elastiklik özelliklerin eldesi, kalıbın dış bölgesine doğru genişliyebilir. Kavitasyon sınır şartları doyuruluncaya kadar yağ filmi yüzeye yapışık kalır.

$$p = \frac{\partial p}{\partial x} = 0.$$

Bu bölgeye kadar sadece elastik deformasyona maruz kalan malzeme burada plastik olarak şekillendirilir. 1. bölgedekine yakın bir analiz uygulanır.

Bilgisayar tekniğinden yararlanılarak yapılan analizde, programlama için 3. ve 4. bölgeler birlikte değerlendirilir. Buradaki problem 3. ve 4. bölgeler arasındaki sınırı tespit edebilmektir.

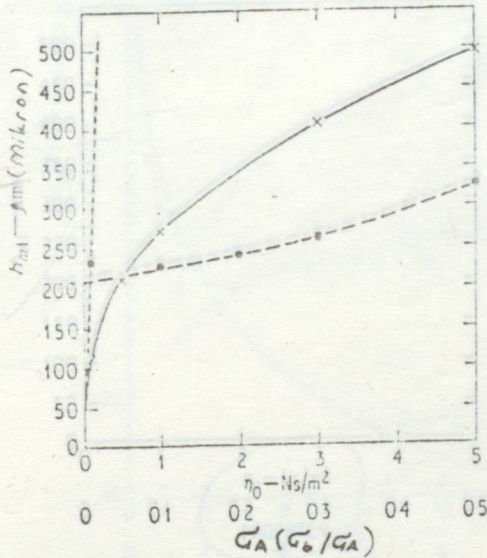
6.3.6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.

Tartışmanın asıl amacı, hidrodinamik yağlama olayı üzerindeki çeşitli işlem parametrelerinin etkilerini incelemektir. Basınç sıcaklık ve film kalınlığı değişkenleri, kalıp boyunca ihmal edilmiştir. Çünkü bu değerlerin incelenmesi bir karşılaştırma kriteri oluşturulmasını güçleştirir. Bu nedenle sadece işlemin en önemli noktası olan giriş bölgesi araştırılmıştır.

Basınç etkileri, giriş bölgesi ile plastik deformasyon bölgesinin sınırına doğru olan bölgede görülür. Toplam basınç artışının %87 si, giriş uzunluğunun son 90,25 lik kısmında görülür. Basınç gradyanının bu bölgedeki değeri 10^{14} N/m² ye ulaşır.

2. ve 3.bölgeler boyunca basınç gradyanı 10^{11} N/m^2 değerine düşer. Son olarak 4.bölgede tekrar 10^{13} N/m^2 lik yüksek bir basınca ulaşılır. Yağlayıcı viskozitesi 2. ve 3.bölgeler boyunca giriş bölgesindeki yakını bir değişim gösterir. Basınç gradyanları dağılımındaki farklılıklar, plastik şekillendirme bölgesindeki Pusey akımlarının ihmal edilebileceğini kanıtlamıştır.⁵⁰

Sıvı yağ filmi kalınlığı, plastik deformasyon bölgesi ve 3.bölge boyunca sabit kalır. Daha sonra, kalıbın esas bölgesine paralel olan, minimum değerlerin görüldüğü bir noktaya düşer. Bu noktanın ötesinde film kalınlığı 3.bölgedeki değere eşit olacak şekilde artar, bu bölgede kavitasyon sınır şartları doyurulmuştur. Minimum film kalınlığı, giriş ve deformasyon bölgesi arasındaki film kalınlığı h_{ml} in %70 i kadardır. Şekil(99) da Θ_{mm} değerlerinin, maksimum yağlayıcı ısısı için değişik durumları incelenmektedir.⁵⁰



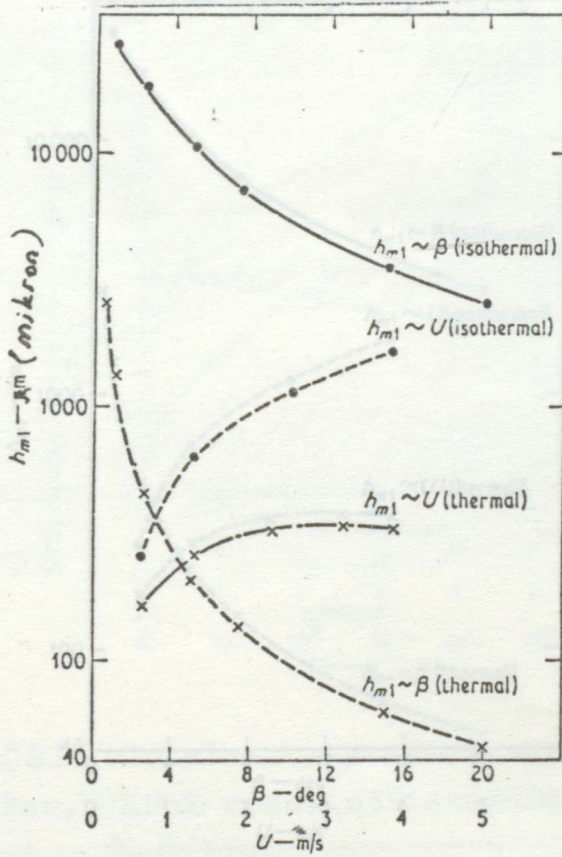
Şekil(99). h_{ml} değerinin değişik viskozite değerleri için değişimi.⁵⁰ Ref(50)

— Termal çözüm. (Koni açısı 5, hız: 25,4 m/s.)

--- Termal çözüm. (Viskozite 0,5 N.s/s², hız: 25,4 m/s)

--- İzotermal çözüm. Ref(50)

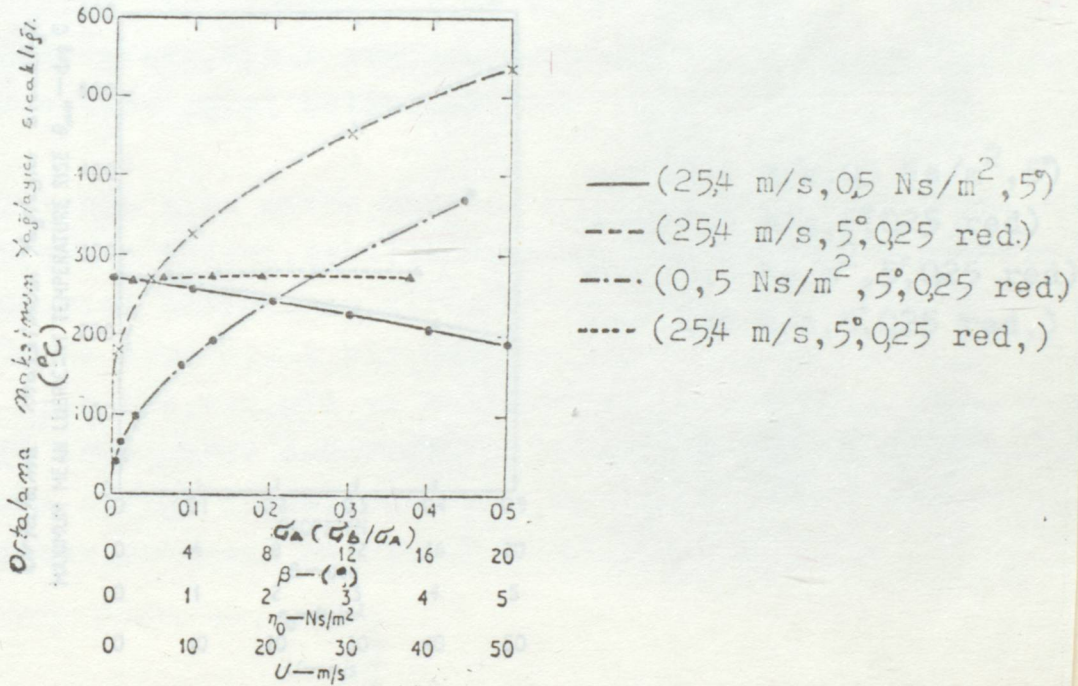
Şekil(88) de, değişik β açıları ve değişik viskozite değerleri için, yağ filmi kalınlığının hız ile olan değişimi incelenmiştir. Bu konuyla ilgili olarak daha sonra bir bilgisayar çalışması da yapılmıştır. Eğrilerin incelenmesinden görüleceği gibi, her durumda h_{m1} in maksimum değeri 25-76 m/s hız değerleri arasında görülür. Birçok durumlarda ise, 25-37,5 m/s genişliğindeki hız sınır şeritleri üzerinde işlem yapılır. Eğrilerde giriş hızının artması sonucu, basınç gradyanlarının dağılımında maksimum noktalar görülür. Bu maksimum nokta, artan ısı nedeniyle, viskozitenin düşmesi sonucu daha da belirginleşir. Şekil(90) da, giriş hızı ve ısı özelliklerinin h_{m1} değeri üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil(90). h_{m1} değerinin hıza bağlı değişimi.

- Termal çözüm. (Koni açısı 5, hız: 25,4 m/s.)
- Termal çözüm. (Viskozite 0,5 N.s/m², hız: 25,4 m/s)
- .-.- İzotermal çözüm. Ref(50)

Termal ve izotermal sonuçlar arasındaki hata, ısı basınç ilişkisindeki yükselme sonucu meydana gelen yüksek hız durumlarında daha büyüktür. 37,5 m/s hız değerinde, izotermal analizle elde edilen h_{ml} değeri, termal analizle elde edilenden beş kez daha fazladır. Giriş hızının arttırılması etkisi, kalıp boyunca olan ortalama yağlayıcı ısısını ve kalıp yüzeyini arttırır. Yani 3. ve 4. bölgelerin sınırlarını genişletir. θ_{nm} (maksimum ortalama yağ sıcaklığı) ve giriş hızı arasındaki ilişki şekil (91) de gösterilmiştir.



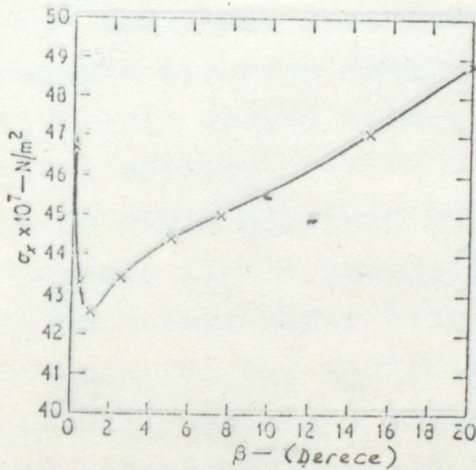
Şekil(91).Ortalama yağlayıcı sıcaklığının
 a)Probtan. b)Koni açısı. c)Viskozite, d)Hız ile
 değişimi. Ref. (50)

Yağlayıcı viskozitesinde görülen düzenli artışı avantajı h_{ml} değerinin artmasında görülür. Bu artış viskoz ısı genellemesindeki derece ile karşılıklıdır. Yağlayıcı viskozitesinin düşük değerlerinde (0,05 Ns/m²) termal ve izotermal sonuçlar arasında

da bir uygunluk vardır. Bloor tarafından geliştirilen rijit-plastik yaklaşık sonuç burada kullanılabilir. Yüksek viskozite-lerde ise, izotermal ve termal sonuçlar arasındaki fark artar.

Düşük kalıp açıları, 2. bölge boyunca istenmeyen düzensiz bir temas uzunluğu oluşmasına neden olur. Film kalınlığının yüksek olması bir avantaj gibi görülmekle beraber, film kalınlığının artması, yüzeyin kayma gerilmesini indirir. Fakat bu azalma etkileri, yükselen uzunluk sonucu ile yok edilir. Şekil (92) den görüldüğü gibi, telin çekilmesi için gerekli minimum gücün 1° lik yarı kalıp açısına karşılık geldiği izlenebilir. Bu durumu analiz edebilmek için Wisterich in deneysel eğrilerinden yararlanmak ilginç bir uygulamadır. Bu araştırmacının deneysel eğrilerini çıkarırken, sınır yağlama durumunu ve pekleşme etkilerini dikkate almadığını belirtmek gereklidir.

Tele uygulanan arka germe kuvveti h_{m1} değerinin artmasına neden olur, bunun nedeni, şekillendirilen malzemenin meydana getirdiği yağlayıcı basıncının, giriş bölgesinde uygun arka germe uygulandığında daha düşük bir değerin elde edilmesidir. ($P = \sigma_y - \sigma_b$) Bununla birlikte, verimli ve kullanılabilir sonuçlar verebilecek, limit arka germe değerinin bilinmesi gerekir. Arka germenin daha fazla olduğu durumlarda, tele etkiyen direkt kuvvet azalır. Sonuç olarak, yaklaşık en yüksek limit ($0,25 \times \sigma_y$) dir.



Şekil (92). Çekme gücü
koni açısı arasındaki
ilişki. Ref. (53)

η ; 0.05 N s/m², Çelik, 25.4 m/s,

Arka germenin artması ile, ortalama yağlayıcı ve kalıp yüzey ısıları azalır. Bunun nedeni olarak, artan arka germe kuvvetinin yağ tabakası kalınlığını arttırması gösterilebilir. Şekil(111).

Film kalınlığı için beklenen değerler 10^{-8} - 10^{-7} ~~m~~ mertebesinde⁵⁰dir. Bu değer, yağlama olayı için en etkili parametre olan yağ filmi kalınlığının, sınır yağlama olayını da meydana getirebileceğini gösterir. Fakat olayın sonucunu ve mamul kalitesini, hidrodinamik yağlamayı oluşturma eğilimi ve işlem parametreleri etkileyebilir. Yapılan analizde, kullanılan parametrelerin sisteme uygun olduğu görülmüştür. Sunulan sonuçlar, çelik tel ve mineral yağlayıcılar içindir. Bununla birlikte, kompitür programlamasında uygulanan işlem parametreleri değiştirilerek, farklı proses şartlarına uygulanabilir. Konu ile ilgili, yapılan deneysel çalışma ve programlama çalışmasından daha sonra bahsedilecektir.

6.4.SONUÇLAR.

- 1-Tel hızının artmasıyla, giriş bölgesi ile plastik şekillendirme bölgesi arasındaki yağ filmi kalınlığı h_{m1} maksimum değere yükselir. Tele uygulanacak daha yüksek bir hız, bu değer düşmesine neden olur.
- 2-Yağlayıcı viskozitesindeki artış h_{m1} değerini yükseltir.
- 3-Tele uygulanan arka germe kuvveti h_{m1} değerini yükseltir, bununla birlikte arka germenin endüstride uygulanabilecek bir limit değeri vardır ki bu değer operasyon şartları ile tayin edilir.
- 4-Kalıp giriş açısının yükselmesi, h_{m1} değerini yükseltir.
- 5-Sistemle ilgili parametreler, yağlama olayının seyrini etkileyen önemli birer etkidir. Uygun koşullar altında, sistem boyunca tam bir yağlayıcı filmi elde edilebilir.
- 6-Tel hızındaki veya yağlayıcı viskozitesindeki bir artış, kalıp yüzeyindeki ortalama yağlayıcı ısısının yükselmesine sebep olur. Bununla birlikte kalıp giriş açısının da etkisi var-

dır. Ayrıca arka germe kuvvetinin artması bu ısıların azalmasına sebep olur.

7-Düşük hız ve düşük yağlayıcı viskozitesi durumları hariç, tel çekme prosesleri için elde edilen izotermal sonuçlar, tahmin edilen h_{m1} değerinden daha yüksektir. 1. ve 2. bölge-

8-Minimum film kalınlığı, gerekli durumlar için h_{m1} değerinin % 70 i dir. Başlangıçta 4. bölgenin kalıbın tüm yüzeyini kap-

6.5.Konu ile ilgili bilgisayar uygulaması.

Burada öncelikle, Dowson, Parsons, Lidditt isimli araştırmacıların geliştirmiş olduğu yöntemden bahsedeceğiz. Teorik analizde 4 bölge olmasına rağmen, programlama çalışmaları için, 3. ve 4. bölgeler birbirine bağlı olarak düşünülür ve genel bir program kullanılır. 1. ve 2. bölgeler ayrı ayrı analiz edilir.

1.bölge:

Şekil(93) deki bu tablo, bu bölüm için özel hazırlanmıştır. Karşılaşılan temel sorun elasto-plastik sınırdaki film kalınlığını belirlemektir. Daha büyük hız gradyanları bu bölgenin sonuna doğru yer aldığından, hesaplamalarda giriş uzunluğunun değeri değiştirilemez. Bu bölgenin uzunluğu için, 5×10^{-4} m. değeri kullanılabilir. Ayrıca hesaplamanın doğruluğunu yükseltmek için giriş uzunluğu da kendi içinde parçalara bölünür. R mesafesi için 0,0127 m. değeri kullanılabilir. Şekil(93)deki programlama kartını incelersek, iterasyon bir noktadan diğerine sürdürülür. Yağlayıcı ısısının yeniden tahmin edilmesinde, aşağıdaki bağıntıdan yararlanılır.

$$0,75 \theta_{m0} + 0,25 \theta_{mH}$$

son noktada elde edilen basınç, amaçlanan basınçla karşılaştırılır ve h_{m1} değeri doğrulanır, işlem daha sonra tekrarlanır.

2.bölge:

Buradaki analiz Bloor'un teorisine uygundur. Çünkü bu analizde

kullanılan teknik ile elde edilen sonuçlar, diğer verilerden etkilenmez.

3. ve 4. bölge:

Bu bölge için yapılan bilgisayar çalışması da 1. ve 2. bölge-
dekilere benzer. Temel sorun, 3. ve 4. bölgeler arasındaki sınırı
tespit etmektir. Başlangıçta 4. bölgenin kalıbın tüm yüzeyini kap-
ladığı kabul edilir. Basınç kavitasyon sınırına varmadan önce, bir
negatif değer elde ederse, sınır düzenli olarak çıkış bölgesine
doğru kayar. Kavitasyon sınırında elde edilen bir artı basınç ve
diğer basınç değerleri tespit edilerek, sınır basıncı doğrusal
enterpolasyonla bulunur.

Programda yararlanılan temel terimleri şöyle açıklayabiliriz.

dp: Basınç gradyanı.

p: Basınç değeri.

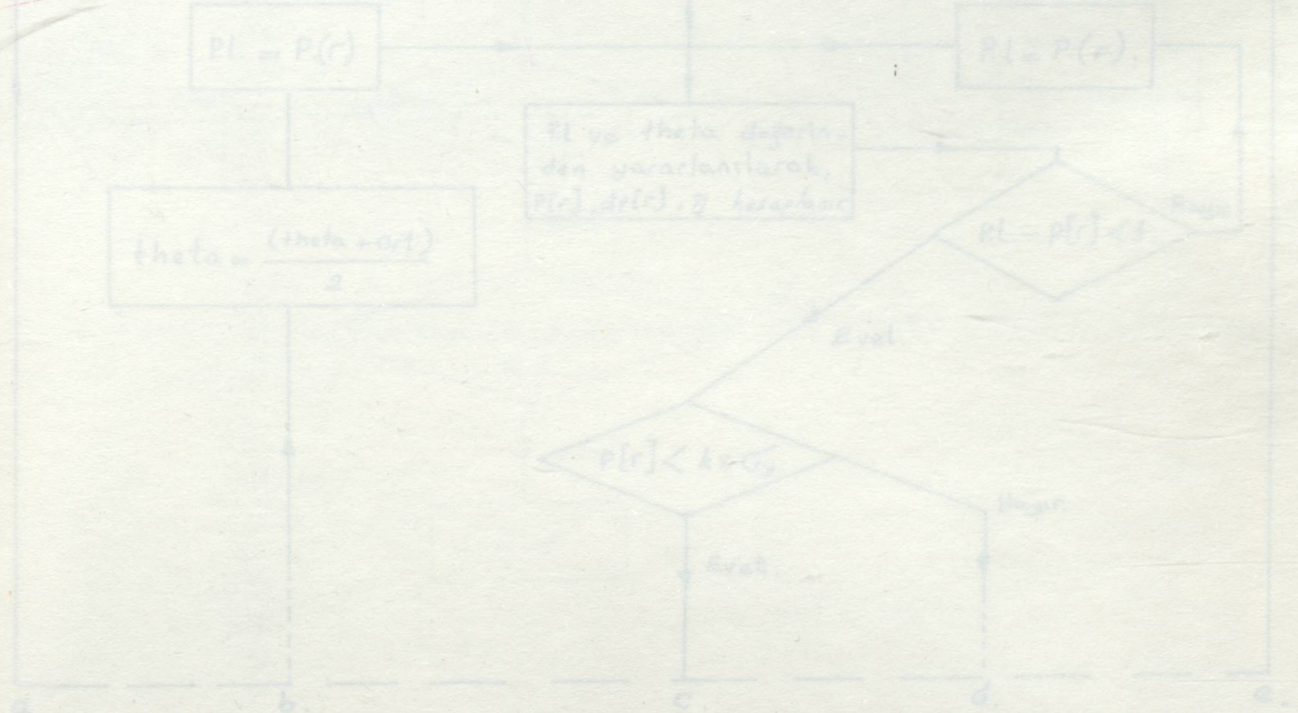
thetam: Her bölgedeki ortalama yağ sıcaklığı.

theta: Basınç hesaplamasının dayandığı thetam değeri.

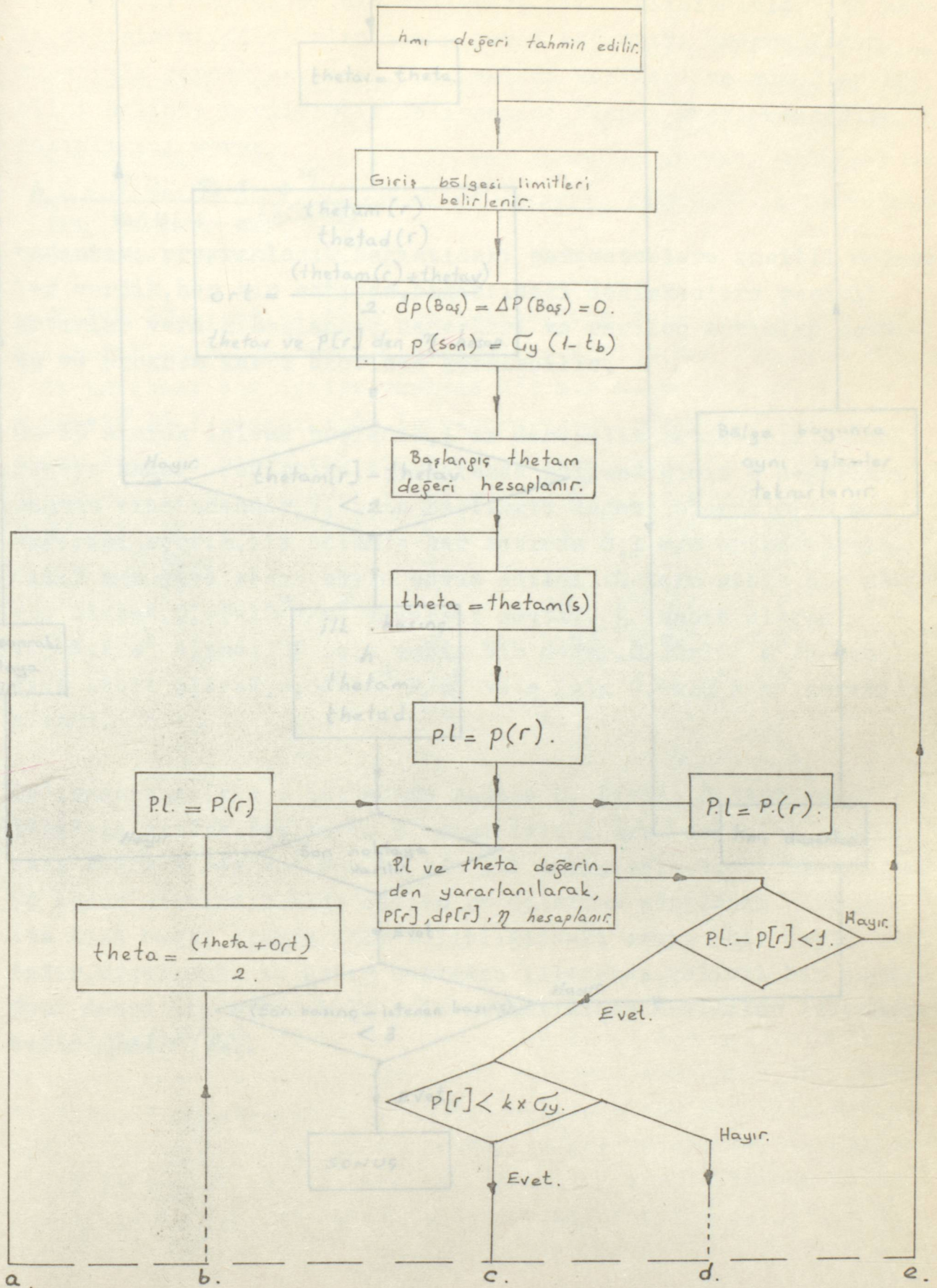
r: Ele alınan çevresel bölge.

s: r den önceki bir nokta.

thetay: Sıcaklık hesaplarının dayandığı thetam değeri.



Şekil(83).1.bölge için programlama kartı ve işlem akışı.



Sekil(93).1.bölge için programlama kartı ve işlemin akışı.

Ref(46)

Konu ile ilgili diğer bir çalışmayı, film kalınlığının hızla bağıntısını, film kalınlığını veren bağıntıyı programlamak suretiyle gerçekleştirdik. Programlama verileri ve sonuçlar EK bilgi halinde verilmiştir. Çalışmamızı kısaca özetlersek: Film kalınlığını veren,

$$h_m = \frac{3 \cdot U_1 \cdot \eta_0 \cdot \delta \cdot e^{\delta q}}{\tan \theta [1 - e^{-\delta(\zeta_A + s)}]}$$

bağıntıyı programladık. Bağıntıdaki parametrelere çeşitli değerler verdik, her bir satırda, bağıntıdaki değişkenlere çeşitli artımlar verdik. Başlangıç değerleri ve verilen artımlar aşağıda ve program kartı üzerinde görülebilir.

$\theta = 15^\circ$ olarak işleme başladık, 1° er derecelik artışlarla 45° dereceye kadar değiştirdik, programda kullandığımız θ değerleri radyan cinsindendir. U_1 için başlangıç değeri olarak $0,10$ m/s değerini seçtik, ilk bölümde her satırda $0,1$ m/s artma uyguladık. 5 m/s yeye kadar böyle devam edildi. ζ_A için sabit bir değer olarak, $0,69 \times 10^9$ N/m² değerini seçtik. η_0 sabit olarak, $2,5$ N.s/m² alındı. δ için sabit bir değer, $0,20 \times 10^{-7}$ m²/N seçildi. q sabit olarak, $0,86 \times 10^8$ N/m² ve s için $0,4 \times 10^8$ N/m² değeri alındı.

Çalışmamızın ikinci bölümünde sadece U_1 hızını değiştirerek inceleme yaptık. Başlangıç U_1 hızı için 1 m/s değerini seçtik, daha sonraki her satırda, 10 m/s lik artışlarla, hızı 751 m/s yeye kadar arttırdık. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi, artan hızla bağlı olarak film kalınlığındaki artış bir hayli fazladır. Uygulamada bu artış her zaman izlenemez, belirli bir değerden sonra hız artsa bile film kalınlığında azalmalar izlenmektedir. **Şekil (88).**

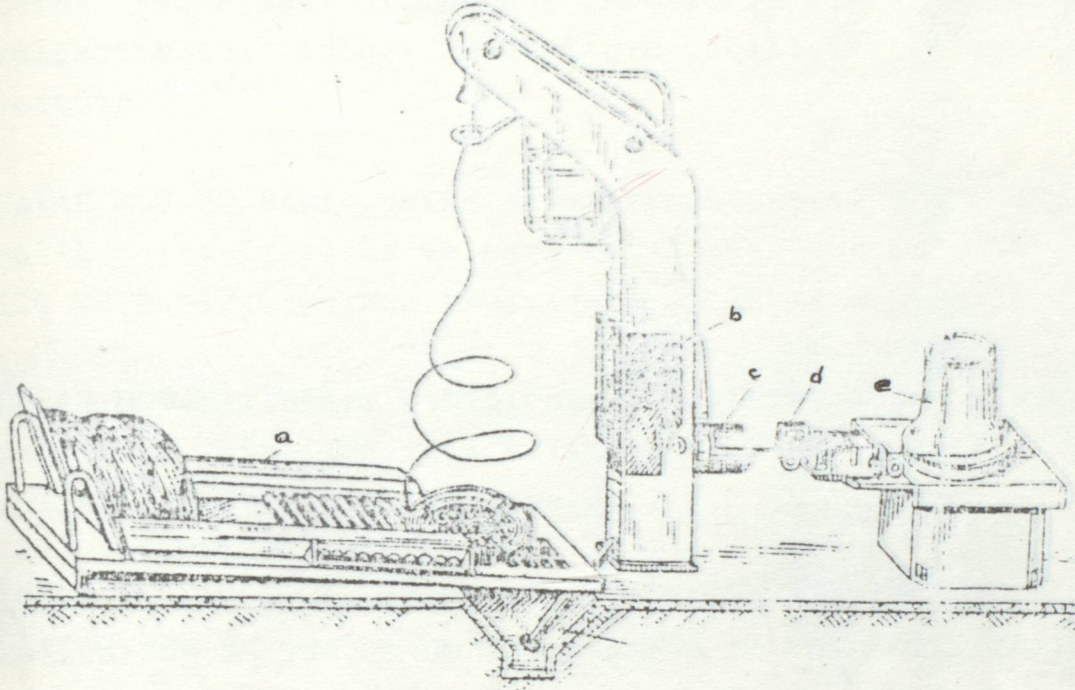
6.6.Konu ile ilgili deneysel çalışma.

Deneysel çalışmamızı şekil(94) de gördüğümüz tel çekme tezgahında yaptık.Çalışmamızın amacı Multan tipi bir yağın belirli emülsiyonlarının denenmesi,çeşitli hadde malzemelerinin denenmesidir.Elde edilen sonuçlar ve deneyden alınan numuneler ekte belirtilmiştir. Deneysel çalışmamızı METALSAN ın Kartaldaki fabrikasında yaptık.⁴¹
Deney neticeleri.

- 1-MULTAN 20-1 yağını,%100 konsantrasyonda kullandık,elmas hadde kullandık,giriş tel çapı 2,72mm,çıkış çapı 1,8mm dir.Elde edilen ürün kalitesi çok iyidir,yüzeyde hiç bir çapak yoktur.
- 2-MULTAN 20-1 yağını,%100 konsantrasyonda kullandık,kullanılan hadde kompaks hadde,tel giriş ve çıkış çapları,2,43-1,8mm dir.Mamul kalitesi iyi fakat yüzey kalitesi biraz düşüktür.
- 3-MULTAN 20-1 yağını,%100 konsantrasyonda,karbür hadde ile denedik.Yüzey kalitesinin biraz daha düşük olduğunu gördük.
- 4MULTAN TR4 yağını %20 konsantrasyonda karbür hadde kullanarak denedik,çekme başlangıcında malzeme hemen kopuyor.
- 5-MULTAN TR4 yağını,%20 konsantrasyonda kompaks hadde ile denedik,giriş ve çıkış çapları:2,70-1,8mm dir.Mamul kalitesi oldukça iyi,yüzeyde pürüz yok.
- 6-MULTAN TR4 yağını %20 konsantrasyonda elmas hadde ile denedik,mamul kalitesi çok iyi.
- 7-MULTAN TR4 yağına bir miktar (%20) MoS_2 kattık ve karbür hadde kullandık,malzemede kopma olmadı fakat yüzeyde küçük çizgiler var.

Denememizin sonucu:Karbür hadde kullanılırsa muhakkak saf yağ ile çalışılmalıdır.Kompaks veya elmas hadde ile çalışılması esnasında düşük konsantrasyonlarda çalışmak mümkündür.İnceleme yaptığımız malzeme gibi saf(%99,5) Al.için yağ cinsinin önemi pek fazla yoktur.Yağ kullanılmadan sadece ısınma sorunu halledilerek de çalışılabilir.Deneyin en ilginç sonucu,karbür hadde kullanılarak yapılan çekme işleminde,saf yağ ile çalışılırken

yağa katılacak çok az bir suyun bile hemen malzemenin kopmasına sebep olmasıdır. Bu nedenle karbür hadde ile çalışma esnasında su kullanmaktan kaçınılmalıdır.



Şekil (94). Deneyde kullanılan aparatın şematik resmi.

a) Malzemeyi yönlendiren kısım. b) Düzeltme merdanesi ile neleri. c) Telin matrise girişi. d) Yağ haznesi ve matris. e) Telin sarıldığı tambur. Ref(41)

6.7.Uygulamada tel çekme proseslerinde yağlayıcı olarak kullanılan yağlar.

Bu konu ile ilgili araştırmalarımızı çeşitli fabrikalarda yaptık.Bu fabrikaların başında Rabak,Türk Kablo,Metalsan gibi firmalar yer almaktadır.Burada firmaların operasyon esnasında kullandıkları yağları,bu yağların özelliklerini kısaca inceleyeceğiz. 40,41,42.

RATAK MCU-20:Bakır,prinç,alüminyum,bronz ve prinç kaplanmış çelik tellerin,elmas ve sert metal haddeden tel çekiminde su ile %3,5-%12 arasında emülsiyon yapılarak kullanılır.

RATAK MCU-31:İhtiva ettiğiönemli katıklar nedeniyle,devamlı emülsiyon yapabilen,ince tellerin (1,5-0,2 mm) çekilmesinde kullanılan özel bir sinai yağdır.

LMS 302 Yarı sentetik konsantre yağ:Su ile emülsiyon halinde kullanılan bu yağ,üstün bir yağlama ve kayganlık özelliklerinin yanında soğutuculuk vasfının arandığı yerlerde kullanılır, En büyük özelliği,yarı sentetik bir yağ olması nedeniyle tortu ve bakiye bırakmamasıdır.Hadde ömrünün uzun olması,aşınma nedeni ile haddelenen telde çap değişikliğinin olmaması için LM 23 veya LM 209 kullanılması önerilir.LM 23,sürekli bir yağlama olayını ortadan kaldırmak amacı ile kullanılan kalıcı bir kuru-film tabakalı yağdır.Ayrıca bu yağ sertlik derecesi yüksek olan,çelik levhaların derin çekme işlemlerinde de kullanılır.

LM 209: MoS_2 li kuru yağlayıcı film tabakası oluşturan bir yağdır,yüzeye tutunma ve yapışma niteliği fazladır,aşırı yük taşıma kapasitesine sahiptir,yağa ve suya dayanıklıdır.Bağlayıcı olarak suni reçine,çözücü olarak toluen kullanılır.

PROSOL 44:Sıcak veya soğuk suda emülsiyon yapılarak kullanılan, özel bir hadde yağıdır.Belirli oranda su ile yapılan bu yağ, alüminyum ve bakır çekme işlemlerinde oldukça fazla kullanılır. Bu yağ bakiye bırakmaması yanında,yarar filmini kuvvetlendirici,

yük taşıma gücünü arttırıcı özel katıklar içerir. Viskozitesi 40 C de 28,8-35,2 cSt dir.

LMR 300: Değiştirilme zamanı gelmiş olan veya değiştirilmesi gereken emülsiyon sistemlerine yaklaşık %1-2 nispetinde ilave edilerek kullanıma devam edilmesini sağlayan özel bir yağdır.

ODİN EE 10: Kaygan, ince ve uzun müddet tesirli olduğundan bakır tel çekmeğe uygun olduğu gibi, 12,7 mm çapındaki filmaşinden, kademeli çekmeler ile 0,315 mm ye kadar düşük çaplı tellerin çekilmesinde kullanılan bir yağdır. İyi netice elde edebilmek için suya %9-10 nispetinde katılarak emülsiyon teşkil edilir.

WIROL 3805: Basit bir yağ-su safhası ile kolaylıkla emülziyone olabilen sentetik bir yağdır. Azami 1,6 mm lik giriş çapı ile 0,03 mm lik çıkış çapındaki ince ve ekstra ince tellerin çekilmesi için uygundur. Aynı zamanda zayıf konstrüksiyonlu emaye tel çekimine de uygundur.

Orta incelikte tel: Azami giriş çapı: 1,6 mm. } % 5-6,5.
Asgari çıkış çapı: 1,4 mm.

Çok ince tellerde: Azami giriş çapı: 0,4 mm. } % 2,5-4.
Asgari çıkış çapı: 0,03 mm.

Stockhausen firmasının imalatı olan UNOPOL cinsi yağlar, endüstride en çok kullanılan tel çekme yağlarıdır. Bu yağların başlıca kullanım yerlerini kısaca inceliyelim. ⁴¹

UNOPOL.	Kullanım %.	MSK	MG	MV	C	CS	CB	NIN	FST
Genis profillerin çekilmesi.	Saf halde.	0	0	0	0	0	0	-	-
Orta veya ince profil çekilmesi.	Saf veya %20-30 kons.	0	+	+	+	+	+	-	-
Disli Kutuları.	Saf veya %12-20 emüls.	+	+	+	+	+	+	+	-
Profil haddeleme.	Saf veya %12-20 emüls.	+	+	+	+	+	+	+	-
Büyük çaplı tel çekme.	%10-16 emüls.	-	+	+	+	+	+	+	-
Orta çapta tel çekme.	%2-5 emüls.	-	+	+	+	+	+	+	0
Çok ince tel çekme.	%1-3 emüls.	-	-	-	-	-	-	-	+

+ = Kullanılabilir.

0 = Belirli şartlar altında kullanılabilir.

- = Kullanılamaz.

7. HİDROSTATİK EKSTRÜZYONDA HİDRODİNAMİK YAĞLAMA ANALİZLERİ.

7.1. Hidrostatik Ekstrüzyon.

Hidrostatik ekstrüzyondaki şekillendirme kuvveti, bir basınç ortamı ile sağlanır. Bu basınç ortamı işletme şartlarına göre değişik şekillerde düzenlenebilir. Hidrostatik ekstrüzyonun araştırılmasındaki temel amaç, kırılğan ve zor şekillendirilen malzemelerin, hidrostatik basınçlar altında şekillendirilebilme özelliği kazanmaları ve kolaylıkla şekillendirilebilmeleridir. Uygulamada hidrostatik ekstrüzyon sadece kırılğan malzemelerin biçimlendirilmesinde kullanılmayıp, alüminyum ve bakır gibi sünek malzemelerin işlenmesinde de avantajlar sağlamaktadır.⁵⁵

Bu yöntemde hem sıcak hem de soğuk blokla çalışmak mümkündür. Hidrostatik ekstrüzyonda radyal basınç aksel basınca esittir. Sistemin şematik görünüşü, şekil(95) de görülmektedir. Prosesin temel sorunu sızdırmazlıktır. Basıncı sağlayan, sıvı ile dolu olan alıcının, matris ve piston kısımlarında takviyeler yapılmış, yüksek basınçlara dayanımları arttırılmıştır. Basınç odasındaki sıvının basıncı, malzemenin akma gerilmesi ve basma oranı ile şekillendirme şartlarına bağlı olarak belirli bir değere ulaştığı anda, malzeme matristen akar. Matris kısmı, şekillendirme esnasında uygun bir yağ filminin oluşabilmesi için konik olarak düzenlenmiştir. Hidrostatik ekstrüzyonun klasik ekstrüzyona nazaran üstünlükleri şunlardır.⁵⁵

1-Blok ile alıcı cidarı arasında sürtünme olmaz, bu nedenle işlem başlangıcındaki ıstampa kuvveti oldukça küçüktür ve teorik olarak istenen uzunluktaki bloklar kullanılabilir.

2-Şekillendirme esnasında meydana gelen yağ filmi, metal-metal temasını engellediğinden, sürtünme azalır ve bunun neticesi olarak sürtünmenin sebep olduğu hatalar giderilir.

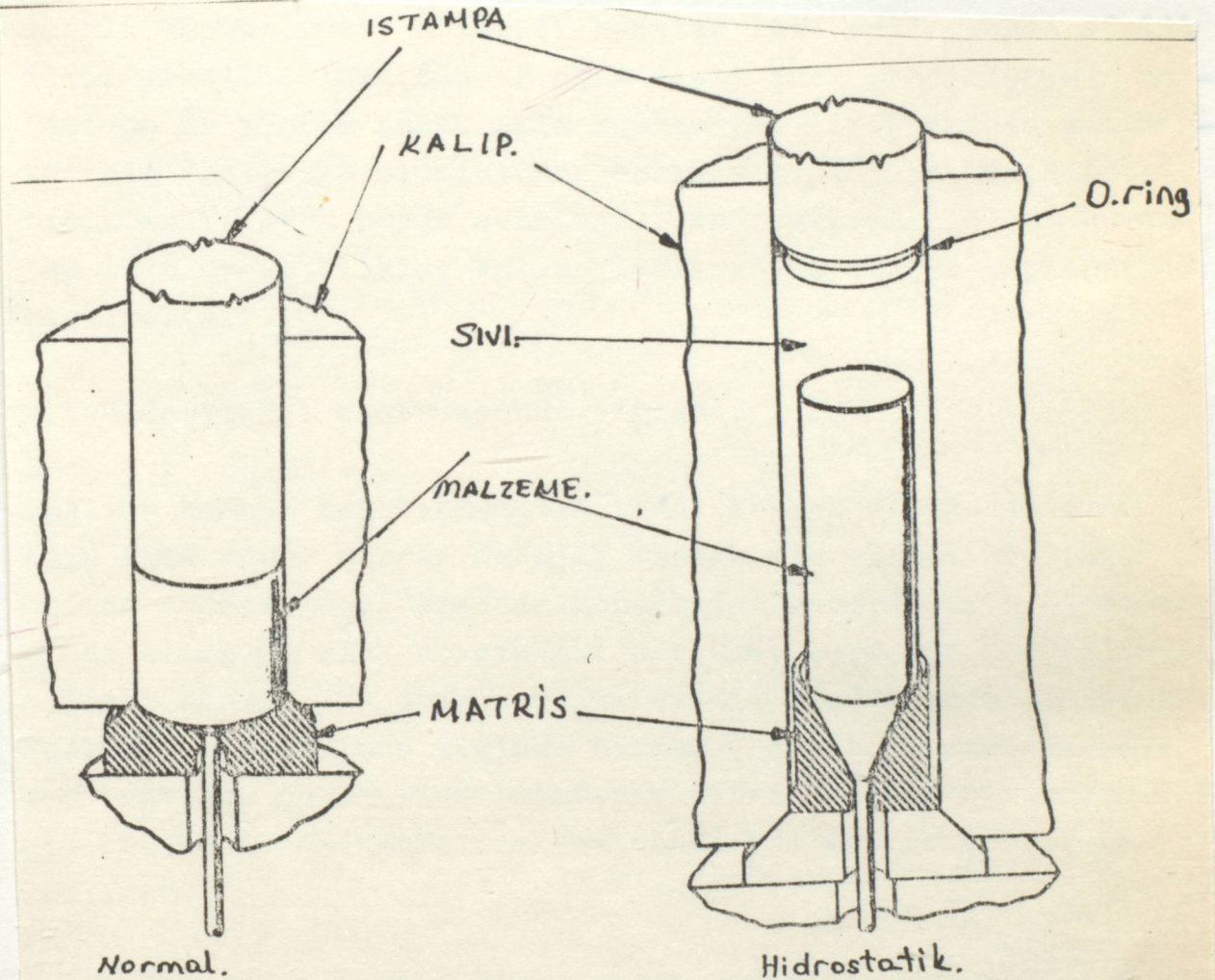
3-Azalan pres kuvveti ve matris sürtünmesi nedeniyle yüksek ekstrüzyon oranlarına ulaşılabilir.

4-Şekillendirme esnasında meydana gelen ısı önemli değilse, elde edilen malzeme sertleşmiş durumdadır. Sıcak hidrostatik ekstrüzyon uygulamaları da vardır.

7.2. Hidrostatik ekstrüzyonun uygulama alanları.

Hidrostatik ekstrüzyonun en önemli dezavantajı, şekillendirme işlemine başlanılmadan evvel, bloğun uygun bir koniklikte işlenmesi gerekliliğidir. Alıcıda hidrostatik basınç her yönden etki ettiğinden bloğun şekli önemli değildir, hatta sarılmış teller dahi basılabilir.⁵⁵

Al teller, bakırdan ince cidarlı bora ve profiller, dar toler-



Şekil(95). Hidrostatik ekstrüzyon. Ref (56)

7.2.Hidrostatik ekstrüzyonun uygulama alanları.

Hidrostatik ekstrüzyon özellikle iyi veya normal süneklilik gösteren metallerin yüksek basma oranlarındaki ekstrüzyonunda ara şekil değiştirme kademeleri ortadan kalktığı için özellikle uygun olmaktadır.Örnek olarak çok küçük çaplı tellerin ekstrüzyonu gösterilebilir.Diğer ekstrüzyon mamulleri Al teller,bakırdan ince cidarlı boru ve profiller,dar töleranslı ve iyi yüzey kaliteli borular imal edilmektedir.Çelik dişli profillerinin,düz ve eğik dişli çark profillerinin imalatında bu yöntem rahatlıkla kullanılabilir.Elektrik iletkenlerinin özellikle alüminyumun bakırla kaplanmasında,hidrostatik ekstrüzyon büyük avantajlar sağlamaktadır,ancak bu işlem için uygun bloklar kullanılmalı ya da teller kaplanarak basılmalıdır.⁵⁵

7.3.Hidrostatik ekstrüzyonda yağlama.

Yağlama konusu araştırmamızın temel konusu olduğu için bu konu daha sonra tekrar detaylı olarak ele alınacaktır.Biz burada sadece genel yağlama konusundan bahsedeceğiz.Ekstrüzyonda alıcı ve blok arasındaki sürtünme şartları,gerekli ekstrüzyon basıncı ve akış tarzını önemli ölçüde etkilemektedir.Ekstrüzyon işleminde yağlama her zaman basit olmamasına rağmen pratikte çok kullanılmaktadır.Ayrıca düzgün bir yüzey elde etmek ve aşınmayı azaltmak amacıyla matris girişi de yağlanır.

Yağlamanın en önemli görevi sadece ekstrüzyon kuvvetini azaltmak olmayıp,bir dizi fonksiyonu da yerine getirerek ekonomikliği ve en iyi kaliteyi sağlamaktır.Yağlayıcıdan aşağıdaki özellikler beklenir.

1-Kapalı bir yağ filmi şeklinde meydana gelen yağ tabakası matristen geçerken bile yırtılmamalı,sürtünmeyi ve takım aşınmasını da önleyerek,kuvvet ihtiyacını düşürücü kayma özelliğine sahip olmalıdır.⁵⁵

- 2-Yağlayıcı malzeme 1000-1300 °C da, sıcak blok ile takımlar arasında bir ısı izolatörü görevi yapmalı ve bu sayede efektif takım mukavemeti arttırılmalıdır.
- 3-Isı izolasyonunu sağlamak,bu değeri devam ettirmek ve takımların aşırı ısınmasını engellemek açısından yağlayıcının ısı iletme kabiliyeti düşük olmalıdır.
- 4-Isıtmadan hemen sonra blok yüzeyine etki ettirilen yağlayıcı,bloğu ve çıkan çubuğu kılıf gibi sararak oksitlenmeyi engellemelidir.
- 5-Oluşmuş ince oksit tabakaları,yağlayıcı tarafından çözülmesi veya koparılmalıdır.
- 6-Cam yağlayıcılarda hacim değişmesi,yağlayıcının soğuyan çubuktan kendiliğinden ayrılması için,soğuma veya katılaşma esnasında,çeliğinkinden çok daha büyük olmalıdır.
- 7-Yağlayıcı,ekstrüzyon malzemesi ve takımlarla reaksiyona girmemelidir.

Alüminyum ekstrüzyon malzemelerinin sıcak ekstrüzyonunda düz matrisler kullanıldığında,yüksek sıcaklıklarda alüminyum,çelik ile kaynama özelliği göstermekte ve bu durum yağlama ile dahi ortadan kaldırılamamaktadır.Bunun sonucu olarak uygun olmayan bir akma olmaktadır.Alicının ve blok dış yüzeyinin yağlanması ile akma davranışı önemli ölçüde değiştirilemediğinden ve ayrıca yağlayıcının kayma bölgesi boyunca hareket ederek çubuğa geçmesi,burada gözenekler ve kabarcıklar oluşturmaları tehlikesi bulunduğundan,alıcıda yağlama yoluna gidilmemektedir.

Bir çok durumda,yağlayıcı malzemesinin matrise yapışması yüzey kalitesi bakımından önemli problemler oluşturmaktadır.Çünkü yapışan partiküller,derin izler oluşturmaktadır.Bu durumlarda düzgün yüzey kalitesi ve öncelikle düşük matris temizleme zamanı,matrisin veya blok alın yüzeyinin az miktarda yağlanması ile elde edilebilmektedir.Kullanılan yağlayıcılar:matris yağı,aşırı doymuş silindir yağı ile grafit,su-

da veya alkolde kolloit grafit(blok alın yüzeylerinin yağlanması için sıvı veya sprey) ve molibded di sülfid.Özel hal-lerde,örneğin boru ekstrüzyonunda malafa yağlanması için ala-sıma göre arap sabunu ve balmumu da kullanılabilir.

Blokların birçok durumlarda sadece alın yüzeyleri değil ar-ka yüzeyleri de yağlanmaktadır.Bu tedbirin amacı,blok malze-mesinin ön levhaya yapışmasını önlemek,yani ekstrüzyon kalın-tısından kolay ayrılmasını sağlamaktır.

Çeliklerin ekstrüzyonunda yağlayıcı olarak cam kullanılmak-tadır.Bu yöntemle cam katı durumda yada toz biçiminde veya lifli durumda yerleştirilir,sıcak blokla temasından sonra ağır sıvı haline gelir,kısmen eriyerek çeliği ince viskoz bir film ile sarar.Bu ince cam filmi,termik koruyucu ve izo-le tabakası olarak,takımları aşırı ısınmadan,bloğu ise aşırı soğumadan korur.Ayrıca cam,toz halinde blok üzerine ser-pildiğinde,blok malzemesinin oksitlenmesini de engeller.

Blok dış yüzeyinin yağlanması ya cam tozunun serpilmesi ile yada sıcak bloğun cam tozu havuzunda yuvarlandırılması ile olur.İçi boş bloklarda,iç yüzeyin yağlanması için,cam tozu küçük bir kürekle iç yüzeye doğru fırlatılır.Çelik blokun alın yüzeyinin yağlanmasında kullanılan elyaflı cam yünü ve-ya preslenmiş cam tozu plakası,soğuk matris ile sıcak blok arasına yerleştirilir.Isınan bloka komşu tabaka metale yapışır ve çıkan mamul yüzeyi düzgün,homojen bir yağ tabakası ile kaplanır.Uygun cam çeşidinin seçilmesi,işlenen malzeme-nin ekstrüzyon sıcaklığına bağlıdır.Çeşitli çelik türleri için uygun viskozite değerine sahip camlar kullanılır.Aşağı-daki tabloda çelik ekstrüzyonunda kullanılan cam çeşitleri verilmektedir.

Nr.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Na ₂ O %	Diğer elemanların toplamı. %
-----	-----------------------	-------------------------------------	----------	------------------------	---------------------------------

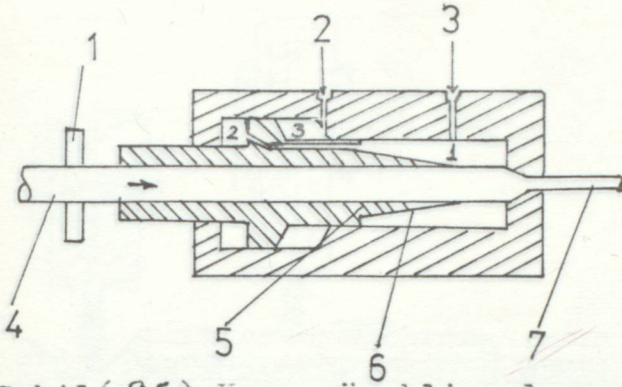
1	60	5	14	14	7.
2	72	4	8	13	5.
3	65	4	14	8	BaO 9.
4	71,5	0,8	-	7,5	13 4,5.

Ref(55)

7.4.Yarı sürekli hidrostatik ekstrüzyon.

Şekil(96) da gösterilen basınç destekli kademeli ekstrüzyon, yarı sürekli ekstrüzyon esasına göre çalışmaktadır. Bugüne kadar sadece deney tezgahlarında gerçekleştirilen yarı sürekli çalışma yöntemi, keyfi uzunluktaki yarı mamullerin işlenmesini mümkün kılmaktadır. Destek kuvveti yarı mamul üzerine, sızdırmazlığı garanti altına alınmış bir germe düzeni ile etkilendirilmekte, alıcındaki yüksek basınçla birlikte bloğun kademeli ekstrüzyonunu sağlamaktadır. Germe kovani(burç) matrise belirli bir mesafeden daha fazla yaklaştığında ekstrüzyon işlemine ara verilmektedir. Ekstrüzyon çevrimi şekil(96) ya bağlı olarak şu şekilde devam etmektedir.

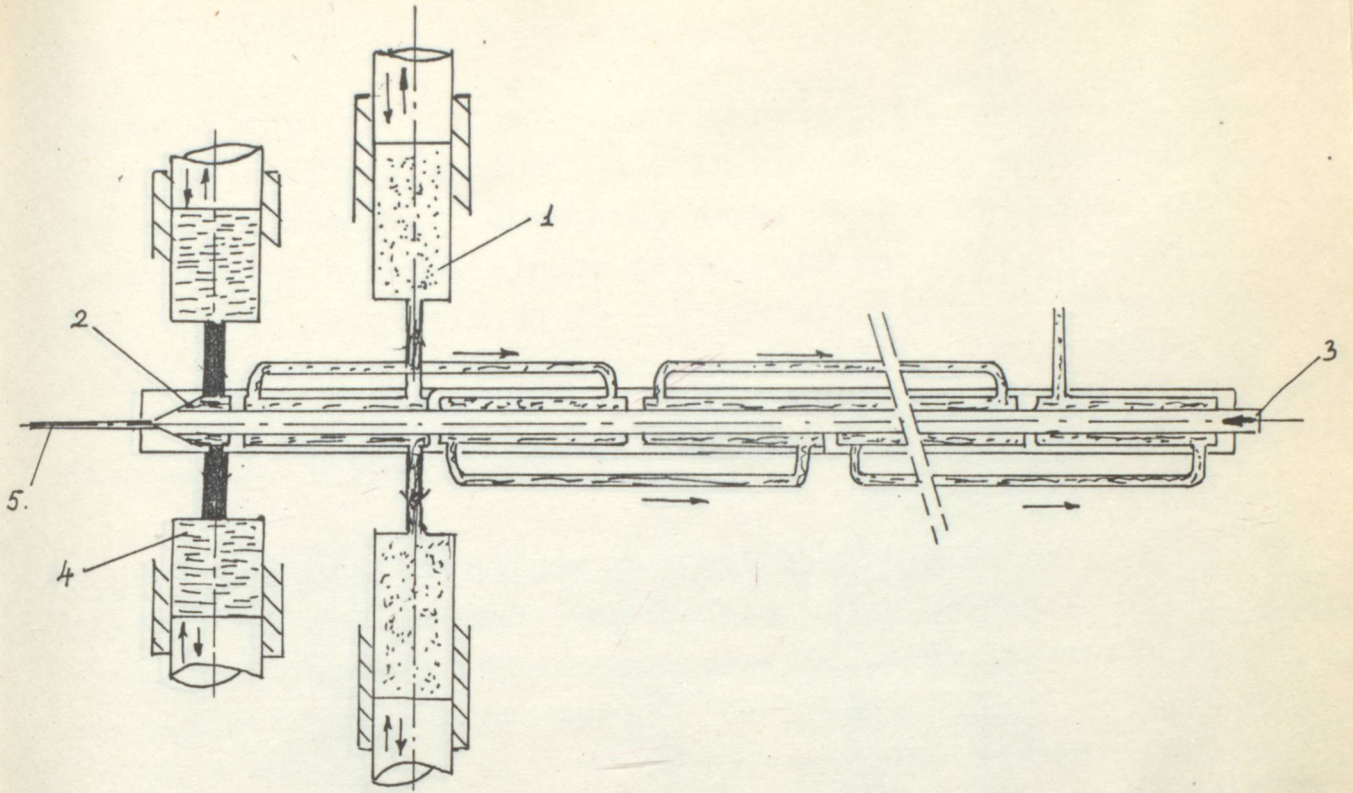
- 1-Yüksek basınç sisteminden, alıcı(1) doldurulur ve basınç etki ettirilir, germe kovani kapanır. Bir delik tarafından arka oda(2) da aynı anda doldurulur.
 - 2-Alıcı ve odadaki sıvı basıncı belirli bir değere ulaştığında, yarı mamulü işlem başlangıcında matrise doğru iten dış germe tertibatı çözülür. Çalışma basıncına ulaşılması ve odadan elde edilen destek kuvvet ile ekstrüzyon işlemi başlar.
 - 3-Germe kovani maksimal volu geride bıraktığında, dış germe düzeni kilitlenir ve aynı anda yüksek basınç düzeni de kapanır. İşlem durma periyoduna girerken germe kovani ayrılır.
 - 4-Alıcak basınçtaki sıvının oda(3) e dolması ile germe kovani sol konuma gelirken blok sabit durmaktadır.
- Bütün bu kademelerden sonra 1 den itibaren çevrim yeniden başlar.



Sekil(96).Yarı sürekli çalışan ekstrüzyon presi.1-Dış germe düzeni 2-Alçak basıncıdaki sıvı.3-Yüksek basınçlı sıvı.4-Sonsuz uzunluktaki varı mamul.5-Germe kovani.6-Lastik manset.7-Çubuk. Ref(55)

7.5.Sürekli hidrostatik ekstrüzyon.

Mekanik olarak etkiyen ve bu nedenle kademeli olarak kullanılabilen destek kuvveti(yarı sürekli sistem) yerine,sürekli olarak etkiyen bir ilave kuvvet düzeni kullanılacak olursa,sonsuz uzunluktaki yarı mamullerin sürekli ekstrüzyonu sağlanmış olur.Bir deney tesisatında,sürekli ilave kuvvet yüksek viskoziteli bir sıvının itme kuvvetiyle sağlanmış olup,bu sıvı çubuk üzerinde ekstrüzyon hareketi yönünde akış yapmaktadır.Bu durum şekil(97) de gösterilmiştir.İtme sistemi kademeli olarak düzenlenerek tüm ilerleme yolu boyunca oluşabilecek yüksek eksenel basınçların kırılma ve akma sınırına ulaşabilmeleri önlenmiştir.Yüksek hidrostatik basınç ve çekme gerilmelerinin olmaması sayesinde,kademe başına çok büyük kesit küçülmelerine ulaşılabilir. (Bakır çubukla %98 e kadar).Bunun anlamı,aynı kesit küçülmesi için,hidrostatik ekstrüzyonda,konvansiyonel tel çekmeye nazaran (max.kesit küçülmesi %5) daha az sayıda matrise gerek duyulacaktır.Birbiri arkasına düzenlenmiş bu tür tertibatlarla,örneğin teller çok küçük caplara kadar çekilebilir.



Sekil (97). Sürekli hidrostatik ekstrüzyon. Ref. (56)
 1-Kademeli viskoz sıvı itici düzen. 2-Ekstrüzyon odası.
 3-Sonsuz varı mamül. 4-Ekstrüzyon sıvısı. 5-Gubuk.

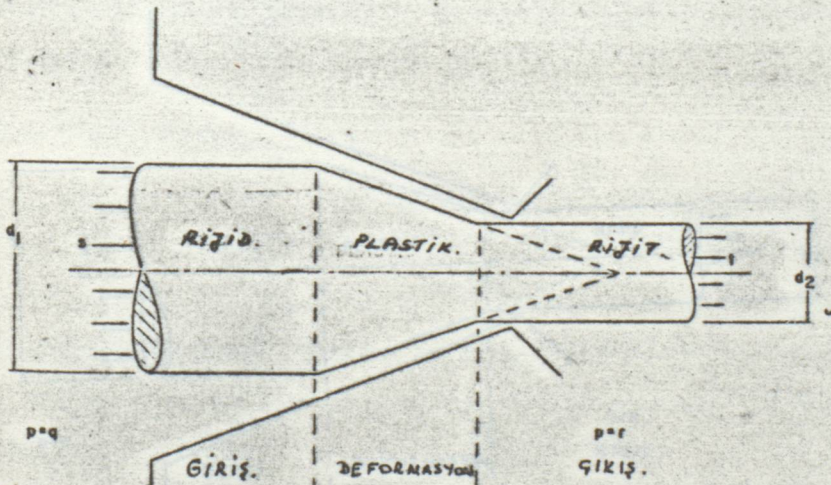
7.6. Normal ekstrüzyon ve Hidrostatik ekstrüzyonda sürtünme gücü kayıplarının karşılaştırılması.

Normal ekstrüzyon proseslerinde, sürtünme gücü kayıpları, aynı malzeme, yağlayıcı ve redüksiyon için, hidrostatik ekstrüzyona nazaran daha fazladır. Bu davranışı normal metodlar kullanarak açıklamak güçtür. Bu analizin en genel yolu, sabit bir sürtünme katsayısı kabulü yapmaktır. Bu da, iş parçasının, kullanılan takımların, yağlayıcıların iyi bir şekilde seçilmesi ile olur. Eğer seçilen model doğruysa, hidrostatik ve normal ekstrüzyon işlemleri için elde edilen sürtünme gücü kayıplarının eşdeğer olması gerekir.

Wilson ve Walowit, sürtünme durumlarını analiz etmek için izotermal yağlama teorisinden yararlanmışlardır. Bu teorinin amacı, hidrostatik ve normal ekstrüzyon proseslerindeki sürtünme gücü kayıplarını karşılaştırmaktır.⁵⁸

7.6.1. Genel özellikler.

Şekil(98) de Wilson ve Walowit in geliştirmiş olduğu analiz şematik olarak görülmektedir. d_1 çapındaki malzeme, sıvı içinde bir basınç odasından geçer, bu bölüm malzemeyi kalıba yönlendiren bir ön bölümdür.



Şekil (98). ANALİTİK MODEL. Ref (58)

odadaki basınç q dur. d_1 çaplı bölgede basınç q iken, d_2 çaplı bölgede basınç r dir. Basma kuvveti (augmenting stress) olarak isimlendirilen s kuvveti, kalıba yönelen malzemeye, t çekim kuvveti ise (draw stress) çıkan malzemeye uygulanır. Newtonien sıvılar için viskozitenin basınçla değişimini veren bağıntı şöyle verilmiştir.

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\delta P}$$

Wilson ve Walowit, Q, T, S ve R arasındaki ilişkiyi boyutsuz katsayılarla şöyle göstermişlerdir. Bu bağıntı denge tekniğinden yararlanılarak çıkarılmıştır.

$$Q + T - R = 1 - \frac{1}{G} \ln \left(\frac{2}{3} \frac{1 - e^{-G(1+S)} \cdot (A^{3/2} - A^6)}{3 - 2G} + A^{-G} \cdot e^{-G(1+S)} \right)$$

$$A = (d_1/d_2)^2$$

$$G = \delta \cdot G_A \quad \text{-Boyutsuz basınç viskozite katsayısı.}$$

$$Q = q/G_A \quad \text{-Destek kalıbı ve malzeme arasındaki boyutsuz basınç katsayısı.}$$

$$R = r/G_A \quad \text{-Boyutsuz arka germe basıncı.}$$

$$S = s/G_A \quad \text{-Boyutsuz basma kuvveti.}$$

$$T = t/G_A \quad \text{-Boyutsuz çekme kuvveti.}$$

7.6.2. Hidrostatik ekstrüzyon.

Hidrostatik ekstrüzyonun şematik görünüşü şekil (99-a) da görülmektedir.

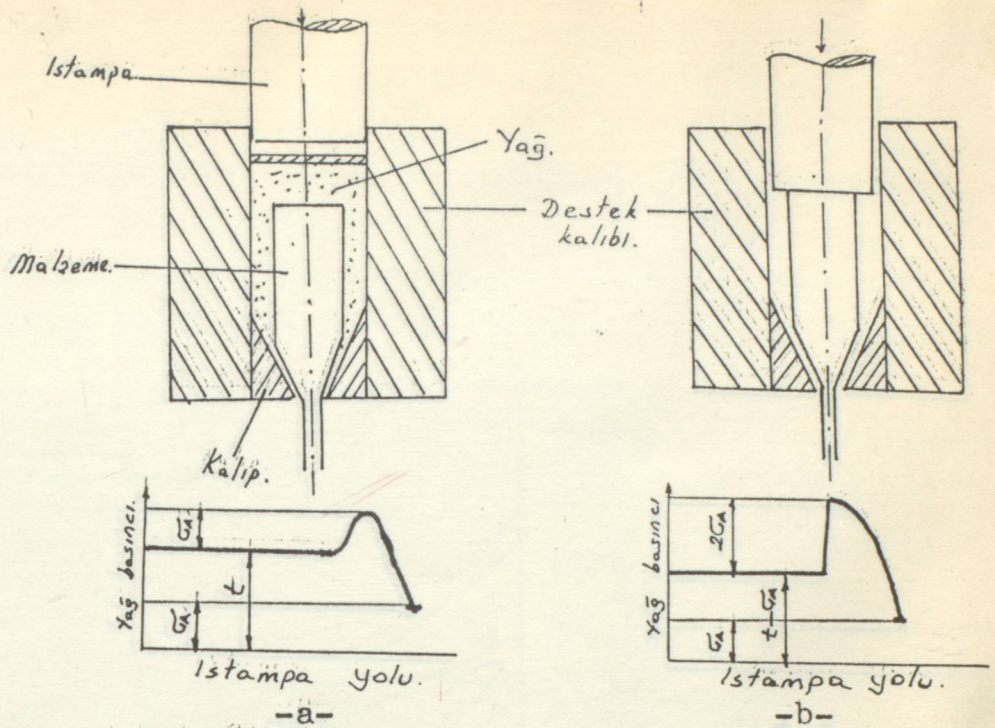
$$R = S = T = 0 \text{ dır.}$$

$$Q = 1 - \frac{1}{G} \ln \left(\frac{2}{3} \frac{(1 - e^{-G}) (A^{3/2} - A^6)}{(3 - 2G)} + A^{-G} \cdot e^{-G} \right)$$

Sızdırmazlık sürtünmesi çok küçükse, gövde basıncı f , sıvı basıncı q ya esittir. Bu nedenle, boyutsuz bir gövde basıncı (istampa basıncı) T tanımlanabilir. ⁵⁸

$$F = f/G_A.$$

$$F = 0.$$



Şekil(99).Normal ve hidrostatik ekstrüzyonun karşılaştırılması. Ref (58)

7.6.3.Normal ekstrüzyon.

Hidrostatik ekstrüzyon için geliştirilen teori,şekil(99-b) de ki normal ekstrüzyon işlemine de uygulanabilir.Uygulama şartı olarak,malzeme ile kalıp arasındaki yağlayıcı film kalınlığının fazla olması gerekir.Ancak bu şart gerçekleşirse,malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme kuvveti küçülür.Aradaki yağ filmi basıncı q sabit olarak alınabilir.Bu şartlar,ancak uygun yağlama koşulları ile sağlanabilir.Eğer bu şartlar gerçekleştirilebilirse, normal ekstrüzyon işlemini,basma gerilmesi malzemenin akma gerilmesine eşit olan bir hidrostatik ekstrüzyon olarak kabul edebiliriz.

Malzemedeki ve sistemdeki eksenel gerinim,yağlayıcı basıncı q ya malzemenin akma gerilmesine eşit miktarda arttırır.Eğer çekme gerilmesi t (ön germe kuvveti),veya arka germe kuvveti yoksa,boyutsuz parametrelerin uygun değerleri şunlardır.

$$S = 1, R = T = 0.$$

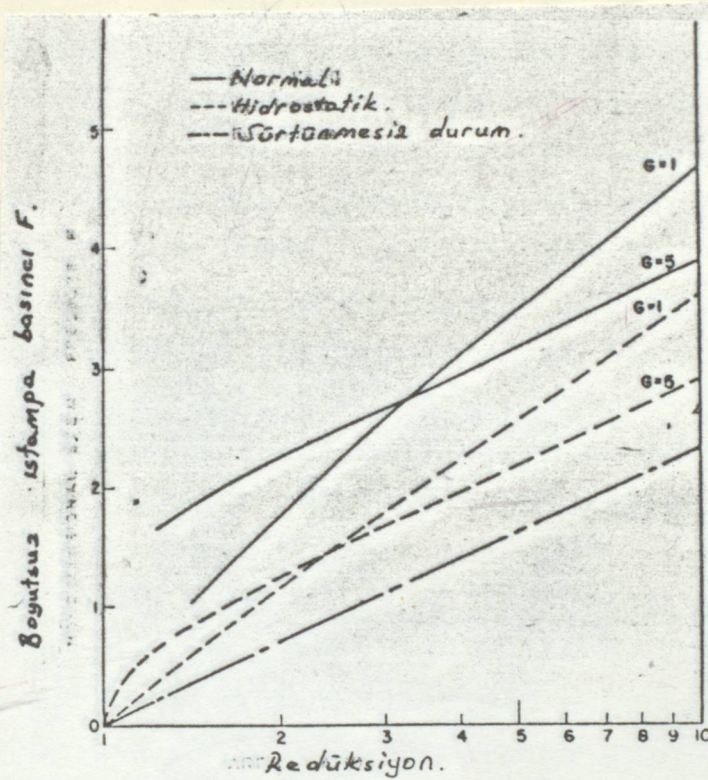
$$Q = 1 - \frac{1}{G} \ln \left(\frac{2}{3} \frac{(1 - e^{-2G})(A^{3/2} - A^G)}{(3 - 2G)} + A^{-G} \cdot e^{-2G} \right)$$

Boyutsuz sister basıncı F ise şöyle verilir.

$$F = 1 + Q.$$

7.6.4. Normal ve hidrostatik ekstrüzyonun karşılaştırılması.

Şekil (100)de, hidrostatik ve normal ekstrüzyon işlemlerindeki teorik ıstampa basıncı F in karşılaştırılması görülmektedir.

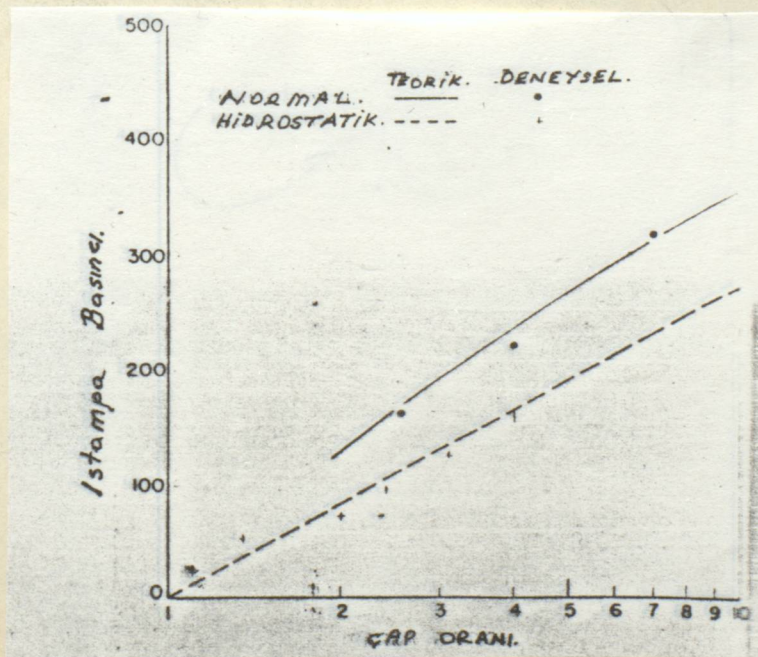


Şekil (100). Normal ve hidrostatik ekstrüzyonda ıstampa basıncı. Ref (61)

Boyutsuz ıstampa basıncı F , viskozitenin basınçla değişimi de dikkate alınarak her redüksiyon için tespit edilebilir. Ayrıca şekil üzerinde, sürtünmesiz durum için de bir hesaplama yapılmıştır. Şekil (100) incelendiğinde, izotermal hidrodinamik yağlama teorisi kullanılarak tahmin edilen ıstampa basıncı, aynı malzeme, yağlayıcı ve redüksiyon için, normal ekstrüzyonda elde edilen basınçtan daha düşüktür. İstampa basıncındaki değişiklik, boyutsuz viskozite basınç katsayısı ve redüksiyon kü-

İstampa basıncı, daha azdır. Bu parametrelerin yükselmesiyle değişiklikleri de arttırma gösterir. Geniş redüksiyonlarda ve basınç katsayısı-
nın yüksek değerleri için, normal ekstrüzyondaki istampa basıncı, hidrostatik ekstrüzyondakinden, malzemenin akma gerilmesi kadar fazladır. İstampa basıncındaki değişim, hidrodinamik yağ-
lamalı genel ekstrüzyonda, hidrostatik ekstrüzyona nazaran da-
ha fazladır. İstampa basıncından, malzemenin akma gerilmesi ka-
dar fazladır. Normal ekstrüzyon işlemlerine, basma gerilmesi mal-
zeme Hidrostatik ekstrüzyonda istampa basıncındaki değişim, normal
ekstrüzyona nazaran daha üniformdur. Hidrostatik ekstrüzyonda
deformasyon bölgesinin ucunda, malzeme ile kalıp arasındaki
yağ basıncında, malzemenin akma gerilmesine eşit oranda bir
artış olur. Normal ekstrüzyonda bu basınç artışı iki katıdır.
Bu nedenle, kalıp ve malzeme arasındaki hidrodinamik filmin
oluşumundaki direnç, normal ve hidrostatik ekstrüzyon için bü-
yük farklılıklar gösterir. Bunun neticesi sürtünme, hidrodina-
mik yağlama şartlarının mevcut olduğu normal ekstrüzyonda bi-
le, hidrostatik ekstrüzyondan fazladır.

Şekil(101), Duffil ve Mellor isimli araştırmacıların çelik üze-
rindeki araştırmalarını gösterir. Bu şekil sadece küçük koni
açıları içindir. Hidrostatik ekstrüzyon için 30° , normal ekstrü-
zyon için 45° seçilmiştir. Bunun nedeni, pekleşmenin teorik ola-
rak içerilmeyen etkisini azaltmaktır. Şekil(101)de teorik ve
deneysel sonuçların uygunluk içinde olduğu görülür.



Şekil(121). Denelsel ve teorik sonuçların karşılaştırılması.

7.6.5.SONUÇLAR.

İzotermal hidrodinamik yağlama teorisi sürtünme kayıplarının, aynı malzeme, yağlayıcı ve redüksiyon için, elverişli yağlama şartları oluşturulduğunda, normal ekstrüzyonda, hidrostatik ekstrüzyona nazaran daha fazla olduğunu göstermek için kullanılmıştır. Yüksek basınç viskozite katsayılı yağ kullanıldığında, geniş redüksiyonlarda, normal ekstrüzyondaki ıstampa basıncı, hidrostatik ekstrüzyondaki ıstampa basıncından, malzemenin akma gerilmesi kadar fazladır. Normal ekstrüzyon işlemlerine, basma gerilmesi malzemenin akma gerilmesine eşit bir hidrostatik ekstrüzyon olarak bakabiliriz. Üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Wilson ve Wal-

wit, hidrostatik ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama olayını açıklıyabilmek için, izotermal yağlama teorisinden yararlanmışlardır. Hillier ve Avitzur, sabit bir hız alanı ve denge tekniğinden yararlanarak geliştirdikleri analizde, hidrodinamik yağlama olayını, şekil değiştirmiş Sommerfeld sayısıyla açıklamışlardır. Snidle, Dowso ve Parsons, elasto-plasto hidrodinamik yağlama teorisini ortaya atmışlar, daha sonraki çalışmalarında bu teorilerine malzemenin pekleme etkilerini de ilave ederek analizi geliştirmişlerdir. Wilson ve Mahdavian ise ısı etkileri de gözönüne alarak bir teorik model oluşturmuşlardır.

Biz araştırmamızda uygun deformasyon teorisini ve izotermal yağlama durumlarının varlığı kabul edilerek, izotermal yağlama teorisini kullanarak, araştırmamızın sonuçları konuyla alakalı olarak verilecektir.

Bu çalışmada Avitzur ve Hillier'in geliştirdiği hidrostatik yağlama modelini kısaca inceleyerek başlayalım.

Hidrodinamik yağlama için kayma gerilmesini $\tau = \eta \frac{dv}{dy}$ olarak ifade edilebilir. Burada η viskozite, v hız, y ise yağlama bölgesi kalınlığıdır. Bu durumda elde edilen (τ_{xx}/G_1) oranı aşağıdaki gibidir.

7.7.Hidrostatik ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama modelleri.

Hidrodinamik yağlama teorisinin hidrostatik ekstrüzyon proseslerine uygulanması konusunda birçok incelemeler yapılmıştır, burada kısaca bunlardan bahsedeceğiz.

Christopherson,⁵⁶ Naylor,⁵⁷ Osterle,⁶³ Dixon, Chu ve Hillier isimli araştırmacılar, hidrodinamik yağlama olayını gerçekleştirebilmek için, giriş bölgesinde elde edilebilecek minimum film kalınlığı üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Wilson ve Walowit,⁵⁸ hidrostatik ekstrüzyonda hidrodinamik yağlama olayını açıklıyabilmek için, izotermal yağlama teorisinden yararlanmışlardır. Hillier ve Avitzur,⁶³ sabit bir hız alanı ve denge tekniğinden yararlanarak geliştirdikleri analizde, hidrodinamik yağlama olayını, şekil değiştirmiş Sommerfeld sayısıyla açıklamışlardır. Snidle, Dowso ve Parsons,⁶⁰ elasto-plasto hidrodinamik yağlama teorisini ortaya atmışlar, daha sonraki çalışmalarında bu teorilerine malzemenin pekleşme etkilerini de ilave ederek analizi geliştirmişlerdir. Wilson ve Mahdavian ise ısı etkileri de gözönüne alarak bir teorik model oluşturmuşlardır.⁶¹

Biz araştırmamızı uygun deformasyon şartlarının ve izotermal yağlama durumlarının varlığı kabulü ile geliştirilen, izotermal yağlama teorisini kullanarak sürdüreceğiz. Ayrıca diğer araştırmacıların sonuçları konu arasında karşılaştırmalı olarak verilecektir.

İncelememize Avitzur ve Hillier'in geliştirdiği hidrodinamik yağlama modelini kısaca inceliyerek başlayalım.⁶³⁶⁴

Hidrodinamik yağlama için kayma gerilmesini veren temel bağıntıdan yararlanılarak elde edilen (τ_{xb}/τ_A) oranı şöyle verilebilir.

$$\frac{G_{xb.}}{G_A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + 2 f(\alpha) \ln \frac{R_i}{R_f} +$$

$$\sqrt{N \cdot \frac{2r}{(1-r)^{3/2}} \cdot \frac{f(\alpha) \cdot \cos^2 \alpha}{\sin \alpha}}$$

$$N = \frac{2 \cdot V_f}{G_A \cdot R_f}$$

Ekstrüzyon hızı yeteri kadar yüksek ve koni açısı yeterince küçük olduğu zaman,

$$\frac{P_b}{G_A} = \frac{P_a}{G_A} + 2 f(\alpha) \cdot \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + 2 \frac{2 \cdot V_f}{R_f \cdot G_A} \left[\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha \left(\frac{R_f}{R_o} \right)^2 + \frac{L}{R_f} \right]$$

Yağ filmi kalınlığı ise.

$$\frac{E}{R_f} = \sqrt{\frac{V_f \cdot \eta}{R_f \cdot G_A} \cdot \frac{1}{f(\alpha)} \left\langle \frac{\cot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3} \left[1 - \left(\frac{R_f}{R_o} \right)^3 \right] + \frac{L}{R_f} \right\rangle}$$

Kalıpla malzeme arasındaki Metal-metal temasını engellemek için, hidrodinamik yağlama ile hidrostatik ekstrüzyon arasında özel bir davranış ilişkisi vardır. Verilen N katsayısı bu davranışın etkisini gösteren boyutsuz bir terimdir. Araştırmacılar bu terim için değişmiş Sommerfeld sayısı deyimini kullanmaktadır. Görüldüğü gibi viskozitedeki ve hızdaki bir yükselme ve malzeme giriş çapındaki bir azalma (E/R_f) boşluğunda ve ekstrüzyon basıncında bir yükselmeye neden olacaktır. Ref(56).

7.8. Hidrostatik ekstrüzyonda izotermal hidrodinamik yağlama modeli.

7.8.1. İşlemin genel tanımı. Konien bir sıvıdır ve bu sıvıya bağlı bir değişim gösterir.

Şekil (102) de analizde kullanılan model sematik olarak görülmektedir. Malzeme q basınçlı bir bölümden r basınçlı bir bölüme geçmektedir. Basma kuvveti malzemeye, çekme kuvveti de çıkan ürüne uygulanır. Yağlayıcı film tabakası, belirli şartlar altında, malzeme ve kalıp yüzeyini birbirinden ayırır. Model başlıca üç bölgeden meydana gelmiştir.

1-Giriş bölgesi.

2-Deformasyon bölgesi.

3-Çıkış bölgesi.

Giriş bölgesinde yağlayıcı, hidrodinamik sıkışma hareketi ile kalıp ile malzeme arasındaki boşluğa çekilir. Yağlayıcı filmin basıncı, malzeme deformasyon bölgesinin giriş ucuna gelinceye kadar yükselir. Deformasyon bölgesinde malzeme plastik olarak şekillendirilir. Çıkış bölgesinde malzeme tekrar rijit hale gelir ve yağlayıcı filmin basıncı hızlı bir şekilde r değerine düşer.

7.8.2. Analizde kullanılan kabuller.

1-Kalıp koni şeklinde ve rijittir. Kalıp açısı 2θ dır.

2-Malzeme deformasyon bölgesinin giriş noktasına kadar rijittir. Akma olayı Tresce veya Maxwell-Mises kriterleriyle açıklanabilir. Deformasyon sabit ve tüm yüzeye eşit dağılmış akma gerilmesi σ_A ile karakterize edilebilir.

3-Deformasyon bölgesinin her yerinde silindirik bir gerilme dağılımının varlığı kabul edilir.

4-Şekil verme üniformdur ve malzemenin hızı, çap alanı ile ters orantılıdır.

5-Yağlayıcı film kalınlığı, malzeme çapı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür.

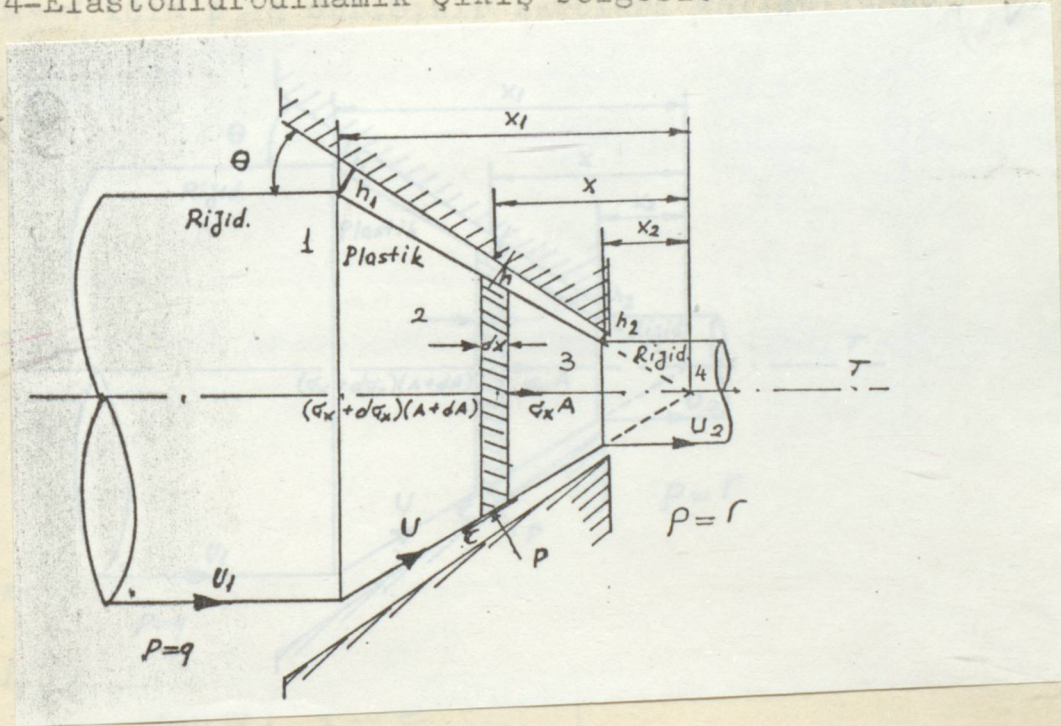
- 6-Sabit ve sıkıştırılamayan viskoz akış için Reynolds eşitlikleri kullanılabilir.
- 7-İzotermal şartlar geçerlidir.Yani sıcaklık sabittir.
- 8-Yağlayıcı viskoziteli newtonien bir sıvıdır ve basınca bağlı bir değişim gösterir.

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\gamma P}$$

- 9-Deformasyon bölgesindeki basınç gradyanı çok düşüktür bu nedenle ,yağlayıcı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir.Ayrıca,giriş ve çıkış bölgelerindeki basınç gradyanlarının deformasyon bölgesinin sonunda sıfıra eriştiği kabul edilir.

Elasto-plasto hidrodinamik modelde 4 bölge mevcuttur,bunlar.

- 1-Elastohidrodinamik giriş bölgesi.
- 2-Plastohidrodinamik deformasyon bölgesi.
- 3-Kalıp üzerindeki plastohidrodinamik bölge. (Matris)
- 4-Elastohidrodinamik çıkış bölgesi.



Sekil(102).Hidrostatik ekstrüzyon prosesinin sematik gösterilisi. (Ref(59))

7.8.3 Giriş bölgesi.

Bu bölgede Reynolds eşitlikleri şöyle yazılabilir. $\times$

$$\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} = 6 U_1 (h - h_1).$$

h_1 , giriş bölgesindeki film kalınlığı, U_1 ise giriş hızıdır. Film kalınlığı h şöyle verilebilir.

$$h = h_1 + (x - x_1) \cdot \tan \theta.$$

h in bu değeri Reynolds eşitliğinde yerine konup integrali alınırsa:

$$e^{-\gamma p} = \frac{6 \cdot U_1 \cdot \eta_0 \cdot \gamma}{\tan \theta} \left[\frac{h_1}{2h^2} - \frac{1}{h} \right] + C_1.$$

C_1 integral sabitidir ve sınır şartları ile belirlenebilir. $h = \alpha$ için $p = q$ dur. Sınır şartları kullanılarak:

$$C_1 = e^{-\gamma q}.$$

C_1 değeri yerine konursa,

$$e^{-\gamma p} - e^{-\gamma q} = \frac{6 \cdot U_1 \cdot \eta_0 \cdot \gamma}{\tan \theta} \left[\frac{2h^2}{h_1} - \frac{1}{h} \right]$$

Deformasyon bölgesinin giriş ucunda, $h = h_1$ ve $p = p_1$ sınır şartları ve akma kriteri kullanılarak.

$$|G_I - G_{III}| = G_y.$$

$$G_{III} = -p.$$

$$P = G_A + q.$$

$$P_1 = G_A + q + S.$$

$$G_I = -q.$$

eşitlik h_1 için çözümlenirse.

$$h_1 = \frac{3 \cdot U_1 \cdot \gamma \cdot \eta_0 \cdot e^{\gamma q}}{\tan \theta \left[1 - e^{-\gamma(G_A + S)} \right]}.$$

Burada s , basma ya da istampa kuvvetidir. Böylece deformasyon bölgesinin giriş ucundaki film kalınlığı belirlerlenmiştir. Ayrıca analizden elde edilen sonuçlardan giriş bölgesindeki basınç değişimi de hesaplanabilir.

Elasto-plasto hidrokinamik yağlama modelinde giriş bölgesi için çıkarılan film kalınlığı bağıntısı aynıdır. Mahdavian ın geliştirmiş olduğu, ısı etkileri de dikkate alan, termal hidrokinamik modelde, giriş bölgesindeki film kalınlığı, çok az bir farklılıkla şöyle bulunmuştur.

$$h_1 = \frac{3 \cdot \eta_0 \cdot U_1 \cdot \gamma \cdot e^{\gamma s}}{\tan \theta (1 - e^{\gamma})} \cdot \frac{1}{1 + 0,565 \cdot G^{0,375} \cdot L^{0,8}}$$

$$G = \gamma \cdot C_A \quad L = \frac{\eta_0 \cdot \delta \cdot U_1^2}{k}$$

k, yağlayıcının ısı iletkenlik katsayısıdır, δ ise, viskozitenin sıcaklıkla değişim katsayısıdır. Bu teoremin özelliği, sıcaklık etkilerini de dikkate almasıdır.

7.8.4. Deformasyon bölgesi.

Bu bölge için Reynolds eşitliği şöyle yazılabilir.

$$\frac{x \cdot h^3}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx} = 6 (x \cdot U \cdot h - x_1 \cdot U_1 \cdot h_1)$$

U, malzemenin bölgesel yüzey hızıdır. 9. kabul gereği, çok küçük olan soldaki terim ihmal edilebilir. 4. kabulden yararlanılarak şu bağıntı ortaya çıkar.

$$U = U_1 \cdot \left(\frac{x_1}{x} \right)^2 \implies h = h_1 \cdot \frac{x}{x_1}$$

h_1 , daha evvel belirlendiğinden, bu bölgedeki film kalınlığı belirlidir. Deformasyon bölgesindeki plastik şekil değiştirme eşitliği, Hoffmann ve Sachs tarafından türetilen bir metodla,

$$\frac{x}{2} \cdot \frac{dP}{dx} - \tau - \frac{\tau}{\tan \theta} = 0$$

τ malzemenin kayma gerilmesidir, orijinal anlatımda sürtünme gerilmesi olarak geçmektedir. τ yağlayıcı film tabakasındaki viskoz akıma bağlı olarak şöyle yazılabilir.

$$\tau = \eta \cdot \frac{U}{h}$$

Elde ettiğimiz η , U, h değerleri yerine konursa,

$$\tau = \frac{e^{\gamma(p-q)} (1 - e^{-\gamma(\zeta_A + s)})}{3\gamma} \left(\frac{x_1}{x} \right)^3 \tan \theta.$$

τ nun bu değeri, diferansiyel eşitlikte yerine konursa,

$$\frac{x}{2} \cdot \frac{dp}{dx} - \zeta - e^{\gamma(p-q)} \frac{(1 - e^{-\gamma(\zeta_A + s)})}{3\gamma} \left(\frac{x_1}{x} \right)^3 = 0.$$

Analize boyutsuz parametreleri kullanarak devam etmek uygundur,

$$B = e^{-\gamma p} \quad Q = q/\zeta_A.$$

$$X = x/x_1 \quad S = s/\zeta_A.$$

$$G = \gamma \zeta_A.$$

Eşitlik şu hali alır.

$$X, \frac{dB}{dX} + 2GB + \frac{2}{3X^3} \cdot \frac{(1 - e^{-G(1+S)})}{e^{GQ}} = 0.$$

Bu ifadeden B çekilirse.

$$B = \frac{2(1 - e^{-G(1+S)})}{3X^3 \cdot e^{GQ} (3 - 2G)} + \frac{C_2}{X^{2G}}.$$

C_2 integral sabiti, deformasyon bölgesinin giriş kenarı için sınır şartları olan, $x=1$ için $B = e^{-G(1+Q+S)}$ den belirlenebilir.

$$C_2 = \frac{-2}{3} \cdot \frac{(1 - e^{-G(1+S)})}{e^{GQ} (3 - 2G)} + e^{-G(1+Q+S)}$$

C_2 nin bu değeri yerine konursa,

$$B = e^{-GQ} \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{(1 - e^{-G(1+S)}) (X^{-3} - X^{-2G})}{(3 - 2G)} + X^{-2G} \cdot e^{-G(1+S)} \right]$$

$$P = p/\zeta_A,$$

$$P-Q = \frac{1}{G} \cdot \ln \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{(1 - e^{-G(1+S)}) (X^{-3} - X^{-2G})}{(3 - 2G)} + X^{-2G} \cdot e^{-G(1+S)} \right]$$

Böylece temas bölgesindeki basınç dağılımı belirlenmiş olur. Deformasyon bölgesinin çıkış ucunda $x = x_2, p = p_2$ dir. Bu bölge için akma kriteri kullanılarak.

$$P_2 = \sigma_A + r - t.$$

$$D = x_2 / x_1. \quad T = t / \sigma_A.$$

$$R = r / \sigma_A.$$

$x = D$ olduğu zaman, $P = 1 + R - T$. şartı yazılarak, eşitlik,

$$\theta + T - R = 1 - \frac{1}{G} \cdot \ln \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{(1 - e^{-G(1+S)})(D^{-3} - D^{-2G})}{(3 - 2G)} + D^{-2G} \cdot e^{-G(1+S)} \right]$$

halini alır. Böylece boyutsuz işlem parametreleri, Q, R, S, T ile boyutsuz viskozite katsayısı G , çap oranı D arasındaki bağıntı belirlenmiş olur.

Deformasyon bölgesi için amaç, bölgedeki kayma gerilmesinin bulunmasıdır. Mahdavian ⁶² in geliştirmiş olduğu termal hidrodinamik yağlama teorisine göre, deformasyon bölgesindeki yağ τ filmi kalınlığı,

$$h = \frac{x \cdot D \cdot (e^D - 1)}{2(D + e^D - 1)} \cdot h_1.$$

$$D = (T_b - T_d).$$

T_b - Malzeme sıcaklığı.

T_d - Kalıp sıcaklığıdır.

$$X = x / x_1.$$

Bu bölge için kayma gerilmesi ise,

$$\tau = \frac{D \cdot \eta_0 \cdot e^{xP} \cdot U_1}{h \cdot (e^D - 1) \cdot x^2}.$$

$$D = -2 \cdot K \cdot \ln x.$$

$$K = \frac{\delta \cdot \sigma_A}{S_0}.$$

S_0 , şekillendirilen malzemenin hacımsal ısı dağılım katsayısıdır. Bu bölge için denge denklemi yazılırsa,

$$P = S + 2 \ln x - \frac{1}{G} \ln \left[e^{-G} - \frac{4}{3} (1 - e^{-G}) + (1 + 0,565 \cdot G^{0,355} \cdot L^{0,8}) (A(x) - A(1)) \right]$$

$$A(x) = \int x^{2G-4} \cdot \frac{(x^{-2K} + 2 \cdot K \cdot \ln x - 1)}{(x^{-2K} - 1)^2} dx.$$

$$L = \frac{\eta_0 \cdot \delta \cdot U_1^2}{4k} \quad \text{Isıl viskoz parametre.}$$

$$S = 1 + \frac{1}{G} \ln \left[e^{-G} - \frac{4}{3} (1 - e^{-G}) (1 + 0,565 \cdot G^{0,355} \cdot L^{0,8}) \right. \\ \left. (A(R^{-\frac{1}{2}}) - A(1)) \right] + \ln R.$$

7.8.5.Çıkış bölgesi.

Çıkış bölgesinin, basınç ve film kalınlığı üzerinde, giriş ve deformasyon bölgesi kadar önemi yoktur. Bununla birlikte, yağlama prosesinde tam sıvı yağlama elde edebilmek için çıkış bölgesinde de bazı şartların yerine getirilmesi gerekir. Kalıbın, plastik şekillendirme işleminde etkili olan matris kısmının köşeleri yuvarlatılmış kabul edilir. Bu nedenle malzeme kalıp ağzından belirli bir mesafe sonra rijit hale gelir. Böylece film kalınlığı, deformasyon bölgesinin ucundaki h_2 değerinden h_3 değerine düşer.

Bu bölge için Reynolds esitliğini yazarsak,

$$\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx} = -6 U_2 (h - h_2).$$

U_2 hızı, malzemenin çıkıştaki hızıdır ve şöyle verilir.

$$U_2 = \frac{U_1}{D^2}, \quad D = \frac{x_2}{x_1}.$$

Film kalınlığı ise şöyle verilebilir.

$$h = h_2 + (x - x_2) \tan \theta.$$

$$h_2 = h_1 \cdot D.$$

Bu sonuçlardan yararlanılarak.

$$e^{-\gamma p} = \frac{6 \cdot U_2 \cdot \eta_0 \cdot \gamma}{\tan \theta} \left[\frac{h_2}{2h^2} - \frac{1}{h} \right] + C_3.$$

C_3 integral sabiti sınır şartları ile belirlenir. Deformasyon bölgesinin çıkış ucu için, $h=h_2, p=p_2$ dir. Bu nedenle.

$$C_3 = e^{-\gamma p_2} + \frac{3 \cdot U_2 \cdot \eta_0 \cdot \gamma}{h_2 \cdot \tan \theta}.$$

C_3 ün bu değeri bağıntıda yerine konursa,

$$e^{-\gamma p} - e^{-\gamma p_2} = \frac{6 \cdot U_2 \cdot \eta_0 \cdot \gamma}{\tan \theta} \left[\frac{h_2}{2h^2} - \frac{1}{h} + \frac{1}{2h_2} \right]$$

h_1, p_2, U_2 ve h_2 nin değerleri yerine konursa

$$\frac{[e^{-\gamma p} - e^{-\gamma(G_A + r - t)}]}{[e^{-\gamma q} - e^{-\gamma(G_A + s + q)}]} = \frac{1}{D^3} \left[\left(\frac{h_2}{h} \right)^2 - 2 \left(\frac{h_2}{h} \right) + 1 \right]$$

çıkış bölgesi için tanımlanan basınç dağılımında, $h=h_3, p=r$ konularak.

$$\left(\frac{h_2}{h_3} \right)^2 - \left(\frac{h_2}{h_3} \right) + 1 - \frac{D^3 (e^{-\gamma r} - e^{-\gamma(G_A + r - t)})}{(e^{-\gamma q} - e^{-\gamma(G_A + s + q)})} = 0.$$

Kuadritik formdaki bu eşitlik, herhangi bir çıkış durumunda h_3 e iki değer verilerek çözülebilir. $0 < h_3 < h_2$, kalıp çıkışındaki minumum film kalınlığını verir.

7.9. ANALİTİK SONUÇLAR.

Hidrodinamik filmin yağlayıcı kabiliyetini genelleştirmek için giriş bölgesindeki yağ kalınlığını veren,

$$h_1 = \frac{3 \cdot U_1 \cdot \delta \cdot \eta_0 \cdot e^{\delta q}}{\tan \theta [1 - e^{-\delta(G_A + S)}]}$$

bağıntısı kullanılır. Bu eşitliği tekrar incelersek, h_1 değerinin büyük olması için, U_1 hızının yüksek, θ açısının küçük olması gerekir. Hidrodinamik yağlama olayının gelişebilmesi için h_1 değerinin yüksek olması istenilen bir özelliktir. Yüksek basınç viskozite katsayılı ve yüksek viskoziteli bir yağlayıcı kalın bir yağlayıcı filmi oluşturulmasında en etkili parametredir. Bunun yanında, hidrostatik ekstrüzyon basıncı q nun artırılması kalın film oluşumunu geliştirir. Artan s ıstampa kuvveti, film kalınlığını azaltma eğilimindedir. Diğer taraftan azalan s kuvveti veya arka germe kuvvetinin kullanılması, film kalınlığında önemli bir artışa neden olur. Arka germe kuvvetinin kullanılmasının bir diğer amacı, kalıp aşınmasını azaltmaktır. ⁵⁹

Deformasyon bölgesi için boyutsuz kalıp basıncını veren,

$$P-Q = \frac{1}{G} \cdot \ln \left[\frac{2}{3} \frac{(1 - e^{-G(1+S)})(x^{-3} - x^{-2G})}{3-2G} + x^{-2G} \cdot e^{-G(1+S)} \right]$$

eşitlikten görüldüğü gibi, bağıntı, boyutsuz basınç viskozite katsayısı G , boyutsuz ıstampa kuvveti S , ve x pozisyonunun bir fonksiyonudur. U_1 hızı, θ açısı ve D çap oranından bağımsızdır. Bununla beraber, τ yu veren bağıntıdan görüldüğü gibi,

$$\tau = \frac{e^{\delta(P-Q)} (1 - e^{-\delta(G_A + S)})}{3\delta} \left(\frac{x_1}{x} \right)^3 \cdot \tan \theta.$$

kayma gerilmesi, $\tan \theta$ ile direkt olarak orantılıdır. τ değeri $\frac{G_A}{2}$ değerine yaklaşıırken, 4. kabulde verilen uniform deformasyon şartı bozulur. Bu nedenle geniş *koni* açılar, ünifom deformasyon durumlarını etkilediği zaman daha önemli bir hal alır. Boyutsuz işlem parametreleri arasındaki ilişkivi veren,

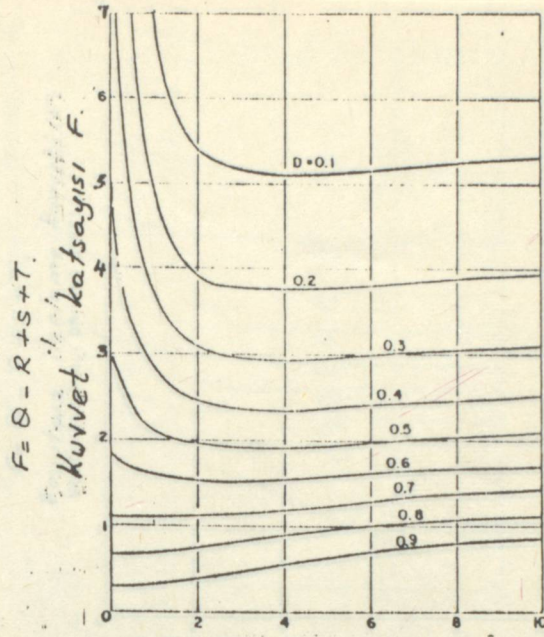
$$Q+T-R = 1 - \frac{1}{G} \cdot \ln \left[\frac{2}{3} \frac{(1 - e^{-G(1+s)})(D^{-3} - D^{-2G})}{3 - 2G} + D^{-2G} \cdot e^{-G(1+s)} \right]$$

bağıntıdan görüldüğü gibi, U_1 hızı ve θ açısı etkili bir parametre değildir. Sürekli hidrostatik ekstrüzyon ve ardışık tel çekme sistemleri için yapılan deneyler, hız bileşeninin, ekstrüzyon basıncından ve uygulanan çekme kuvvetinden bağımsız olduğu gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Bununla beraber birçok deney için kalıp açısının diğer parametreleri etkilediği bulunmuştur. Bu ilişkiyi pekleşme etkisi ile açıklayabiliriz. Bu nedenle uniform deformasyon durumu her zaman geçerli değildir. Parametreler arası ilişkiyi veren bağıntının ilginç bir özelliği, ekstrüzyon basıncı Q , arka germe kuvveti R , ön germe kuvveti T arasındaki doğrusal bir ilişkiyi tahmin edebilmesidir. Bu doğrusal ilişki, diğer parametrelerin sabit kaldığı durumlar için geçerlidir. Q ile T arasındaki doğrusal ilişki Sabroff ve Fiorentino'nun yaptığı deneylerle doğrulanmıştır. Yağlama olayı Coulomb modeliyle karakterize edilirse, Q , R ve T arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı görülür.

Bu değişken kuvvetlerden yararlanılarak, boyutsuz ilerleme kuvveti (driving stress) F i şöyle tanımlamak mümkündür. F için kuvvet katsayısı *deyimi de kullanılabilir.*

$$F = Q - R + S + T.$$

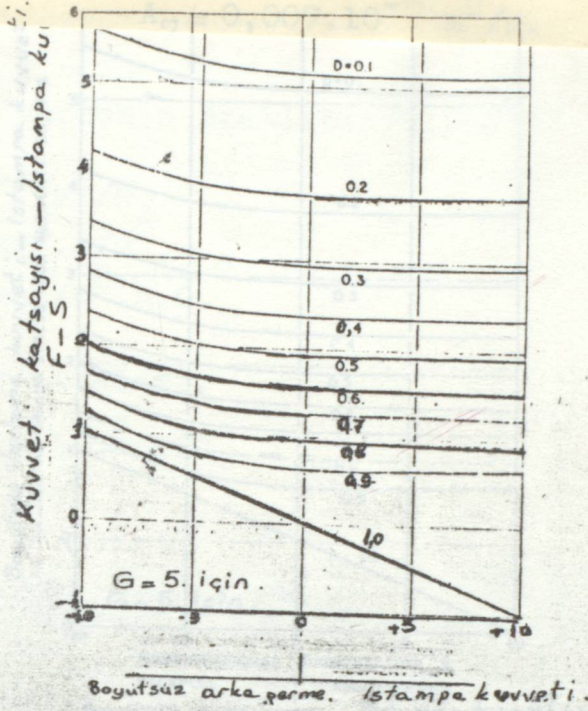
Şekil (103) boyutsuz ilerleme kuvveti F ile, boyutsuz basınç viskozite katsayısı G arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada çap oranı D nin çeşitli değerleri irdelenmiştir. ($s=0$ kabulü ile). Geniş çap oranları için, istenen boyutsuz ilerleme kuvveti F , artan G ile birlikte monoton bir şekilde yükselir. Bu nedenle büyük çap oranları yani küçük redüksiyonlar için düşük basınç viskozite katsayılı bir yağlayıcı kullanılması daha uygundur. Küçük çap oranlarında yani geniş redüksiyonlarda, optimum yağlama şartları, G nin sifıra yaklaşan değerlerini gerektirir. Geniş redüksiyonlar için en uygun yağlayıcı, G değerini minimum yapan yağlayıcıdır.



Boyutsuz basınç katsayısı $G = \gamma \cdot C_A$. Ref(61)

Şekil(103), Kuvvet katsayısı F ve G arasındaki ilişki.(çeşitli D değerleri için)

$G=1, D=0,4$ değeri kritik bir değerdir. D nin $0,4$ den az olduğu değerler için, $F-S$ bağıntısı artan S ile orantılı olarak yükselir. D nin $0,4$ den büyük olduğu durumlarda, yine aynı şekilde $F-S$, artan S ile yükselir. Genel çekme durumlarında, arka germenin etkisi, Lueg ve Pomp un incelemelerine göre, $-1 < s < 0$, $0 < F-S < 1$ eşitsizlikleri ile uyumludur. G nin $1,83$ den büyük değerleri için, $F-S$, D nin tüm değerleri için S in artmasıyla birlikte azalır. Şekil(104), $G=5$ için durumu göstermektedir. S in artı değerleri için azalma çok azdır. S in -1 e doğru yöneldiği durumlarda, ilerleme kuvveti $(1-2\log D)$ değerine yaklaşır, bu durum sürtünmesiz şartların gerektirdiği bir durumdur.



Şekil(104).İstampa kuvvetinin değişimi.
G=5 için. Ref(62)

İzotermal analizlerden sağlanan bazı tipik sonuçlar,şekil(105) de gösterilmiştir.Bu analiz ısı etkilerini de içerdiğinden, yağlayıcı viskozitesinin,hem basınç hem de ısı ile olan değişimi gözönüne alınmalıdır.Viskozite için yaklaşık bir bağıntı şöyle verilmiştir.

$$\eta = \eta_{\text{exp}} \frac{A_0 + A_1 p + A_2 \bar{\theta} + A_3 p \bar{\theta}}{A_4 + A_5 p + A_6 \bar{\theta} + A_7 p \bar{\theta}}$$

A_0, A_1 gibi parametrelerin değeri,orta derecedeki bir mineral yağ viskozitesine karşılıktır.Hesaplamalardan ve deneysel neticelerden çıkan diğer uygun fiziksel değerler ile birlikte, tablo(48) de gösterilmiştir.

TABLO(48).Hesaplama için veriler.

Yağlayıcının basınç viskozite katsayıları:

$$A_0 = 7,30. \quad A_1 = 0,0925 \text{ in}^2/\text{lbf.}$$

$$A_2 = -7,30$$

$$A_3 = -1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}.$$

$$A_4 = -0,79$$

$$A_5 = -0,86 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}.$$

$$A_6 = 1,44$$

$$A_7 = 0,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}.$$

Yağlayıcı maddenin özellikleri. (40°C)

$$\delta = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{N}.$$

$$\eta = 0,0102 \text{ kgf.s/m}^2.$$

$$k_b = 0,01 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h.C}.$$

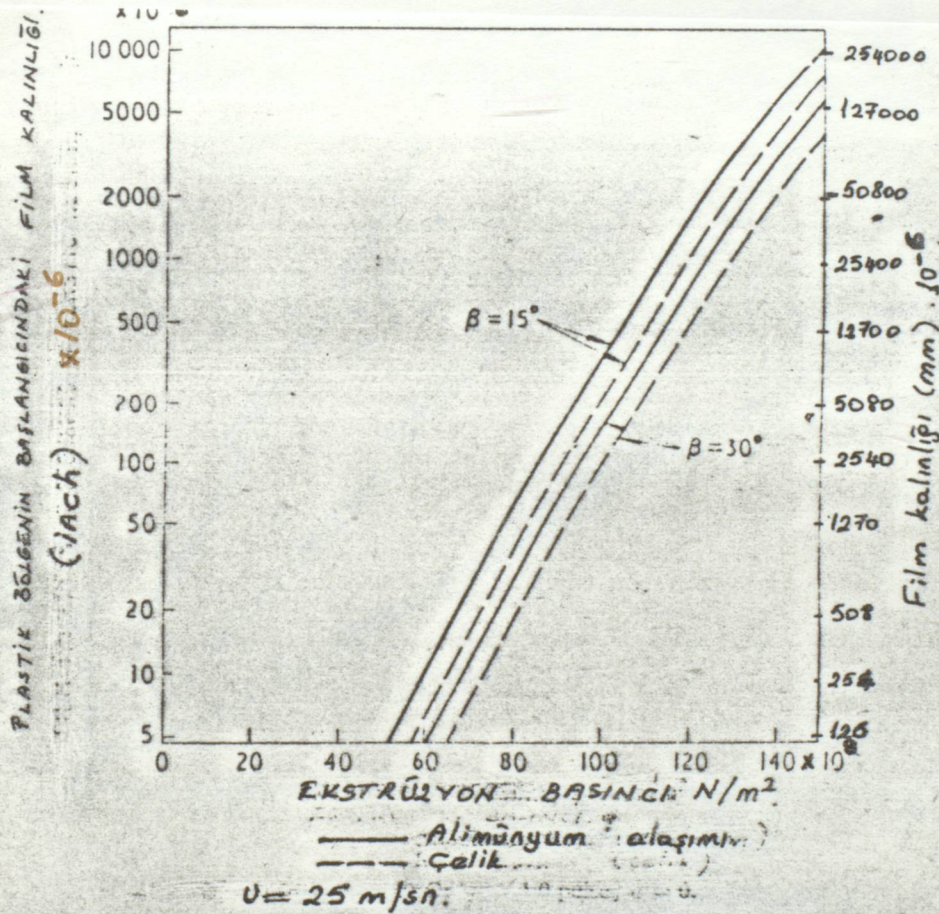
Kalıbın özellikleri.

$$k_d = 0,26 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h.C}.$$

$$E_d = 3 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2.$$

$$Z = 12 \text{ mm}.$$

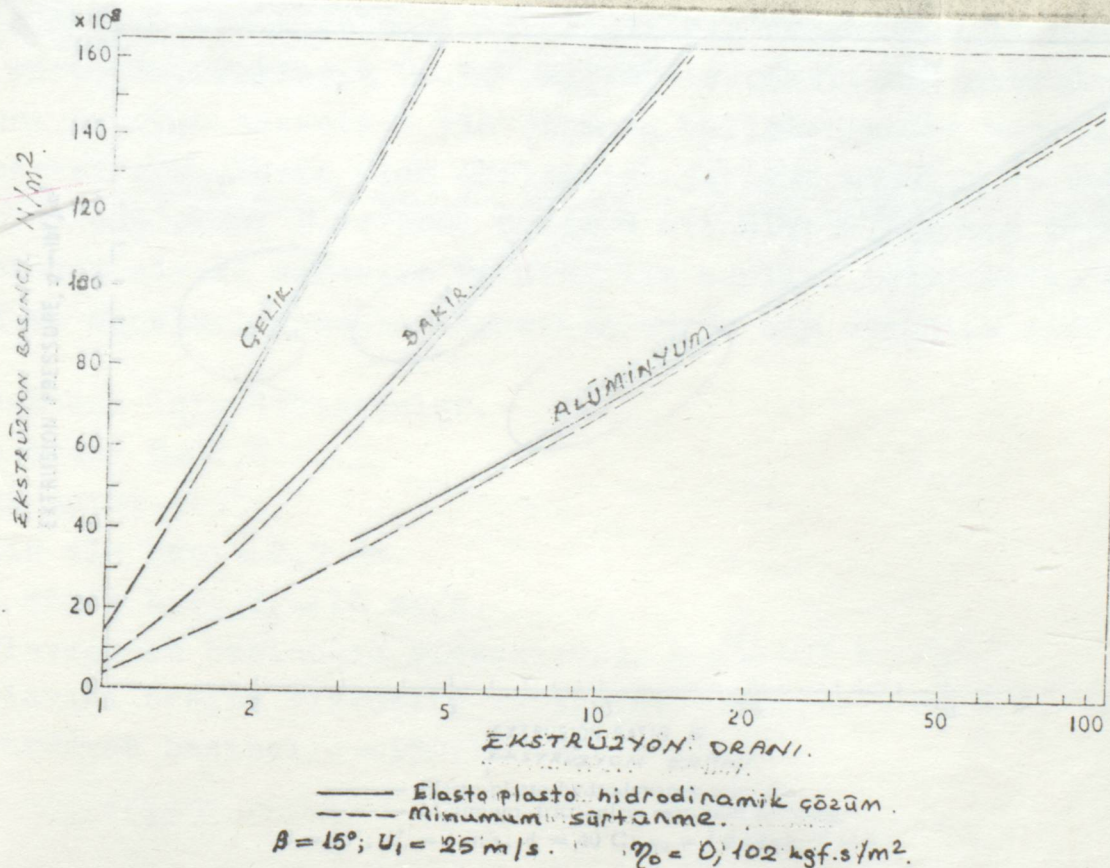
Malzemenin ilk çapı = 120mm.



Şekil(105).Film kalınlığının ekstrüzyon basıncı ile değişimi. Ref(59)

Şekil(105), plastik deformasyon bölgesinin başında tahmin edilen ekstrüzyon basıncının, film kalınlığı ile değişimini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, hidrodinamik etkinin meydana gelebilmesi için en etkili parametre olan film kalınlığının en düşük limiti, kalıp ve malzemenin yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak 10^{-6} in alınabilir. Şekilde bu değerden daha düşük film kalınlığına uyan ekstrüzyon basınçları verilmiştir.

Şekil(106), üç değişik malzeme için, ekstrüzyon basıncının, ekstrüzyon oranı ile nasıl değiştiğini göstermektedir, ayrıca şekil üzerinde sürtünmesiz durumu gösteren değerle karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Teoriye göre tahmin edilen ekstrüzyon basıncı ile, özellikle yüksek değerlerdeki redüksiyonlarda, sürtünmesiz değerler arasında yakın bir uyum olduğu görülür.



Şekil(106). Ekstrüzyon basıncının, çeşitli malzemeler için ekstrüzyon oranı ile değişimi. Ref(59)

Kalıp açısının, tahmin edilen ekstrüzyon değerleri ve film kalınlığı üzerindeki etkisi şekil(107) de verilmiştir. Düşük koni açılarında film kalınlığı, giriş bölgesindeki yüzeylerin düzgünlüğü nedeniyle artar. Küçük koni açılarında, artan hidrodinamik hareketin etkilerinden biri, sürtünmenin ekstrüzyon basıncı üzerine yaptığı, kalıbın deformasyon bölgesini uzatma eğilimini dengelemektedir. Şekil(107) nin ikinci kısmında, ekstrüzyon basıncının, boyutsuz istampa basıncı ile doğrusal değişimi görülmektedir. İncelemenin sonucuna göre, pozitif veya negatif artma yoluyla malzeme-ye uygulanan herhangi bir ek güç, ekstrüzyon basıncında, eşit bir azalma veya artışı yönlendirir.

7.10. Teorinin deneyle karşılaştırılması.

Elde edilen teorik sonuçlar, küçük şekil değiştirmeler için, malzemenin pekleşmediği kabulü ile deneysel değerlerle uygunluk içindedir. Sabrof ve Fiorentino⁵⁷ isimli araştırmacılar, ardışık sürekli tel çekme ve hidrostatik ekstrüzyon için, yağlayıcı olarak basınçlı kastor yağından yararlanmışlardır. Kullanılan malzeme SAE 1008 soğuk çekmeye elverişli bir çeliktir. Malzemenin akma gerilmesi yaklaşık $70 \cdot 10^6$ kgf/m² dir. Şekil(108), ekstrüzyon basıncı q , çekme kuvveti t nin önceden belirlenmesine yardımcı olur. Deneysel sonuçların elde edilmesine yarıyan uygulamada, değişken olarak çap oranı D ve koni açısı θ alınmıştır. Aşağıda verilen tablodan alınan değerler yardımı ile yapılan incelemelerde, teorik ve deneysel sonuçlar arasında büyük bir uygunluk görülür.⁵⁷

A noktası için değişkenler.

Çap oranı $D = 0,6$.

Koni açısı $= 15^\circ$.

Telin ilk çapı $= 2,7$ mm.

Tel giriş hızı $U_1 = 10$ mm/s.

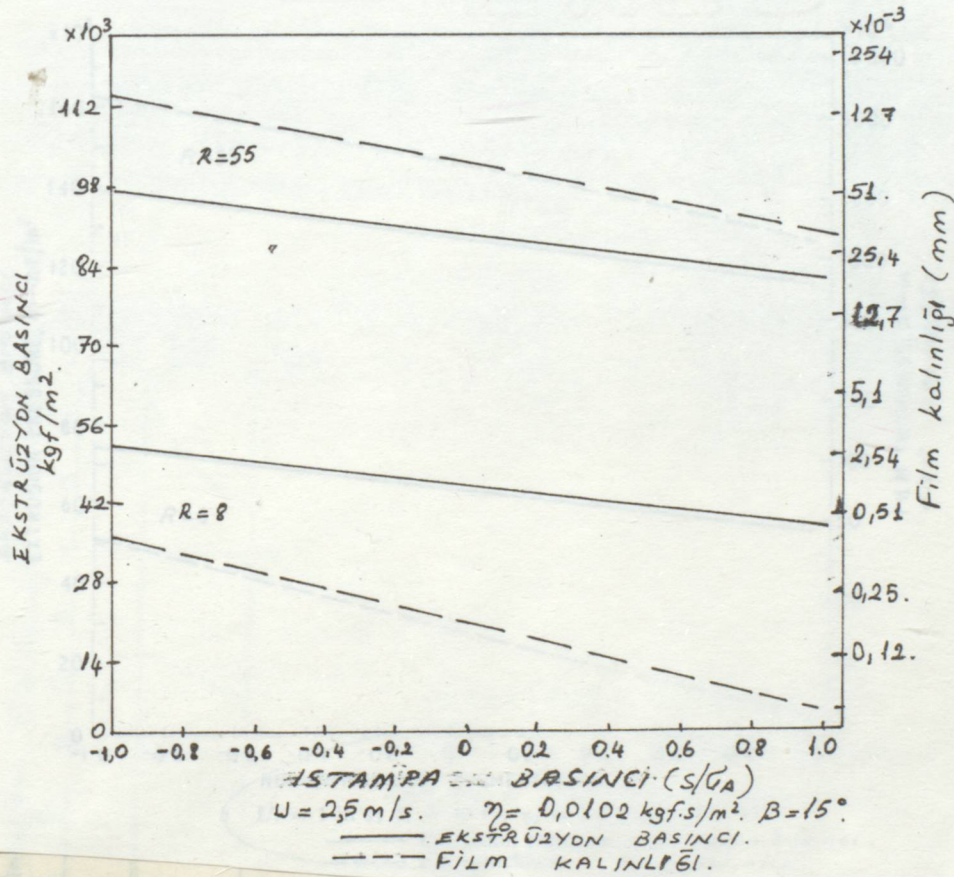
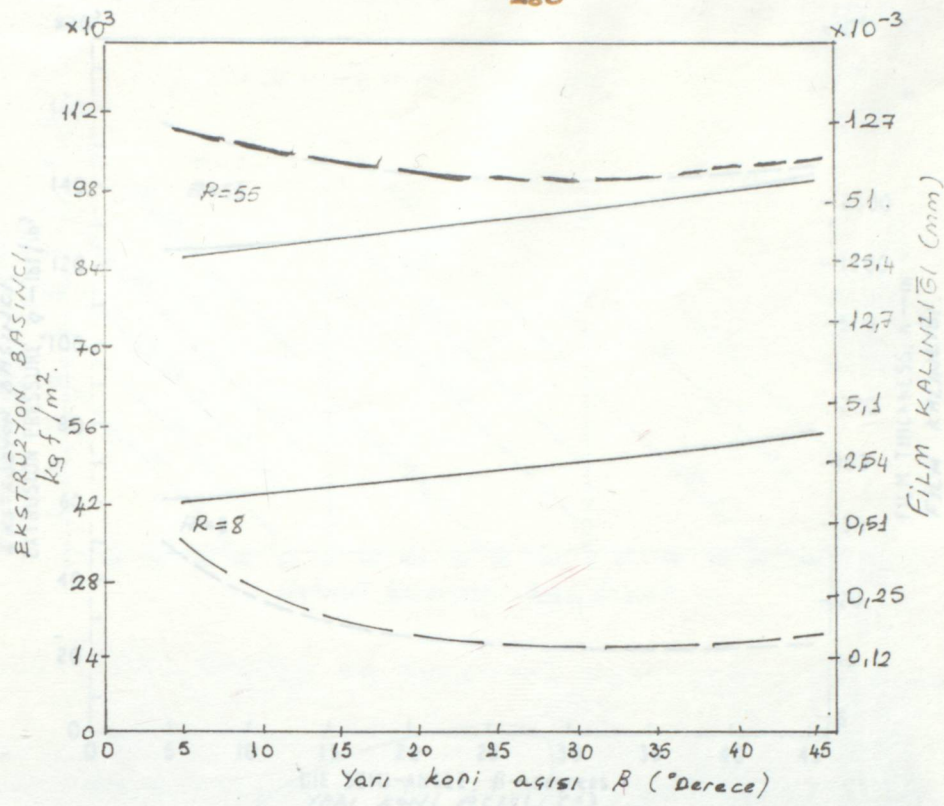
Yağlayıcının başlangıç viskozitesi. $\eta_0 \cdot e^{\theta} = 102$ kgf/m² .s.

Yağlayıcı basınç viskozite katsayısı $\gamma = 5 \cdot 10^{-8}$ m²/kgf.

Ekstrüzyon basıncı $q = 150 \cdot 10^6$ kgf/m².

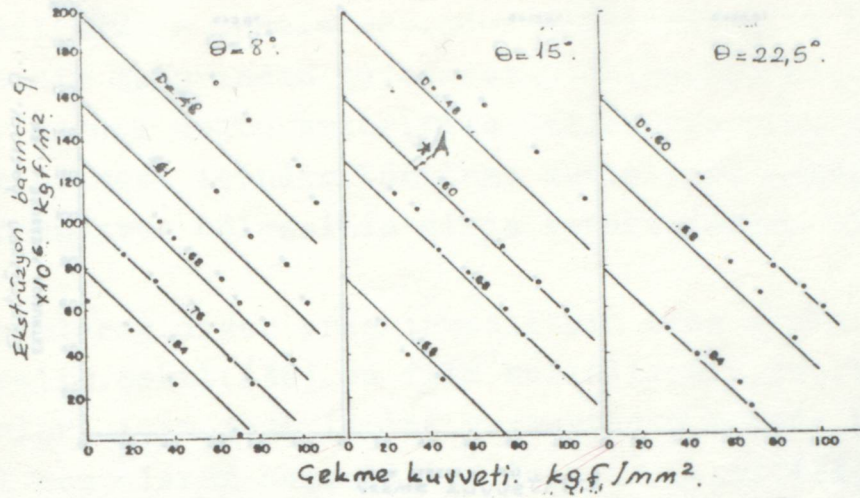
(107)

Ref (59)



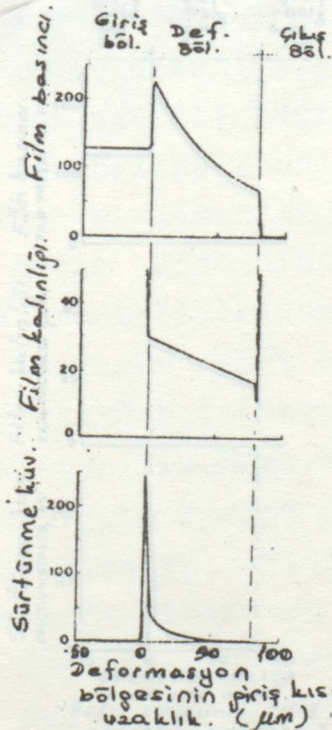
Sekil (107). Ekstrüzyon basıncı ve film kalınlığının, yarı matris açısı β ve istampa kuvvetiyle değişimi.
Ref-(59)

— Hidrodinamik teori. o Deneysel.



Şekil(128).Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Basınç, film kalınlığı ve sürtünme gerilmesi değerleri, şekil (108)deki A noktasına karşılıktır. İlk film kalınlığı $30\mu\text{m}$ dur. Yüksek basınçlar altında, yüksek viskoziteli yağlar kullanılması uygundur. Şekil(109) da, hesaplanan, basınç, film kalınlığı ve sürtünme gerilmesi değerleri, kalıptan çeşitli uzaklıktaki mesafeler için verilmektedir.

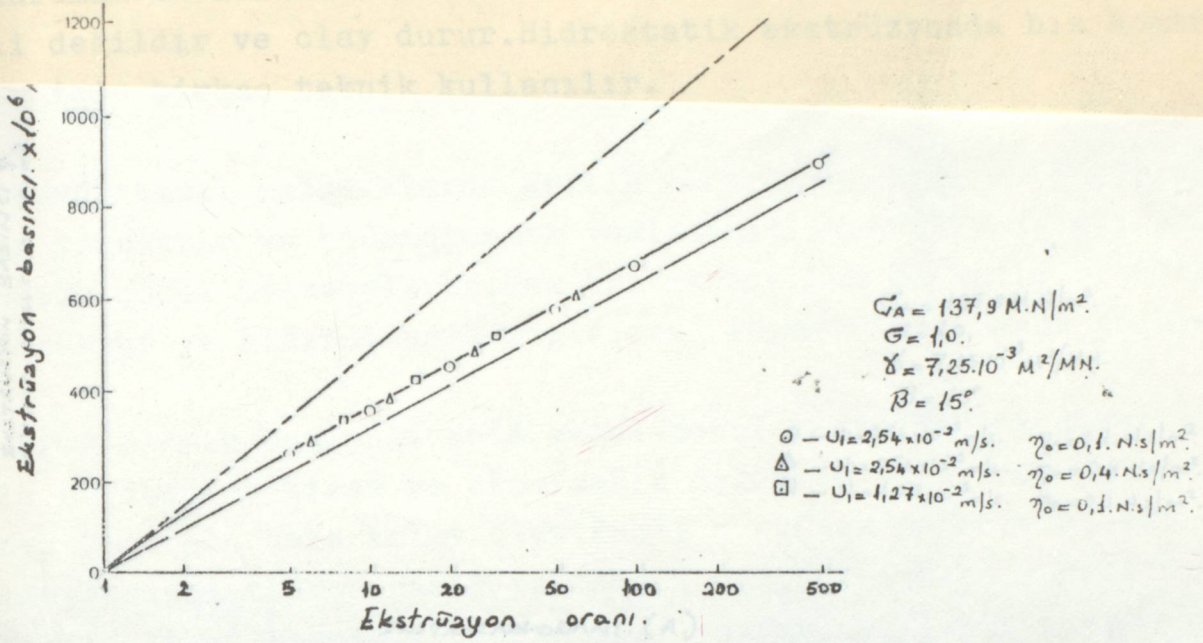


Şekil(109). Basınç, film kalınlığı ve sürtünme kuvvetinin değişimi. Ref(60)

Şekil(109)un incelenmesinden görüldüğü gibi basınç,giriş bölgesinin kenarından deformasyon bölgesine geçerken,maksimum bir değere doğru artar,film kalınlığının en yüksek değeri giriş bölgesi içindir.Sürtünme kuvvetinin maksimum değeri ise deformasyon bölgesinin giriş kenarındadır.

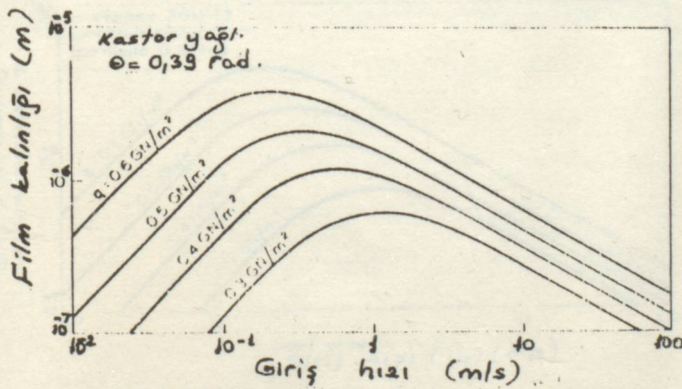
Son olarak diğer araştırmacıların elde ettiği bazı sonuçları görelim.Şekil(110) da film kalınlığının,çeşitli ekstrüzyon oranları için değerlerini vermektedir.Burada teorik ve deneysel sonuçlarda karşılaştırılmıştır.Şekil(111) de ise giriş hızı ile film kalınlığı arasındaki ilişki verilmektedir.Şekilde görüldüğü gibi hızın artması ile artış gösteren yağ filmi kalınlığı belli bir değerden sonra azalmaya başlamaktadır.Bu hız kritik hız olarak alınabilir,ayrıca şekilde değişik değerleri için de inceleme yapılmıştır.

Ekstrüzyon oranı yeterince yüksek olduğunda ve bir maksimum noktaya ulaşıldığında,hidrodinamik yağlama olayı meydana gelebilir.Malzeme çok hızlı hareket ettiğinden,basınç enerjisini sağlayan enerji kaynağı,yeterli basıncı sürdüremez.Eğer sistemde biriken enerji fazla ve malzeme de ona uygun olarak küçüke,şekil değiştirme hızı çok yüksektir.Eğer malzeme hacmi,depolanmış enerji ile karşılaştırıldığında fazla ise veya ekstrüzyon sınırlı hacimde bir alıcı odasında yapılmış ise,odanın yüksek basınçlı bölgesindeki hacim oranı,kaynak tarafından ek olarak sağlanandan daha fazladır,bunun sonucu ekstrüzyon basıncı düşer .Hidrodinamik yağlama sırasında,sürtünme direnci hız ile orantılıdır,düşük ekstrüzyon oranlarında,sürtünme direnci ve basıncın sabit bir akımı sürdürmeye yeterli olması gerekir. Eğer kaynak istenen enerjiyi sağlayabilirse ,sabit bir durum beklenebilir.Eğer sağlanan enerji yeterli değilse,ekstrüzyon oranı gibi basınç da düşer.Çeşitli sebeplerle (hız,basınç...) hidrodinamik yağlama olayı engellenirse,ış malzemesi ve kalıp arasında hiçbir yağ tabakası bulunmadığından,metal-metal teması izlenir.Bunun sonunda sürtünme direnci,hidrodinamik yağlama durumunda beklenenden çok daha yüksek bir değere çıkar.Bu



Şekil(110). Teorik sonuçların karşılaştırılması.

- Sürtünmesiz ideal durum. Ref(60).
- Wilson ve Walowit in teorisi.
- İzotermal teori.



Şekil(111). Film kalınlığının değişimi.
Ref(60)

durumda kaynaktan sağlanan basınç,ekstrüzyonu sürdürmeye yeterli değildir ve olay durur.Hidrostatik ekstrüzyonda hız kontrolu için birkaç teknik kullanılır.

-Büyük çaplı malzemelerde kritik ekstrüzyon hızı ve hacim oranı yüksektir ve hidrodinamik yağlamanın sürdürülmesi güçtür. Küçük çaplı malzemelerde,hem kritik hız hem de hacim oranları düşüktür ve hidrodinamik yağlamanın sürdürülmesi daha kolaydır.

-Eğer olayın başlangıcında,metal-metal teması düşük değerlerle sürdürülebilirse ve akım sabit değerine yeterince yakınsa hız kontrolu daha kolay olur.Fazla sürtünme nedeniyle,ekstrüzyon basıncı,hidrodinamik yağlamalı basınçtan daha yüksek olacaktır,fakat basınçlı olarak verilen yağ,sabit bir ekstrüzyon hızının sürdürülebilmesi için kafidir. ⁶⁰

-Malzemeyi kalıba yönelten yüksek basınçlı alıcı odasında,ekstrüzyon ilerledikçe basınç da artar,arka basınç nedeniyle basınç daha da artar.Alıcı odasına yerleştirilecek bir basınç valfi,odadaki basıncı belirler,aynı zamanda sıvının düşük hacim oranlarında dışarı kaçmasını sağlayarak ekstrüzyon oranı ve hızını kontrol imkanı sağlar. ⁵⁸

-Çok uzun malzemelerin veya telin ekstrüzyonunda,ekstrüzyon odasındaki basınç,istenen sabit durum basıncına yaklaştırılır,fakat bu değer biraz daha düşüktür.Ek enerji sabit hızdaki çekim başlığı ile sağlanır,böylece çekim başlığının hızı,ekstrüzyon hızını kontrol eder.Literatürde bu konu ile ilgili daha detaylı bilgive rastlanamamıştır.

8. Basma ile şekillendirmede hidrodinamik yağlama olayları.

8.1. Düzlem yüzeylerin basma ile şekillendirilmesinde hidrodinamik yağlama olayının izoviskoz modeller ile açıklanması.

Basma ile şekillendirme işleminde yağlama olayı büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüksek mukavemetli malzemelerin soğuk dövülmesinde, yağlama olayı en etkili parametrelerden biridir. Uygun bir yağlama durumu, beklenen kusurları azaltarak malzemenin yüzey kalitesini iyileştirir. Aynı zamanda, yağlayıcı tabakası aşırı basınç formasyonuna engel olarak ve yoğunluk hatalarını azaltarak, kalıp ömrünü de uzatır. Kalın bir hidrodinamik yağ filminin, basma işleminde oluşturulabileceğine dair oldukça fazla kanıt vardır.⁶⁹

Basma ile şekillendirmede yağlama, malzeme ve takım arasındaki sürtünmeyi azaltmak, böylece malzemenin çekmeye karşı göstereceği direnci düşürmek, kalıp ve iş parçası yüzeylerinin zaman-sız bozulmalarına engel olmak ve iş parçasının takımdan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla uygulanır. Burada sadece hidrodinamik filmin oluşturulması işlemi değil, aynı zamanda basma işlemi devam ederken, ardışık film incelmeleri konuları da analiz edilecektir.

8.1.1. Analiz edilmesi gereken işlemler.

Burada araştırılması gereken başlıca iki konu vardır. İlk durum iş parçasının kalıbın ötesine doğru genişlemesidir ki bu duruma bölgesel basma diyebiliriz. Bu analiz Watts ve Ford tarafından geliştirilmiştir.⁶⁹ İkinci durum ise, genel bir uygulama olan, geniş baskılı basma olayıdır. Her iki durumda da işlemin üç safhaya bölündüğü bulunmuştur.⁷⁰

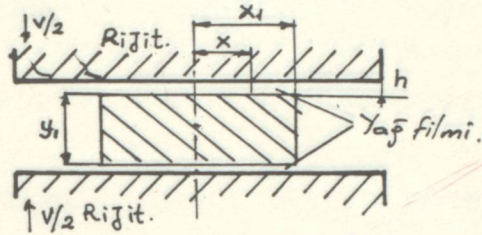
- 1- Yaklaşma safhası. (The approach phase)
- 2- Malzemenin çözülme, kavma safhası. (The yielding phase.)
- 3- Şekil değiştirme safhası. (The deformation phase.)

Şekil(142), geniş baskılar ile basmadaki üç safhayı, şekil(143) ise, bölgesel basma uygulamasındaki üç safhayı göstermektedir.

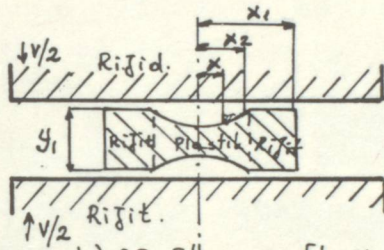
3.1.2. Analizde Kullanılan Kabuller.

Kalıplar rijittir ve paralel bir eksenli olarak birbirlerine yaklaşırlar.

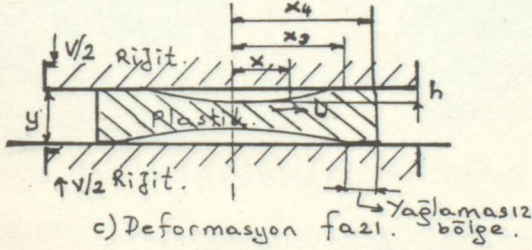
Bulaş parçaları rijittir ve paralel bir eksenli olarak birbirlerine yaklaşırlar.



a) Yaklaşma safhası.

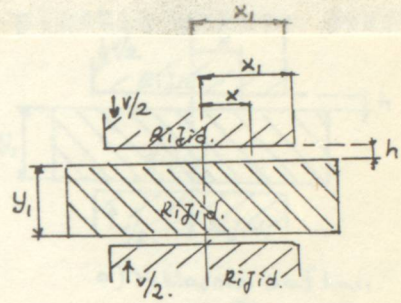


b) Gözülme safhası.

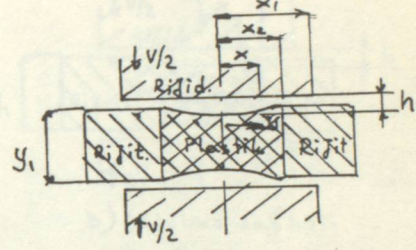


c) Deformasyon fazı. Yağlamasız bölge.

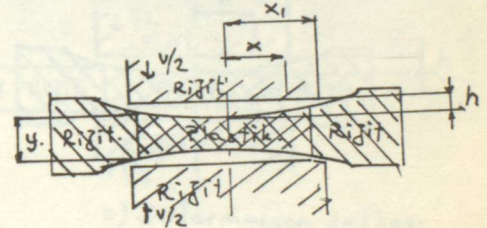
Sekil(112). Geniş baskılı basma. Ref(68)



a) Yaklaşma safhası.



b) Gözülme safhası.



c) Deformasyon safhası.

Sekil(113). Dar baskı ile basma. Ref(68)

8.1.2. Analizde kullanılan kabuller.

- 1-Kalıplar rijittir ve paralel bir şekilde sabit bir hızla birbirlerine yaklaşırlar.
- 2-İş parçasının malzemesi rijittir ve plastik olarak şekillendirilebilir. Malzemenin çözülmesi ve plastik olarak akması, Tresca veya Maxwell-Mises kanununa uyar. Şekil değiştirmeye karşı direnç, sabit bir akma gerilmesi ile karakterize edilebilir.
- 3-Deformasyon durumu, düzlem yüzeylerin homojen olarak basılması şeklinde ortaya çıkar.
- 4-Kullanılan yağlayıcı sabit viskoziteli ve Newtonien bir sıvıdır.
- 5-Yağlayıcı film kalınlığı h , iş parçasının kalınlığı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür.
- 6-Düzenli sıkıştırılamayan akım için Reynolds eşitliği kullanılabilir.
- 7-Plastik deformasyonun olduğu bölgelerde basınç gradyanı çok küçüktür, bu nedenle yağlayıcı akımı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir.
- 8-Yağlanmamış bölgelerde sürtünme gücü τ , akma gerilmesinin G_A bir fonksiyonudur.

8.1.3. YAKLAŞMA SAFHASI.

Sekil(112-a) ve sekil(113-a) yaklaşma safhasındaki iki durumu göstermektedir. Kalıp ve iş parçaları rijit olduğundan, yağlayıcı film kalınlığı pozisyona göre değişmez.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{V}{2}$$

Burada V kalıpların birbirine yaklaşma hızıdır, Reynolds eşitliği şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial h}{\partial t}$$

x ; iş parçasının merkezinden olan uzaklık, η ; yağlayıcı viskozitesi, p ; basınç, t ise zamandır. (Yağlayıcının mevcut olmadığı du-

rumda, iş parçası ile kalıbın temas edeceği andan itibaren ölçülen zamandır.)

$\partial h / \partial t$ yerine konursa ve integre edilirse,

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{6\eta \cdot V \cdot x}{h^3} + f_1.$$

f_1 ; zamanın t nin bir fonsiyonudur. Temas bölgesinin kenarında $x=0$ için $\partial p / \partial x = 0$ sınır şartından ve kalıp merkezindeki simetriden dolayı $f_1 = 0$, bu değerler yerine konursa.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \frac{6\eta \cdot V \cdot x}{h^3}.$$

$$p = - \frac{3\eta \cdot V \cdot x^2}{h^3} + f_2.$$

f_2 , zamana bağlı keyfi bir sabittir. Temas noktasının ucunda $x=x_1$ $p=0$ dir. Bu değerlerden yararlanılarak,

$$p = \frac{3\eta \cdot V (x_1^2 - x^2)}{h^3}.$$

bu eşitlikten, basınç dağılımının yaklaşma safhasında parabolik olduğu görülür. Basıncın maksimum olduğu yer, $x=0$ yani iş parçasının merkezidir ve şu formül ile verilir.

$$p_{\max} = \frac{3\eta \cdot V \cdot x_1^2}{h^3}.$$

Film kalınlığı azalırken, merkez basınç, düzlem yüzeyin akma gerilmesi σ_A ya ulaşınca kadar yükselir. Bu sıradaki film kalınlığı h_c şöyle verilebilir.⁶⁹

$$h_c = \left(\frac{3\eta \cdot V \cdot x_1^2}{\sigma_A} \right)^{1/3}.$$

8.1.4.ÇÖZÜLME SAFHASI.

Bu safhada çözülme olayı temas merkezinde başlar ve çabucak uçlara doğru yayılır. Bu bölüm için Reynolds eşitliği şöyle yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot h) + \frac{\partial h}{\partial t}$$

U is parçasının dışarı doğru hareket hızıdır. Şekil değiştirmeyen rijit bölgede, hız (U) ve film kalınlığı (h) pozisyona göre değişmez. $\partial h / \partial t$ oanınin değeri kullanılarak ve $x = x_2$ için $\partial p / \partial x = 0$, olduğu sınır şartından yararlanılarak şu bağıntı elde edilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{6 \cdot \eta \cdot V (x - x_2)}{h^3}$$

integre edilirse,

$$p = - \frac{3 \cdot \eta \cdot V (x - x_2)^2}{h^3} + f_3$$

Burada f_3 t zamanının bir fonksiyonudur. Temas noktasının uç kısmında, $x = x_1$ ve $p = 0$ sınır şartları kullanılarak f_3 değeri elde edilirse ve yerine konursa.

$$p = \frac{3 \eta \cdot V \cdot [(x_1 - x_2)^2 - (x - x_2)^2]}{h^3}$$

Eğer sabit bölgenin izotermal sınırlama etkisi ihmal edilirse sınır bölge ile rijit bölgeler arasında $x = x_2$, $p = C_A$, yani basıncın, malzemenin akma gerilmesine eşit olduğu düşünülürse, rijit bölge için film kalınlığı şöyle verilebilir.

$$h = \left[\frac{3 \cdot \eta \cdot V \cdot (x_1 - x_2)^2}{C_A} \right]^{1/3}$$

Plastik olarak şekil değiştiren bölge için U hızı yerine,

$$U = \frac{x \cdot V}{y_1}$$

değeri konursa, Reynolds eşitliği şu şekli alır.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{V}{2y_1} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (h \cdot x)$$

Bu eşitliğin sağındaki terim çok küçüktür bu nedenle , çok kısa süren çözülme safhasındaki , film kalınlığı değişimleri ihmal edilebilir. Böylece plastik şekil değiştiren bölgenin herhangi bir noktasındaki film kalınlığı, bu noktada çözülmenin başladığı andaki değerinde kalır. Bu sonuçtan yararlanılarak, plastik bölgedeki film kalınlığı şöyle verilebilir.

$$h = \left[\frac{3 \cdot \eta \cdot V (x_1 - x)^2}{G_A} \right]^{1/3}$$

boyutsuz parametrelerin kullanılması ile,

$$H = \frac{h}{h_c} = h \left(\frac{G_A}{3 \cdot \eta \cdot V \cdot x_1^2} \right)^{1/3}$$

$$X = \frac{x}{x_1}$$

Eşitlik şöyle düzenlenebilir.

$$H = (1 - X)^{2/3}$$

8.1.5.ŞEKİL DEĞİŞTİRME SAFHASI.

Önce iş parçasının kalıbın ötesine doğru genişlediği yani geniş baskılı basma olayını inceliyelim. Şekil(142-c). İş parça- kalıbın dış uçlarına çok yakındır, bu noktanın ötesinde iş parçası sabittir. Bu bölge için Reynolds eşitliği şöyle verilmiştir.

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2}{U} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{h}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = 0.$$

Karakteristik eğrilerden ve deneysel sonuçlardan elde edilen verilere göre,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{U}{2}$$

dir. Fiziksel olarak görülürki, yağlayıcı tabakası iş parçası hızının yarı hızıyla taşınır. Bu karakteristik özellik şöyle gösterilebilir.

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$$

Buradan görüldüğü gibi, yüzey hızı arttıkça film kalınlığı azalmaktadır. Yağ tabakasının sürekliliği için bu gereklidir. Plastik şekillendirme bölgesi için yüzey hızı şöyle verilebilir,

$$U = \frac{x \cdot V}{y}$$

y şekil deñistiren iř parçasının kalınlığıdır, şöyle verilebilir.

$$y = y_1 - V \cdot t.$$

$$R = \frac{V \cdot t}{y_1}.$$

dönüşümü yapılıp yerine konursa,

$$y = y_1 (1 - R).$$

y nin bu değeri U hızını veren bağıntıda yerine konursa,

$$U = \frac{X \cdot V}{y_1 (1 - R)}.$$

U nun elde edilen bu değeri dx/dt bağıntısında yerine konursa,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{X \cdot V}{2 y_1 (1 - R)}.$$

eşitlik boyutsuz formda düzenlenirse,

$$\frac{dx}{dR} = \frac{X}{2(1 - R)}.$$

integre edilirse,

$$X = C_1 (1 - R)^{-1/2}$$

C_1 değeri integrasyon sabitidir. Deformasyon bölgesinin başlangıcında, $R = 0$ için $X = X_0$ dır. C_1 değerini belirlemek için, sınır şartlarından yararlanılarak şu bağıntı verilebilir.

$$X_0 = X (1 - R)^{1/2}$$

Bu eşitliğin yardımı ile karakteristik bir orijin belirlenir.

İsaretlenen bu bölgenin geçilmesi ile deformasyon fazı başlamış olur. Bu verilerden yararlanılarak, film kalınlığının değişimini şöyle verebiliriz.

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{h \cdot V}{2(y_1 - V \cdot t)}$$

eşitlik boyutsuz formda düzenlenirse,

$$\frac{dH}{dR} = \frac{-H}{2(1 - R)}.$$

integre edilirse,

$$H = C_2 (1 - R)^{1/2}$$

C_2 değeri integral sabitidir, $R=0$ için $X=X_0$ ve $H=H_0$ sınır şartları kullanılarak belirlenir ve yerine konursa,

$$H = H_0(1-R)^{1/2}$$

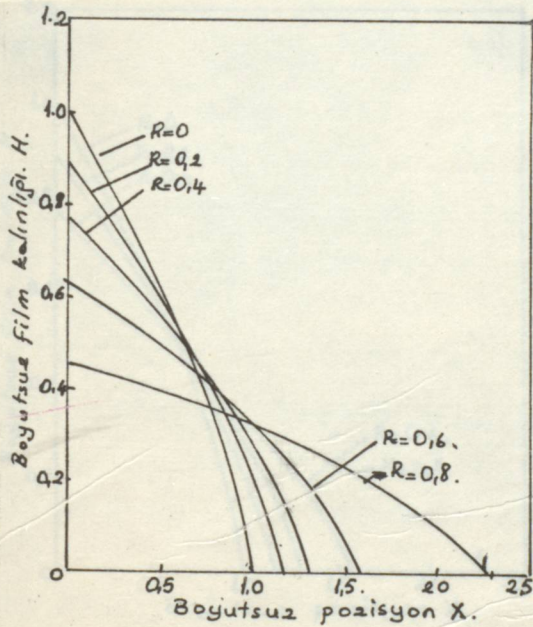
Deformasyon fazının başlangıcındaki şartlar, çözülme fazının sonundaki şartlarla aynı olduğundan,

$$H_0 = (1-X_0)^{2/3}$$

X_0 in değeri yerine konursa şu bağıntı elde edilir.

$$H = (1-R)^{1/2} \left[1 - X(1-R)^{1/2} \right]^{2/3}$$

Boyutsuz film kalınlığı H , deformasyon bölgesi boyunca, boyutsuz pozisyon X ve redüksiyon R in bir fonksiyonudur. Bu değişim şekil (114) de gösterilmiştir.



Şekil (114). Film kalınlığının, çeşitli redüksiyon (R) değerleri için X e bağlı değişimi. Ref (69)

Hoffman ve Sachs in metodu ile, deformasyon bölgesi için denge esitliği çıkarılabilir.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{2\tau}{y}$$

τ ; is parçası yüzeyinin kayma gerilmesidir.

$$P = \frac{P}{GA}, \quad F = \frac{\tau}{GA}, \quad A = \frac{x_1}{y_1}$$

dönüşümleri yapılırsa,

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{2 \cdot F \cdot A}{(1-R)}$$

Kayma gerilmesi τ , daha evvelden de bilindiği gibi,

$$\tau = \frac{\eta \cdot U}{h}$$

U hızı yerine değeri konursa, kayma gerilmesi τ şu şekli alır,

$$\tau = \frac{\eta^{2/3} \cdot V^{2/3} \cdot G_A^{1/3} \cdot x}{3^{1/3} \cdot x_1^{2/3} \cdot y_1 \cdot H(1-R)}$$

S, boyutsuz hız katsayısı ve F boyutsuz kayma gerilmesi katsayısı değişken dönüşümleri yapılarak, denge eşitliği şöyle yazılabilir.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{A^2 \cdot S^{2/3}}{(1-R)^{5/2}} \cdot \frac{2X}{[1-x(1-R)^{1/2}]^{2/3}}$$

integre edilirse,

$$P = \frac{-3A^2 \cdot S^{2/3}}{2(1-R)^{7/2}} \left[(1-x(1-R)^{1/2})^{4/3} - 4(1-x(1-R)^{1/2})^{1/3} \right] + f_4$$

f_4 , R değerinin bir fonksiyonudur. $x=1$ için, $p=G_A$ ve $P=1$ sınır şartları kullanılarak belirlenirse ve yerine konursa,

$$P = 1 - \frac{3A^2 \cdot S^{2/3}}{2(1-R)^{7/2}} \left[(1-x(1-R)^{1/2})^{4/3} - (1-(1-R)^{1/2})^{4/3} - 4(1-x(1-R)^{1/2})^{1/3} + 4(1-(1-R)^{1/2})^{1/3} \right]$$

Eşitlikten görüldüğü gibi boyutsuz basınç P, boyutsuz pozisyon X ve iş parçasının boyutları oranı A ile orantılıdır. Ayrıca, redüksiyon R ve hız parametresi S inde bir fonksiyonudur.

Boyutsuz kalıp basıncının ortalama değeri L şöyle hesaplanabilir.

$$L = \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{P}{G_A} dx = \int_0^1 P \cdot dX$$

P nin değeri yerine konursa,

$$L = 1 - \frac{3A^2 \cdot S^{2/3}}{2(1-R)^{7/2}} \int_0^1 \left[(1-X(1-R)^{1/2})^{4/3} - (1-(1-R)^{1/2})^{4/3} - 4(1-X(1-R)^{1/2})^{1/3} + 4(1-(1-R)^{1/2})^{1/3} \right] dX$$

integrali alınır,

$$L = 1 + \frac{3A^2 \cdot S^{2/3}}{14(1-R)^4} \left[3(1-(1-R)^{1/2})^{7/3} + 7((1-R)^{1/2} - 3)(1-(1-R)^{1/2})^{4/3} - 28(1-R)^{1/2} \cdot (1-(1-R)^{1/2})^{1/3} + 18 \right]$$

$$S = \frac{\eta \cdot V}{\sqrt{3} \cdot G_A \cdot x_1}$$

8.2. ANALİZDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.

Malzemelerin basma ile şekillendirilmesi esnasında uygulanan yağlayıcı miktarı istenilen film kalınlığını her zaman oluşturamaz. Yüzeylere normal yollarla uygulanan yağlayıcı, takımların ilk hareketi ile hareket hızının yarı hızıyla dışarı doğru hareket eder. Kalıp ile şekillendirilen malzeme arasında oluşan hidrodinamik filmin kalınlığı merkezde maksimumdur, kenarlara doğru sıfıra yaklaşan bir azalma gösterir. İşlem esnasında yağ filmi, iş parçası yüzey hızının yarı hızı ile dışarı doğru taşınır. İş parçası kalıp dışına uzandığı zaman yani bölgesel basma durumlarında, sistem yağlanmış kalır, sürtünme, çok geniş redüksiyonlara ulaşılan kadar çok düşüktür. Kalıp iş parçası dışına çıktığı zaman, yani geniş baskılarla basma durumunda, yağlayıcı film tabakası, iş parçası hareketinin neticesi bir miktar dışarı akar, böylece yağlanmamış bölge şekillenir. Yağlanmamış bölgedeki sürtünme, yağlanmış bölgenin yakınındaki sürtünmeden fazladır.

Yağlayıcı fazlası ilk hareket ile dışarı atıldıktan sonra, yağın sadece bir kısmı tutulmaktadır, bu miktar yağlayıcı viskozitesi, bağıl hız ve takım-iş parçası yüzey pürüzlülüğünü içeren hidrodinamik karakteristiklere bağlıdır. Yağlayıcı tabakanın tutulması iki şekilde meydana gelebilir. İlk şekil, düzlemsel bir yüzeyin basılmasındaki gibi makroskobik bir etki ile olur. Başlangıçta üniform bir dağılım gösteren yağlayıcı tabakası, deformasyonun ilk kademesinde üniform olmayan bir dağılım gösterir. Çünkü kenarlara yakın olan yağlayıcı kısmı, orta kısma nazaran dışarı daha kolay kaçabilir. Takım ile temas yüzeyi arasında ortada bir yağ havuzcuğu kalır. Yakalanan yağlayıcı tabakasının basıncı, genellikle şekillendirilen malzemenin akma gerilmesine eşittir. Buna bağlı olarak, merkez bölgedeki baskı kuvveti, yağlayıcının sıkışabilirliğine ve takımların yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Hatta plastik şekillendirme durumlarında makroskobik alanda oluşan bu etkinin, mikroskobik düzeyde de benzer şekilde meydana geldiği izlenmiştir.

Metallerin şekillendirilmesi esnasında meydana gelen sürtünme ve yağlama olaylarının incelenmesinden ortaya çıkan sonuçları kısaca şöyle özetliyebiliriz.^{70.71.}

1-Yüksek basınçların uygulanmasına rağmen, fiziksel olarak ayrılmış bulunan takım ve malzeme yüzeyleri arasında hidrodinamik yağlama oluşturulabilir. Ayrılma olayı, makroskobik temas alanının tümünü veya mikroskobik temas alanının bir kısmını kapsıyabilir. Yüzeyler arasında tutulan yağlayıcı miktarı önemlidir. Yüksek hızlar ve yüksek viskoziteli yağlayıcı kullanılması malzeme yüzeyinin daha pürüzlü çıkmasına sebep olur. Ayrıca çok fazla miktarda yağ tutulduğu durumlarda mamulün yüzey kalitesi bozulur.⁶⁹

2-Hiçbir yağ tabakasının görülmediği bölgelerde, metal-metal temasını önlemek amacıyla, iş parçası yüzeyi için yüksek basınca dayanıklı film teşekkül ettirilmelidir. Gerekli özellikleri temin için bu tabakanın katı olması önerilir. Bu özellikleri taşıyan yapılar, yağlama özelliğini oluşturan polar gruplar ile sınır arttırıcı maddeleri içerirler. Sınır arttırıcı olarak kullanılan en önemli madde sabundur.⁷⁰

3-Yağlanmış durumlar altında sürtünme olayı önemli rol oynar. Sürtünme kuvveti tutulan yağlayıcı tabakasını yırtmak için gerekli kuvvetten düşüktür. Fakat sürtünme kuvvetine yardımcı olan absorpsiyon kuvvetleri ve yağlamasız kenar temas yüzeylerinin takılma kuvvetleri vardır.

4-Absorbe edilen yağlayıcı filminin bölgesel yırtılması metal geçişine ve aşınmaya yol açar. Bu aşınmanın nedeni, parça ve takım yüzeyleri arasında meydana gelen karşılıklı etki ile, metalsel temas noktalarındaki sürtünme tepe parçacıklarının koparılaraq olaya istirak etmesidir.⁷⁴

5-Takım ve temas yüzeyleri arasındaki bağıl hız değişimleri çeşitli etkiler yaratır. Yüksek hızlar çok kez yağlamayı

daha güç bir hale getirirler.Çünkü yüksek hızlar sonucu oluşan yüksek sıcaklık bölgeleri,yağlayıcı film tabakasının yırtılmasını kolaylaştırır.Diğer taraftan yüksek hızlar,tutulan yağlayıcı miktarının artışıyla yağlama olayını iyileştirirler.

6-Yüksek şekillendirme sıcaklıkları,yağlamayı daha güç bir hale sokmaktadır.Çünkü yüzeydeki film tabakası ergiyebilmekte adsorbsiyon azalmakta ve bölgesel kaynak noktalarının (welding at points) artışı daha muhtemel hale gelmektedir.⁶⁹

7-Şekillendirilen malzemenin yüksek akma gerilmesi değerine ve büyük pekleşme özelliğine bağlı olarak ortaya çıkan yüksek temas basınçları yağlamayı daha güç bir hale getirebilmektedir.Bu olayın sebebi,tutulan yağlayıcı miktarının daha az olması veya daha fazla temas noktasına mücade edilen yağlayıcı tabakasının yüksek basınçlar nedeniyle,yağlama görevini yapamayışı olabilir.⁷⁰

8-Parçanın yüzey kalitesindeki değişimler çeşitli etkilere sebep olabilir.Pürüzlü yüzeyler,tutulan yağ miktarının daha fazla olmasını sağlar,bu olay yağlama olayına yardımcıdır.Aynı zamanda bölgesel temas noktalarında daha büyük deformasyonların oluşması engellenir.Yağlayıcı tabakasının yırtılma tehlikesi ve yüzeyin bozulma tehlikesi ortaya çıkar.Her durum için elde edilebilecek bir optimum yüzey pürüzlülüğü bulunabilir.Yağlama olayında etkili olan bölge yüzeysel temas bölgesidir.Bölgesel yırtılmalara pek rastlanılmayan pürüzsüz yüzeylerde pürüzlü yüzeylere nazaran daha iyi bir yağlama elde edilir.Düzgün yüzeylerde bölgesel basınç düşümlerine rastlanması yağlayıcı özelliklerini kısmen azaltır.⁷⁰

9-Sekillendirilen malzeme ile takım yüzeyleri arasında daima kalın bir yağlayıcı filmi bulunursa,mamulün yüzey kalitesinde düşmeler izlenebilir.Yağlayıcı birikintisine yakın temas bölgelerinde,metal-metal temasının meydana getirdiği bölgesel yağlayıcı yırtılması nedeniyle gözle görülebilecek matlıkta

bir yüzey elde edilebilir. Parlak bir yüzey elde etmek için, metal-metal temasını önleyebilen en ince yağ filmi oluşumu gerçekleştirilmelidir. ⁶⁹

Yağlama için kullanılacak maddelerde aşağıdaki genel özellikler aranır.

- 1-Yağlama maddesinin meydana getirdiği yağ filmi homojen olmalı ve yüksek basınçlarda yırtılarak kuru sürtünmeye neden olmamalıdır.
- 2-Yağlama maddesi malzeme yüzeyini iyi ıslatmalı(yapışmalı) ve bütün yüzeylere homojen olarak dağılmalıdır.
- 3-İş parçası üzerindeki yağ tabakası işlemden sonra kolaylıkla temizlenebilmelidir.
- 4-Yağlama maddesi takım ve malzeme yüzeylerinde kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar meydana getirmemelidir.
- 5-Yağlama maddesinin bileşimi kararlı olmalı ve sağlığa zararlı etkileri bulunmamalıdır.
- 6-Kullanılan işlem sıcaklığında yağlama özelliğini kaybetmemeli, zararlı etkileri bulunan duman ve gaz çıkarmamalıdır.
- 7-Sağlanması kolay ve ucuz olmalıdır.

9.SONUÇLAR.

Temel kavram ve analiz esasları,haddeleme,tel çekme,hidrostatik ekstrüzyon,basma ile şekillendirme konularında yapılan incelemelerin sonuçları,her bir bölüm için ayrı ayrı verilmişti.Özellikle tel çekme ve haddeleme konusundaki teorik ve pratik sonuçlar,detaylı olarak,zaman zaman grafikler yardımı ile tartışılmıştı.

Yapılan incelemelerden elde edilmiş bulunan sonuç ve görüşlerin bir özeti,konuların ele alınış sırası ile şöyle sunulabilir:

- 1-Sürtünme direnci,yüzey pürüzlülüklerinin karşılıklı direncine,küçük temas alanlarındaki metalik kaynama ve bunların tekrar koparılması için gereken dirence,atmosferdeki gazlar tesiriyle meydana gelen oksit tabakalarının direncine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.³
- 2-Sürtünme katsayısı metalsel kaynak bağı teşkil etmiş olan temas noktalarının kayma mukavemetine,tabakanın kopma mukavemetine ve bağlantıların kayma mukavemetine bağlıdır.Sıvı sürtünmesi olayında ise,yağ tabakasının molekülleri arasındaki kopma ve kayma mukavemeti önemlidir.⁴
- 3-Belirli bir yükün tesiri altında olan yağ tabakasında,hız arttıkça ve gereken yağ miktarı sağlandıkça sürtünme katsayısı küçülmekte ve belirli bir minumum değerden sonra tekrar büyümektedir.⁴
- 4-Madeni yüzeyler arasında bulunan yağ tabakasındaki basınç,dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığında yüzeyler birbirinden tamamen ayrılır ve sıvı sürtünmesi olayı ortaya çıkar.Basınç oluşumu hidrodinamik ve hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.Hidrodinamik sıvı sürtünmesinde,yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak,yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur.İstenen kinematik ve

geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır.³

5-Hidrostatik sıvı sürtünmesi halinde dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç bir pompa vasıtasıyla sağlanır.Yüzeyler birbirine göre izafi hareket yapsın veya yapmasın statik sıvı sürtünmesi sağlanabilir.²

6-Viskozite, herhangi bir akışkanın harekete karşı gösterdiği direnç veya diğer bir deyimle akma sırasında sıvı tabakalar arasındaki iç sürtünmeyi ifade eden bir özelliktir.Sıvılarda sıcaklığın artmasıyla azalmakta, gazlarda ise hafif bir yükselme göstermektedir.Önemli olan husus, sıvı yağların viskozitelerinin 30-70 C arasında büyük değişim göstermesidir. Sıvıların ve gazların viskoziteleri basınçla artmaktadır.¹⁶

7-Plastik şekillendirme olaylarının analizinde, metallerin plastik akışı, akışkanın viskoz akısına benzetilerek sonuca gidilir.Viskoz bir akışkanın en önemli özelliklerinden biri olan gerilme deviatörü gerinim hızı bağıntısı, metallerin plastiklik aralığı için akış karakteristiklerini belirleyen birçok bağıntı arasında basitleştirilmiş en önemli ifadedir.Plastik şekillendirme olaylarında, malzeme akışı çeşitli sürtünme rejimi kabulleriyle çözümlenmektedir.Yağlayıcının davranışını belirlemek için, laminar viskoz akış çözümlenmektedir.¹⁷

8-Yüzeyleri yağlanmış iki dönel silindiri gözönüne alırsak, 1 cm/s yeye kadar hızlar için , yağlanmış temas noktalarında aynı sürtünme katsayısı geçerlidir.100 cm/s lik daha yüksek hızlar için, sınır arttırıcı özelliği olmayan bir yağ kullanıldığında, ağırlık yağlamaya zarar vermeden veya çevre yağlanışının bir karakteristiği olarak hızdan bağımsız sürtünmeye doğru bir geçiş ile plastik deformasyona neden olabilecek kadar yüksek olabilir.¹³

9-Akışkan tabakasındaki basınç, akışkan tabakasının kalınlığına, akışkanın viskozitesine.akışkanın yoğunluğuna, akışkan ta-

bakası ve yoğunluğunun, yüzeylerin hareket yönüne göre değişmesine ve yüzeylerin birbirine göre izafi hızına bağlıdır.⁸

- 9-Sınır sürtünme olayı esnasında kayma gücü ve sürtünme kuvveti, yağlayıcı tabakanın viskoz direnç kuvvetleri ve yüzey temas noktaları arasındaki etkileşim güçlerine bağlı olarak ortaya çıkar.Sürtünme öyle bir olaydır ki,bireysel temas noktaları, yağlayıcı tabakası içindeki mikro boşluklar,hem sürekli bir olusum hem de kayboluş içindedir.Biri meydana gelirken diğeri- nin yokoluşu izlenebilir.Bu nedenle matematiksel eşitliklerde verilen değerler istatistiki ortalamalardır.⁸
- 10-Genişliği hareket doğrultusunda azalan yağ tabakaları yük taşıma özelliğine sahiptir.Yağ giriş yerlerine yapılan bir yuvarlatma sonucu,paralel kayma yüzeyleri de yük taşıyabilecek duruma gelir.Yağ giriş kenarları yuvarlatılmış veya eğik olarak yapılmış yağ filmlerinin yük kabiliyetleri,kalınlığı yük yüzeyinin sonuna kadar azalan filmlerin yük kabiliyetlerinden daha azdır.Buna karşılık birincinin sürtünme katsayısı ikincininkinden daha azdır.⁵
- 11-Teorik hesaplarda yağ viskozitesi için yapılan doğrusal değişgenlik kabulü 2,6 m/s lik hız değerlerine kadar uygundur.Daha yüksek kayma hızlarında bu kabul uygun sonuçlar vermez.²⁰
- 12-Hidrostatik yağlama sistemlerindeki sürtünme katsayısı,hidrokinamik yağlama sistemlerine nazaran daha küçüktür.Hidrostatik yağlamada yağ filmi kalınlığının artması,sürtünmeye bağlı güç sarfiyatını azaltmakta buna karşılık pompaya bağlı güç sarfiyatını arttırmaktadır.Minimum yağ tabakası kalınlığına karşılık gelen optimum güç sarfiyatı hesaplanmalıdır.²
- 13-Hidrokinamik yağlama esas olarak temas yüzeylerinin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olduğu için,sekillendirme esnasında,başlangıçdaki ve sondaki hızlar,hidrokinamik yağlamayı sağlamaya yeterli olmadığından bu kısımlardaki malzeme kalınlığı istenilenden kalın olacaktır.İnce bandların haddelenmesinde,hidrokinamik yağlamayı korumak daha kolay olmaktadır,hidrokinamik yağlamayı sağlamak için,yüksek haddeme hızları,büyük hadde çapları ve yüksek viskozite değerleri istenmektedir.³

- 14-Hidrodinamik yağlamanın başlaması ile, hadde kuvvetinin azalmasına yol açan sürtünmede, dikkate değer bir düşüm görülmektedir. Daha düşük hadde kuvveti dağılımı ile de, haddelerin ezilme ve eğilmeleri, hadde ayağının elastik deformasyonu küçülmede, dolayısıyla daha ince bandlar haddelenebilmektedir.¹⁸
- 15-Hade ile malzeme arasındaki yağ filmi kalınlığı elde edilen malzemenin yüzey kalitesini belirler. Yağlayıcı viskozitesi üzerindeki ısı etkileri, hidrodinamik filmin kalınlığı ve basınç dağılımı üzerinde önemli rol oynar. Hidrodinamik yağlama durumundaki basınç dağılımı, metalsel temasın verildiği durumlardan daha üniformdur.²⁴
- 16-Yapılan araştırmalarda hidrodinamik yağlama için gerekli limit hız konusunda bir bulguya rastlanmamıştır. Limit hız yerine, limit film kalınlığı hesaplamaları yapılmıştır. Kritik film kalınlığından hareketle elde edilen kritik hızın değeri 6,5 m/s dir. Pratikte rastlanılan film kalınlıkları ise: 10^{-7} - 10^{-8} m. mertebesinde dir.⁴³
- 17-Sıcak haddeleme olaylarında, kullanılan sentetik mum esaslı yağlayıcılar ve amino ester ihtiva eden yağlayıcılar, haddeleme esnasında metalin merdaneye yaptığı basıncı 1,2-2 defa azaltmakta, pasolardaki aşınma direncini de 1,4-2,5 defa arttırmaktadır. Alaşımlı çeliğin haddelenmesinde aşınma direncindeki artış, düşük karbonlu çeliğinkinden 1,8 defa fazladır.²⁶
- 18-Sıcak haddelemede katı yağlayıcıların kullanılmasında, deformasyon kuvvetinde %20-30 azalma, su ile yapılan haddelemede ise %13-14 lük bir azalma görülmektedir. Katı yağlayıcıların kullanılması halinde, maksimum redüksiyon miktarı 2-2,2 defa düşmektedir.²⁶
- 19-Hidrodinamik yağlama uygulamasının görüldüğü tel çekme proseslerinde, hidrodinamik etki sadece hıza ve viskoziteye bağlı değildir. Matrisin ön kısmında sağlanabilecek yüksek bir basınçla, düşük hızlarda ve düşük viskoziteli yağ kullanılarak hidrodinamik yağlama gerçekleştirilebilir.⁴⁴
- 20-Yağlayıcı viskozitesinin düşük değerlerinde, termal ve izotermal sonuçlar arasında bir uygunluk vardır. Yüksek viskozite değerleri için ise, izotermal ve termal sonuçlar arasındaki fark

artmaktadır.

21-Tel hızının artmasıyla,giriş bölgesi ile plastik şekil değiştiren bölge arasındaki yağ filmi kalınlığı bir maksimum değere yükselir.Uygulanacak daha yüksek bir hız bu değer düşmesine neden olur.Yağlayıcı viskozitesindeki artış film kalınlığını arttırır.

22-Hidrostatik ekstrüzyonda yağlama olayları,alıcı ile blok arasındaki sürtünme şartlarını,gerekli ekstrüzyon basıncı ve akış tarzını etkileyen olgulardır.Yağlamanın görevi sadece sürtünme değişkenini etkileyerek ekstrüzyon kuvvetini azaltmak olmayıp,ekonomikliği ve en iyi kaliteyi sağlayabilmek için bir dizi fonksiyonu yerine getirmektir.⁴⁶

23-İzotermal hidrodinamik yağlama teorisi kullanılarak tahmin edilen ıstampa basıncı,aynı malzeme,yağlayıcı ve redüksiyon için,normal ekstrüzyonda elde edilen basınçtan daha düşüktür.İstampa basıncındaki değişiklik,bovutsuz viskozite basınç katsayısı ve redüksiyonun küçük değerleri için daha da küçüktür.Bu parametrelerin artmasıyla değişiklik de artma gösterir.Genis redüksiyon oranlarında ve basınç katsayısının yüksek değerleri için,normal ekstrüzyondaki ıstampa basıncı,hidrostatik ekstrüzyondakinden,malzemenin akma gerilmesi kadar fazladır.⁵⁸

24-Ekstrüzyon basıncı,giriş bölgesinin kenarından,deformasyon bölgesi(matris) ne geçerken maksimum bir değere doğru artar.Film kalınlığının en yüksek değeri giriş bölgesi içindir.Sürtünme kuvvetinin maksimum değeri ise deformasyon bölgesinin giriş kenarındadır.^{60.}

25-Büyük çaplı malzemelerde kritik ekstrüzyon hızı ve hacim oranı yüksektir,hidrodinamik yağlama olayının sürdürülmesi güçtür,küçük çaplı malzemelerde hem kritik hız hem de hacim oranları düşüktür.Bu nedenle küçük çaplı malzemelerde,hidrodinamik yağlamanın oluşturulabilmesi ve sürdürülebilmesi daha kolaydır.⁶²

26-Basma ile şekillendirmede yağlama,malzeme ile takım arasındaki sürtünmeyi azaltmak böylece malzemenin çekmeye karşı direncini düşürmek,kalıp ve iş parçası yüzeylerinin zamansız bozulmalarına engel olmak ve iş parçasının takımdan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla uygulanır.⁶³

27-Malzemelerin basma ile şekillendirilmesi esnasında uygulanan yağlayıcı miktarı istenilen film kalınlığını her zaman oluşturamaz. Yüzeylere normal yollarla uygulanan yağlayıcı, takımların ilk hareketi ile, hareket hızının yarı hızıyla dışarı doğru hareket eder. Malzeme ile kalıp arasında oluşan hidrodinamik filmin kalınlığı merkezde maksimumdur, kenarlara doğru sifıra yaklaşan bir azalma gösterir. ⁶⁹

28-Takım ve temas yüzeyleri arasındaki bağıl hız değişimleri çeşitli etkiler yaratır. Yüksek hızlar çoğu kez yağlamayı daha güç hale getirirler. Çünkü yüksek hızlar sonucu oluşan yüksek sıcaklık bölgeleri, yağlayıcı film tabakasının yırtılmasını kolaylaştırır. Diğer taraftan, şekillendirilen malzemenin yüksek akma gerilmesi değerine ve büyük pekleşme özelliğine bağlı olarak ortaya çıkan yüksek temas basınçları, yağlamayı daha güç bir hale getirebilmektedir. Bölgesel yırtılmalara rastlanılmayan pürüzsüz yüzeylerde, pürüzlü yüzeylere nazaran daha iyi bir yağlama elde edilebilir. ⁷¹

proporsten = $G_2 (G_3/G_4)$.

8.- Kalıp sıcaklığı çevre sıcaklığına döndüğü zaman merkezden ölçülen mesafe. (mm)

T_1, T_m - Bölgesel ve ortalama yağlayıcı sıcaklığı. (°C)

t_1 - Girişteki tel çapı. (mm)

t_2 - Bölgesel tel çapı. (mm)

U - Telin giriş bölgesindeki hızı. (m/s)

U_m - Telin bölgesel hızı. (m/s)

$\mu_r = \frac{1}{2}$ - Tel yüzeyinin elastik deformasyonu.

γ - Sabit. $\left[= \left(\frac{4\pi}{h} \right) \ln \left(\frac{r_0}{R} \right) \right]$

γ - Sabit. $\left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{U}{h} \right)^2 \left(\frac{1}{E} \right) \right]$

β - Girişteki yarı koni açısı, kalıp açısının yarısı. (Derece)

β - Bessel fonksiyonunun ardumanı.

θ - Boyutaus sıcaklık.

θ_1 - Bölgesel kalıp yüzey sıcaklığı. (°C)

ν - Poisson oranı. (≈ 0.3)

.KULLANILAN SEMBOLLER. 6.bölüme ait.

$A, B, C, \left. \begin{matrix} D, E, F, \end{matrix} \right\}$ İntegrasyon sabitleri.

A_0, A_n = Viskozitenin hesaplanmasında kullanılan sabit sayılar.

a = Elastik şekil değiştirmiş tel yarıçapı. (mm)

C_1, C_w = Tel ve yağlayıcının spesifik ısısı. (kcal/kg°C)

c = Basınç bloğu genişliğinin tel yarıçapına oranı.

G = Kayma modülü.

h = Lokal film kalınlığı. (mm)

h_{m1} = 1. ve 2. bölgelerin sınırındaki film kalınlığı. (mm)

J = Isının mekaniksel eşdeğeri.

k_1, k_d = Yağlayıcının ve malzemenin ısı iletim katsayısı. (kcal/m²°C)

p = Bölgesel yağ basıncı. (kg/m²)

propbten = $G_A (G_b / G_A)$.

R = Kalıp sıcaklığı çevre sıcaklığına döndüğü zaman merkezden ölçülen mesafe. (mm)

T_1, T_m = Bölgesel ve ortalama yağlayıcı sıcaklığı. (°C)

t_1 = Girişteki tel çapı. (mm)

t_n = Bölgesel tel çapı. (mm)

U = Telin giriş bölgesindeki hızı. (m/s)

U_n = Telin bölgesel hızı. (m/s)

$u_{r=a}$ = Tel yüzeyinin elastik deformasyonu.

W = Sabit. $[= (k_d / k_l) \cdot \ln (r_0 / R)]$.

Y = Sabit. $[= ((\eta / 2) (U / h)^2 (1 / k_l J))]$

β = Girişteki yarı koni açısı, kalıp açısının yarısı. (Derece)

β_j = Bessel fonksiyonunun argümanı.

$\bar{\theta}$ = Boyutsuz sıcaklık.

$\bar{\theta}_d$ = Bölgesel kalıp yüzey sıcaklığı. (°C)

ν = Poisson oranı. ($\sim 0,3$)

.KULLANILAN SEMBOLLER. 7.bölüme ait.

$B = \frac{\gamma P}{\sigma_A}$ = Boyutsuz parametre.

$D = x_2/x_1$ = Çap oranı.

$F = Q - R + S + T$ = Boyutsuz ilerleme kuvveti.

$G = \gamma \cdot \sigma_A$ = Boyutsuz basınç viskozite katsayısı.

$P = p/\sigma_A$ = Boyutsuz sıvı basıncı.

$Q = q/\sigma_A$ = Boyutsuz ekstrüzyon basıncı.

$R = r/\sigma_A$ = Boyutsuz arka germe basıncı.

$S = s/\sigma_A$ = Boyutsuz istampa kuvveti.

$T = t/\sigma_A$ = Boyutsuz çekme kuvveti.

U = İş parçası malzemesinin hızı.

U_1 = Deformasyon bölgesinin girişindeki malzeme hızı. (m/s)

U_2 = Deformasyon bölgesinin çıkış kenarındaki malzeme hızı. (m/s)

$X = x/x_1$ = Boyutsuz pozisyon.

h_1 = Deformasyon bölgesinin girişindeki film kalınlığı. (mm)

h_2 = Deformasyon bölgesinin çıkışındaki film kalınlığı. (mm)

h_3 = Çıkış bölgesinin sonundaki film kalınlığı. (mm)

q = Ekstrüzyon basıncı. (kg/cm²)

r = Arka basınç. (kg/cm²)

s = İstampa kuvveti. (kg/cm²)

t = Çekme kuvveti. (kg/cm²)

γ = Basınç viskozite katsayısı. (m²/N)

Θ = Kalıp yarı açısı. (derece)

p = Sıvı basıncı. (kg/m²)

η = Yağlayıcı viskozitesi. (kgf.s/m²)

η_0 = Atmosfer basıncındaki viskozite. (kgf.s/m²)

σ_A = Malzemenin akma gerilmesi. (kg/cm²)

KULLANILAN SEMBOLLER. 8.bölüme ait.

$A = x_1/y_1 = \text{En/boy oranı.}$

$C_1, C_2 \dots vb = \text{İntegrasyon sabitleri.}$

$F = \tau/\zeta_A = \text{Boyutsuz sürtünme gücü.}$

$H = h/h_c = \text{Boyutsuz yağlayıcı film kalınlığı.}$

$H_0 = \text{Orijin olarak seçilen bir noktadaki karakteristik boyutsuz film kalınlığı.}$

$L = \text{Boyutsuz kalıp basıncının ortalama değeri.}$

$P = p/\zeta_A = \text{Boyutsuz kalıp basıncı.}$

$P_3 = p_3/\zeta_A = \text{Yağlanmış bölgenin ucundaki boyutsuz kalıp basıncı.}$

$R = V \cdot t/y_1 = \text{Azalma (redüksiyon).}$

$S = \eta V/\sqrt{3} \zeta_A x_1 = \text{Boyutsuz hız katsayısı.}$

$U = \text{İş parçasının yüzey hızı. (m/s)}$

$V = \text{Kalıpların yaklaşma hızı. (m/s)}$

$W = X_4 - X_3 = \text{Yağlanmamış bölgenin boyutsuz genişliği.}$

$X = x/x_1 = \text{Temas noktasından alınan boyutsuz uzaklık.}$

$X_0 = \text{Orijin olarak seçilen bir noktadan olan boyutsuz uzaklık.}$

$X_3 = x_3/x_1 = \text{Yağlanmış bölgenin ucuna kadar olan boyutsuz uzaklık.}$

$X_4 = x_4/x_1 = \text{İş parçasının ucuna kadar olan boyutsuz uzaklık.}$

$f_1, f_2 = t \text{ ve } R \text{ in fonksiyonu olan bir değişken katsayı.}$

$h = \text{Yağlayıcı film kalınlığı. (mm)}$

$h_c = \text{Temas anında, temas noktasının merkezindeki film kalınlığı. (mm)}$

$k = \tau/\zeta_A = \text{Yağlanmamış bölgedeki sürtünme parametresi.}$

$p = \text{Kalıp basıncı. (kg/cm}^2\text{)}$

$p_3 = \text{Yağlanmış bölgenin ucundaki kalıp basıncı. (kg/cm}^2\text{)}$

$t = \text{Yağlayıcının mevcut olmadığı durumda, iş parçası ve kalıbın temas edeceği andan itibaren ölçülen zaman. (s)}$

x = Temas merkezinden olan uzaklık. (mm)

x_1 = Temasin ucuna olan uzaklık. (mm)

x_2 = Plastik bölgenin ucuna olan uzaklık. (mm)

x_3 = Yağlanmış bölgenin ucuna olan uzaklık. (mm)

x_4 = İş parçasının ucuna olan uzaklık. (mm)

y = İş parçasının kalınlığı. (mm)

y_1 = İş parçasının başlangıçtaki kalınlığı. (mm)

η = Yağlayıcı viskozitesi. (kg f. s/m^2)

σ_A = İş parçası malzemesinin akma gerilmesi. (kgf/cm^2)

τ = Kayma gerilmesi. (kgf/cm^2)

7-ÖZDAY, S. Makina Elemanları, Cilt-2, İTÜ. yayını, 1963.

8-HERSEY, Mayo, Dyer, Theory and Research in Lubrication Foundations for Future Developments, American Society of Mechanical Engineers, 1966, Boğaziçi Ün. kütüphanesi.

9-DOWSON, D. HIGGINSON, G. R. The Fundamentals of Roller Gear Lubrication, Elasto-Hydrodynamic Lubrication, Robert College Library, 1968.

10-FULLER, D. D. Theory and Practice of Lubrication for Engineers New-York, Wiley, 1968.

11-PINKUS, O. STERNLICHT, B. Theory of Hydrodynamic Lubrication, New-York, Mc.Graw-Hill, 1961.

12-ROBERTSON, J. M. Hydrodynamic in Theory and Application, Paternice-Hall, New-Jersey, 1965.

13-BRAITHWAITE, Eric, R. Lubrication and Lubricants, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London, 1967.

14-COWLING, T. G. Magnetohidrodinamik, Türkçeye çeviren, M. Emin Erdoğan, İTÜ, Matbaası, 1976.

15-KRAGELSKII, I. V. Friction and Wear, Translated from the Russian by, LEO, FONSEN, London, 1965.

16-YAKETLAR ve YAKLAR, Petrol Ofisi yayınları, Aralık-1980.

REFERANSLAR:

- 1-AKKURT.M.Makina elemanları.Cilt-2.İ.T.Ü. Yayını.1980.
- 2-AKKURT.M.:Hidrostatik yağlama sistemlerinin genel denklemleri.Doçentlik Tezi.İstanbul.1972.
- 3-BOSCH.M.Berechnung der Mashinenelemente.Makina Elemanları Hesabı.Türkçeye çeviren.İLERİ.H.İ.T.Ü.Yayını.1972.
- 4-ULUKAN.L.Yağlama Tekniği.İ.T.Ü. yayınları(teksir).1970.
- 5-BATCHELOR.G.K. Akışkanlar Mekaniği.Cilt-1,2,3. Çeviren Mehmet Emin Erdoğan.İ.T.Ü. yayını.1980.
- 6-Prof.Dr.ŞUHUBİ.E.Akışkanlar Mekaniği ders notları.İTÜ yayını Teksir.1978.
- 7-OKDAY.Ş.Makina Elemanları.Cilt-2.İTÜ. yayını.1963.
- 8-HERSEY.Mayo.Dyer.Theory and Research in Lubrication Foundations for Future Developments.American Society of Mechanical Engineers.1966.Boğaziçi Ün. kütüphanesi.
- 9-DOWSON.D.HIGGINSON.G.R.The Fundamentals of Roller Gear Lubrication.Elasto-Hydrodynamic Lubrication.Robert College Library.1968.
- 10-FULLER.D.D.Theory and Practice of Lubrication for Engineers New-York.Wiley.1968.
- 11-PINKUS.O.STERNLICHT.B.Theory of Hydrodynamic Lubrication. New-York.Mc.Graw-Hill.1961.
- 12-ROBERTSON.J.M.Hydrodynamic in Theory and Application.Paren-tice-Hall.New-Jersey.1965.
- 13-BRAITHWAITE.Eric.R.Lubrication and Lubricants.Elsevier Publishing Company.Amsterdam-London.1967.
- 14-COWLING.T.G.Magnetohidrodinamik.Türkçeye çeviren.M.Emin Erdoğan.İTÜ.Matbaası.1976.
- 15-KRAGELSKIİ.I.V.Friction and Wear.Translated from the Russian by.LEO.RONSON.London-1965.
- 16-YAKITLAR ve YAĞLAR,Petrol Ofisi yayınları.Aralık-1980.

- 17-YURCI.M.EMİN."Sac band haddelenmesinde güç ve basınç analizleri,bunları etkileyen faktörler,uygulamalara ilişkin yaklaşımlar".Doçentlik tezi.İstanbul.Şubat.1979.
- 18-AVITZUR.B."Metal forming processes and analysis"Mc.Graw-Hill Book Company.New-York.1968.
- 19-WUSATOWSKI.Z."Fundamentals of rolling."Pergaman Prew Ltd. London.1969.
- 20-Lubrication in Metalworking.T.G.Byrer.ASME Publication No-74 New-York.1974.
- 21-"A Hydrodynamic lubrication theory for strip rolling including thermall effects."T.A.DOW.J.W.KANNEL.andS.S.BUPARA.ASME publication.No-74.New-York.1974.
- 22-Tribology of hot rolling steel strip in consideration of the analysis of cold rolling through hydrodynamic conditions.Jiro Ichinio.Giichi Tomizawa.Proceedings of the JSLE-ASLE.International Lubrication Conference.1976.
- 23-"Modern developments in lubrication mechanics."J.A.Walowit and J.N.Anno.1975.
- 24-"Determination of lubrication mechanism by means of surface qualification of cold rolled sheet."A.Azushima.J.Kihara.and M.Miyagawa.International conference on steel rolling.Tokyo-Japan.1980.
- 25-"A Mixed lubrication model for cold rolling of metals."Y.H. Tsao and L.B.Sargent.Jr.ASLE.Preprint No-75-LC.1975.
- 26-"Hot rolling of steel with solid industrial lubricant."T.F. Vlasov.K.A.Malakutsko and Y.F.Gribach.1974.
- 27-"Rolling practice."K.Burtsev.Trans By.N.Perlov.Moscow.Mir Publishers.1973.
- 28-Cheng.M.S."Plastohydrodynamic lubrication in friction and lubrication in metal processing."ASME.New-York.1966.pp.69-89.
- 29-Bedi.D.S.and Hillier.M.J."Hydrodynamic model for cold strip rolling."Proc.I.Mech.E.Vol-182.Part-1.1968.pp.158-162.
- 30-Evans.W.Avitzur.B."Measurement of friction in drawing,extrusion and rolling."Transactions of the ASME.January 1968.

44-Hillier,M.J."A hydrodynamic lubrication in wire drawing
J. Production.Res.Vol.5.pp.171-176.

- 31-Atkins.A.G."Hydrodynamic lubrication in cold rolling."Int.J. Mech.Pergamon Press.1974.Vol-16.pp.1-19.
- 32-Avitzur.B.and Groosman.G."Hydrodynamic lubrication in the rolling thin strips."Journal of engineering for industry.TRANS ASME.Series B.Vol.94-1972.pp.317-328.
- 33-Wilson.W.R.D.and Walowit.J.A."An isothermal hydrodynamic lubrication theory for strip rolling with front and back tension."In tribology convention.1971.pp.169-172.
- 34-Dow.T.A.Kannel.J.W.and Bupara.S.S."A hydrodynamic lubrication theory for strip rolling including thermal effects."Journal of lubrication technology.Trans.ASME.Seri-F.Vol.95.1973.
- 35-Wilson.W.R.D."The film thickness variation in the work zone of hydrodynamically lubricated continuous deformation processes."Journal of lubrication technology.Trans.ASME.Seri-F.pp.541-543.
- 36-Mahdavian.S.M.and Walowit.J.A."A Simplified analysis for tractions between rolling sliding elastohydrodynamic contacts."Journal of lubrication technology.ASME.Vol-93.1971.pp.39-46.
- 37-Mahdavian.S.M.and Wilson.W.R.D."Lubricant flow in a Plasto-hydrodynamic work zone."Journal of lubrication technology.ASME.Seri-F.Jan.1976.
- 38-Kondo.S."An improvement of rolling stability during cold rolling of aluminum."Journal of lubrication technology.ASME.Vol-97.1975.pp.37-43.
- 39-NASAS gezilerinden elde edilen bilgiler ve gözlemler.
- 40-Ereğli Demir Çelik İşletmeleri gezisinden elde edilen bilgiler ve gözlemler.
- 41-METALSAN firmasından elde edilen bilgiler,deneysel ve gözlemsel veriler.
- 42-Rodkiewicz.C.M.and Srinivasan.V."Elastohydrodynamic lubrication in rolling and sliding contacts."Transaction of the ASME.October-1973.
- 43-Tattersal.G.H."Theory of hydrodynamic lubrication in wire drawing."Brit.Iron Steel.Res.Assn.Rept.MW/D/46-59.
- 44-Hillier.M.J."A Hydrodynamic lubrication in wire drawing."Intern J.Production.Res.Vol.5.pp.171-176.

- 45-Lancaster.P.R.A."Review of hydrodynamic lubrication in wire drawing."Wire Ind..July.1976.
- 46-Dowson.D.Parsons.B.Lidgitt.P.J."An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysis of the wire-drawing process."Inst.Mech. Eng.Elastohydrodynamic lubrication 1972 Symposium.Leeds.April 1972-1973.
- 47-Orlov.S.I.Kolmogorov.V.L."Integrated development and introduction of new high-speed mills and hydrodynamic lubrication systems for drawing wire."Stal.1974.(10).953-956.
- 48-Nedovizii.I.N.Chistota.V.D."Drawing of steel wire in hydrodynamic liquid lubricant."Stal.October.1974.
- 49-Zhilkin.V.Z.and Latokhin.A.D."Effect of drawing speed and the die angle on the hydrodynamic effect when wire is drawn."Stal October.1974.958-960.
- 50-Wilson.W.R.D.and Walowit.J.A."An isothermal hydrodynamic lubrication theory for hydrostatic extrusion and drawing processes with conical dies."Journal of lubrication technology. January-1971.
- 51-Middlemiss.A."Hydrodynamic lubrication for drawing steel wire." Conf.Tribology in Iron and Steel Works.Iron and Steel Inst. Preprint.1969.47.
- 52-Cheng.H.S.Plastrohydrodynamic lubrication,friction and lubrication in metal processing."1969.
- 53-Bloor.M.S.Dowson.D.and Parsons.B."An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysis of the plane strain drawing process," Mech.Eng.Sci.1970.
- 54-Osterle.J.F.and Dixon.J.R."Viscous lubrication in wire-drawing." ASLE/ASME.Lubrication Conf.Chicago.1961.ASLE Trans.1978.
- 55-SÖNMEZ.H."Ekstrüzyon."İstanbul-1983.
- 56-Alexander.J.M."Hydrostatic extrusion." Mills Boon Ltd.1971. Boğaziçi Üniversitesi kütüphanesi.
- 57-Fiorentino.R.J.Meyer.G.E.and Barr.T.G."Some practical consideration for hydrostatic extrusion."1978.
- 58-Wilson.W.R.D."A comparison of the frictional losses in hydrostatic and conventional extrusion processes with hydrodynamic lubrication." Jurnal of lubrication technology.January-1971.

- 59-Snidle.R.W.Parsons.B.Dowson.D."An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysis of the hydrostatic extrusion process, including the effects of strain hardening and redundant deformation."In elastohydrodynamic lubrication,1972 Symposium.I. Mech.Eng.London.pp.107-117.
- 60-Snidle.R.W.Parsons.B.Dowson.D."A thermal hydrodynamic lubrication theory for hydrostatic extrusion of low strenght materials." Journal of lubrication technology.April-1976.
- 61-Wilson.W.R.D.Mahdavian.S.M. "Hydrodynamic lubrication of hydrostatic extrusion." Journal of lubrication technology.January-1976.
- 62-Mahdavian.S.M. "A refined analytical model for hydrodynamic lubrication of cold extrusion and its comparison with experiment." Transactions of the ASME.January-1982.
- 63-Hillier.M.J. " A hydrodynamic model of hydrostatic extrusion. Intern.J.Production.Res.1967.pp.171-180.
- 64-Avitzur.B. "Hydrostatic extrusion." Trans.ASME.Ser-B.no:4. 1965.pp.487-494.
- 65-Pugh.H.I. "The cold extrusion of metal by a high pressure liquid." International Research in Production Eng.1963.ASME.
- 66-Rozner.A.and Faupel J.H. "Some considerations of the mechanics of hydrostatic extrusion." Journal of lubrication.Voll-227. 1964.pp217.
- 67-Tegel.L.Kuppers."Hydrodynamic lubrication by means of drawing agents for double die drawing." Stahl Eisen.20 apr.1981.
- 68-Deyber.P.B. "Lubrication and deep drawing.a new mathematical model." Rev-Metal.May-jun.1975.
- 69-Wilson.W.R.D. "An isoviscous model for hydrodynamic lubrication of plane strain forging processes with flat dies." Journal of lubrication technology.October.1974.
- 70-Wilson.W.R.D." A rewiew of recent research on the mechanics of metal forming lubrication." CASA/SME Tech.1977.
- 71-Kalpakjian?S."Forging lubrication in metal deformation processes." Friction and lubrication.Ed.Schey.J.A.Marcel Dekker.

- 72-Oyana.M.and Osakada.K." The effect of deformation speed on friction and lubrication in cold forging." Bull.JSME.Vol-13 1970.
- 73-Hoffman.O.and Sachs.G. "Introduction to the theory of plasticity for engineers." McGraw-Hill.1978.
- 74-Sata.T.Lee.D.and Backofen.W.A. "Friction with liquid lubricants in plastic compression,in friction and lubrication in metal processing.ASME.1966.pp.1-19.

