

FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PNÖMATİK KATI TAŞINIMINDA
AŞINMANIN BOYA YÖNTEMİYLE SAPTANMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Fırat Üniversitesi
Merkez Kütüphanesi



0069830

255.07.02.03.00.00/08/0069830

TME YL 33

Mak. Müh. Mehmet ESEN

Fırat Üniversitesi

Teknik Eğitim Fakültesi

Makina Eğt. Bölümü

T. C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

TEKNİK EĞİTİM FAKÜLTESİ

Öğretim Kaynakları

Demirbaş No :

TEZ YÖNETİCİSİ : Yrd. Doç. Dr. Asaf VAROL

ELAZIĞ

O C A K — 1989

Okuduğum ve jüriye sunulmasını uygun gördüğüm bu tez, bir Yüksek Lisans (MS) tezinde bulunması gereken tüm nitelikleri taşımaktadır.

Yrd.Doç.Dr. Asaf VAROL

.....

Tez Yöneticisi

Tez Jürisi

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Jüri Başkanı

.....

Bu tez, Yüksek Lisans (MS) tezi olarak onaylanmıştır.

ÖZET

Makina Mühendisi Mehmet ESEN
F.Ü. Teknik Eğt.Fak.1989

Çeşitli maden cevherleri ve kum gibi katı maddelerin bir yerden diğer bir yere taşınmasında, son yıllarda hidrolik ve pnömatik taşıma yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmaya başlanan bu yöntemler, diğer demiryolu ve karayolu ile taşıma yöntemlerine göre daha ekonomik olmaktadır.

Hidrolik taşımacılıkta, boru içerisindeki katı madde bir sıvı akımı ile taşınırken; pnömatik taşımada bu akış hava ile sağlanmaktadır.

Hidrolik ve pnömatik katı madde taşımacılığında özellikle abrasiv aşınma mekanizması ve errozyon aşınması etkili olmaktadır. Dolayısıyla sözkonusu aşınmalar, taşıma elemanlarında önemli hasarlara sebep olmaktadır. Çünkü bu aşınmalar bir yandan boru tesisatındaki çatlaklara ve yedek parça gereksinimine yol açarken, bir yandan da boru çeper kalınlıklarının gereğinden büyük ve uygun olmayan malzemelerden seçilmesine neden olmaktadır. Almanya ve Japonya gibi endüstri ülkelerinde aşınma yolu ile ortaya çıkan yıllık hasar yaklaşık 10 Milyon DM'a ulaşmaktadır. /1/.

Bu sebeplerden dolayı taşıma elemanlarında oluşacak aşınmaların incelenmesi ve ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Aşınmayı meydana getirebilecek nedenler daha önce tespit edilmişlerse, bu aşınmaların oluşmasını önleyici tedbirlerin alınması da daha kolay olacaktır.

Bu çalışmada, sözkonusu taşıma yöntemlerinin tekniği ve bu taşıma sistemlerinde oluşan aşınmalar incelenmiştir.

İlk önce taşıma biçimleri hakkında bilgi verilmiş, daha sonra 2. bölümde taşınım tekniği ve incelenecek problem üzerinde durulmuştur.

3. bölümde katı-sıvı karışımların hidroliği incelenmiş, 4. bölümde ise genel aşınma mekanizması hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir.

5. bölümde hidrolik taşınımdaki aşınma olayı ve ölçme yöntemleri incelenmiştir.

6. bölümde ise pnömatik katı madde (kum) taşınmasındaki aşınmaların belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma anlatılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde, yapılan deney serilerinin sonuçları irdelenmiştir.

ABSTRACT

Hydrolic and pneumatic transpartation systems are largely used at carrying the materials like mine ores and sand from one place to another in recent years. These methods, which are used widespreably, are more economical than railway and highway transportations.

In hydrolic transportation, solid materials in tube are carried by a liquid current. In pneumatic transportation, they are carried by an air current.

Especially abrasive wear and erosion are effectual in these carrying methods. These wear mechanigms cause important damages and material losses at system elements. Hence it becomes necessary to make spare parts and choose better materials against abrasion. Cashual losses caused by abrasion in countries like Germany and Japan reach about 10 million DM a year.

Due to these reasons, wear amounts occured on system elements should be examined and measured. If the causes of wear were determined, it would be easier to prevent it.

In this study, mentioned transportation methods were introduced and wear occured in systems were investigated.

First, methods were outlined and then technology and the problems were taken into occunt in the second section.

In the thirth section, the hydrolics of liquid - solid mixture were examined and in the forth section general wear mechanisms were introduced.

Measuring methods of wear in hydraulic transportation were given in the fifth section.

In the sixth section, experiments made for determining wear amounts at pneumatic transportation were told.

In the last section of the study, the results of the experiments were examined.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi, yönlendirilmesi ve tamamlanmasında benden her türlü yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Y.Doç.Dr. Asaf VAROL'a, tercüme işlerinde büyük yardımı geçen hocam Doç.Dr. M.Mustafa YILDIRIM'a, Metalurji Bölümü atelyelerinden yararlanmamı sağlayan Öğr.Gör. Mustafa ŞAN'a ve atelye görevlilerine sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca literatür temini konusunda yardımcı olan kişi ve kuruluşlara içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet	111
Abstract	v
Teşekkür	vii
İçindekiler	viii
Tablolar	
Şekiller	
Resimler	
Semboller.....	
BÖLÜM I	1
1. GİRİŞ	1
BÖLÜM II	7
TAŞINIM TEKNİĞİ VE İNCELENECEK PROBLEM	7
2.1. Başlıca Tasarım Elemanları	7
2.2. İncelenecek Problem	10
BÖLÜM III	12
BORULARDA KATI-SIVI KARIŞIMI AKIMLARIN HİDROLİĞİ....	12
3.1. Katı-Sıvı Karışımı Akımların Sınıflandırılması	12
BÖLÜM IV	15
GENEL AŞINMA PROBLEMİ, AŞINMA MEKANİZMALARI VE	
AŞINMA ÇEŞİTLERİ	15
4.1. Aşınma Problemi	15
4.1.1. Aşınmanın Çeşitli Tanımları	16
4.1.2. Aşınmanın Analizi ve Etki Eden	
Faktörler	17
4.2. Aşınma Mekanizmaları	22

	<u>Sayfa</u>
4.2.1. Adhesiv Aşınma	22
4.2.2. Abrasiv Aşınma	22
4.2.3. Tabaka Aşınması.....	23
4.2.4. Yorulma Aşınması	23
4.2.5. Ablativ Aşınma	24
4.3. Aşınma Çeşitleri	24
4.3.1. Kayma Aşınması	25
4.3.2. Püskürtme Aşınması	26
4.3.3. Erozyon Aşınması	27
4.3.4. Korrozif Aşınma	27
4.3.5. Yuvarlanma Aşınması	28
4.3.6. Kavitasyon Aşınması	28
4.4. Aşınma Miktarının Ölçülmesi.....	29
4.5. Aşınma Deneyleri ve Genel İlkeleri	30
BÖLÜM V	32
BORULARLA HİDROLİK KATI TAŞINIMINDA AŞINMA VE ÖLÇME YÖNTEMLERİ	32
5.1. Borulardaki Aşınma	32
5.2. Tribolojik Sistem	33
5.2.1. Aşınmanın Zamanla Değişimi	34
5.2.2. Akım Parametrelerinin Boru Aşınmasına Etkisi	35
5.2.3. Aşınma Tahminiyle İlgili Üslû Çarpım Eşitliği	37
5.2.3.1. Malzeme Faktörünün Aşınma Kabında Tespiti	40
5.3. Boya Aşındırma Yöntemi	41

	<u>Sayfa</u>
5.4. Tartma Yöntemi	41
5.5. Ultrasonik Çeper Kalınlığı Ölçme Yöntemi.....	41
5.6. İç Komparatörün Kullanılması	43
5.7. Model Bagger Pompası ile Aşınmanın Deneysel Olarak Ölçülmesi	43
5.7.1. Deney Seti ve Ölçme Yöntemi	43
5.7.2. Deneyin Yapılışı	46
5.7.3. Deney Sonuçları	47
BÖLÜM VI	52
PNÖMATİK KATI MADDE TAŞIMASINDA AŞINMANIN BOYA YÖNTEMİ- LE SAPTANMASI İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA.....	52
6.1. Borularla Pnömatik Katı Madde Taşımacılığı ...	52
6.2. Pnömatik Taşınımında Aşınma Problemi ve Ölçülmesi	52
6.3. Deney Setinin Tanıtılması.....	54
6.4. Deneylerin Yapılışı ve Deney Sonuçları	56
6.4.1. Aşınmaların Zamanla Değişimini Tespit İçin Yapılan Deneyler	56
6.4.1.1. Ölçüm Değerlerinin Alınması	60
6.4.2 Aşınmaların Kanal Yüzeylerinde Yersel (Noktasal) Olarak Değişimi	61
6.5. Deney Sonuçları	62
6.6. İrdeleme	64
REFERANSLAR	79

TABLOLAR

Sayfa

Tablo 1.1. : Borularla Katı Madde Taşınım Şekilleri ve Özellikleri	3
Tablo 1.2. : Günümüzde Uygulanmış veya Planlama Aşamasında Olan Boru Hatları ve Özellikleri	5
Tablo 2.1. : Bir Boru Hattının Tasarımına İlişkin Temel İnceleme Konuları	8
Tablo 5.1. : Aşınma Yönünden Karşılaştırılmış Boru Malzemelerinin Sıralanması	39
Tablo 5.2. : 1 ve 2 Nolu Çarklara Ait Ağırlık Azalmaları	51
Tablo 6.1. : Kanal Yüzeylerinde Deney Sürelerine Bağlı Olarak Enine Kesitler Boyunca Ortalama Aşınma Değerleri	65
Tablo 6.2. : Sağ ve Sol Kenarlarda, Kanal Boyuna Göre Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri	66
Tablo 6.3. : Kanal Tabanında ve Üst Kapakta, Kanal Boyuna Göre Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri.....	67
Tablo 6.4. : Kanal Yüzeylerinde ve Eşdeğer Çaplı Boruda Kanal Boyuna Göre Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri.....	68

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1	: Çeşitli taşıma yöntemlerinde boyutsuz taşıma uzaklığına bağlı olarak değişimi ..	1
Şekil 2.1	: Borularla katı madde taşınımı sistemine örnek olacak bir demir cevheri taşınım şekli.....	9
Şekil 3.1	: Akım rejimlerinin sınıflandırılması...	13
Şekil 3.2	: Boruda katı madde taşınımında görülen akım rejimleri	14
Şekil 4.1	: Tribolojik sistemi etkileyen faktörler	18
Şekil 4.2	: Tribolojik sistem	20
Şekil 4.3	: Sürtünme esnasındaki etkenler ve değişimleri	21
Şekil 4.4	: Önemli aşınma çeşitleri	25
Şekil 4.5	: Taneli minarellerin sertliğine bağlı olarak meydana getirdikleri aşınma miktarları.....	26
Şekil 4.6	: Başlangıçta düzlem olan yüzeyin kum içeren su ile değişimi	27
Şekil 5.1	: Aşınmanın zamanla değişimi	35
Şekil 5.3	: Boru taşıma deneylerindeki ve aşınma kabı deneylerindeki malzeme faktörlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 5.4	: Modern bir bagger (Tarama) pompasının çarkındaki boya aşınması	41

Şekil 5.5	: Hidrolik taşıyıcıdaki aşınma ölçümleri için Meschede'de kurulmuş olan 125 mm. nominal boru çaplı deney setinin görünüşü...	44
Şekil 5.6	: Ölçüm noktalarının hazırlanışı	45
Şekil 5.7	: Aşınma oranının dirseğin 0,2 metre altında akım hızına bağımlılığı	48
Şekil 5.8	: Günlük aşınma oranının hıza bağımlılığı	48
Şekil 5.9	: Yatay borunun alt kısmında 120°'lik çevre boyunca aşınma oranları	49
Şekil 5.10	: Bir dirsek ve bağlantı borusunun alt tarafında oluşan aşınmalar	50
Şekil 5.11	: DÇ çarklarda taşınan katı madde hacmine bağlı olarak çark ağırlıklarının azalması	50
Şekil 5.12	: Çark Ağırlık Oranlarının Devir ve Malzeme-ye Bağlı Değişimi	51
Şekil 6.1	: Deney setinin şematik görünüşü	55
Şekil 6.2	: Sağ kenarda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi	69
Şekil 6.3	: Sol kenarda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi	70
Şekil 6.4	: Kanal tabanında deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi	71
Şekil 6.5	: Kanal üst kapığında deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi	72
Şekil 6.6	: Eşdeğer çaplı boruda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi ,.....	73
Şekil 6.7	: Sağ kenarda, kanal uzunluğuna bağlı olarak Enine alınmış ortalama aşınma değerleri...	74

- Şekil 6.8 : Sol kenarda, kanal uzunluğuna bağlı
olarak enine alınmış ortalama aşınma
değerleri..... 75
- Şekil 6.9 : Kanal tabanında, kanal uzunluğuna bağlı
olarak enine alınmış ortalama aşınma
değerleri 76
- Şekil 6.10 : Üst kapakta, kanal uzunluğuna bağlı
olarak enine alınmış ortalama aşınma
değerleri 77
- Şekil 6.11 : Eşdeğer çaplı boruda, kanal uzunluğuna
bağlı olarak enine kesitlerdeki ortalama
aşınma değerleri 78

RESİMLER

	<u>Sayfa</u>
Resim 1 : Deney setinin görünüşü	53
Resim 2 : Beş kat boya atıldıktan sonra, deney ya- pılmadan önceki kanal yüzeylerinin görünüşü	58
Resim 3 : 4 saatlık deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü	58
Resim 4 : 6 saatlık deney süresinden sonra üst kapığın görünüşü	58
Resim 5 : 8 saatlık deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü	59
Resim 6 : 10 saatlık deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü	59
Resim 7 : Toplam 12 saatlık deney süresinden sonraki kanal yüzeylerinin görünüşü	59

SEMBOGLER

C_v	: Katı maddenin hacimsel konsantrasyonu (%)
D	: Boru çapı
d_s	: Üniform katı maddenin tane çapı (iriliği) (mm)
ds/dR	: Katı madde tani iriliği/ Boru çapı
Eu	: Euler sayısı
ρ	: Özgül ağırlık (gr/cm ³)
Fr	: Boru akışındaki Froude sayısı
Fr_s	: Katı maddenin Froude sayısı
ΔG	: Ağırlık kaybı (gr)
ΔV	: Hacim kaybı (cm ³)
K	: Bir faktör ($\mu\text{m/h}$)
M	: Malzeme faktörü
Re	: Reynolds sayısı
V_c	: Kritik hız (m/s)
V_H	: Homojen akım ile heterojen akım sınırı (m/s)
V_L	: Limit çökelme hızı (m/s)
w	: Durgun suda tane çökelme hızı (mm/sn)
W	: Aşınma oranı ($\mu\text{m/h}$)

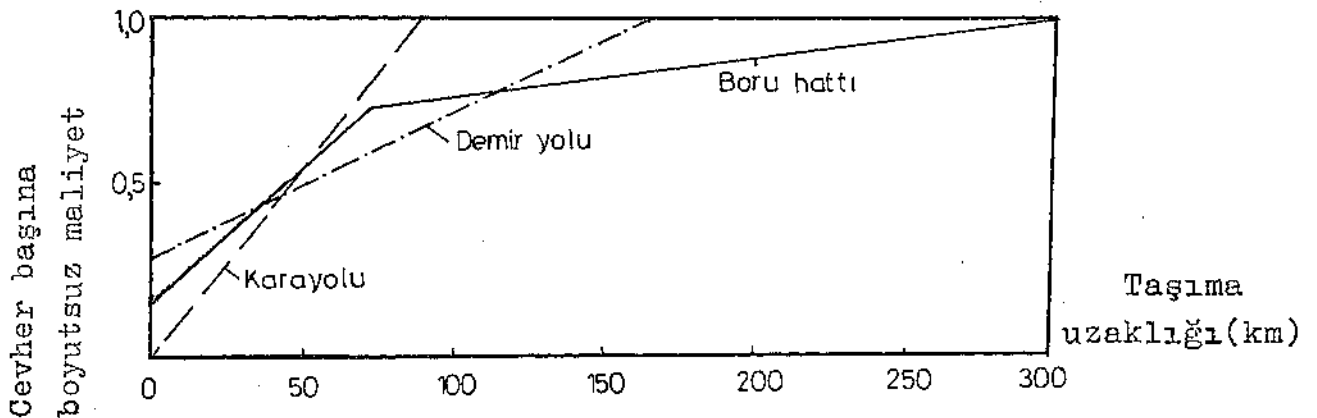
BÖLÜM I

1 GİRİŞ

Eskiden, boru hatlarıyla katı madde taşımacılığı olmadığı zamanlar, maden cevherleri, kum vs.; demiryolu, karayolu, bantlar teleferik, nehir ve denizyolu ile bir yerden diğer bir yere taşınmaktaydı. Günümüzde ise borularla hidrolik ve pnömatik taşınım yaygın olarak uygulanmaktadır.

Cevherin taşınma sisteminin seçiminde çeşitli taşınma yollarının ekonomik açıdan karşılaştırılması gerekmektedir. planlama aşamasında olan ya da işletmeye açılmış boru hatlarındaki toplam taşıma maliyetlerinin taşıma uzaklığına bağlı olarak değişimi, Şekil 1.1'de demiryolu ve karayolu ile karşılaştırılarak verilmiştir /2/.

Boru hattı taşımacılığı kısaca, içinde basınçlı ve taşıyıcı akışkan bulunan bir boruya katı madde verilerek bunun bir yerden diğer bir yere sürekli olarak taşınmasıdır. Taşıyıcı akışkan sıvı ise "hidrolik taşınım", gaz ise "pnömatik taşınım" adı verilir. Genellikle hidrolik taşınımda su, pnömatik taşınımda ise hava kullanılır.



Şekil 1.1. Çeşitli taşıma yöntemlerinde boyutsuz taşıma maliyetlerinin taşıma uzaklığına bağlı olarak değişimi.

Taşınacak katı madde doğrudan boruya verilebildiği gibi, katı malzemeyi taşıyıcı akışkanın etkisinden korumak amacıyla bir kapsül içine konarak da taşınabilir. Kapsüller küresel ya da silindirik şeklinde olup çapları boru çapının 0,80 - 0,90'ı kadardır.

Özellikle Kanada'da bu tür taşıma çalışmaları yapılmakla birlikte kapsül taşımacılığı çok fazla gelişmemiştir. Bu tez çalışmasında da sadece hidrolik ve pnömatik taşınım üzerinde durulmuştur. Borularla katı madde taşınım şekilleri ve özellikleri Tablo 1.1'de toplu halde verilmiştir.

Boru hatlarıyla taşınım çok eskilerden beri kullanılmasına rağmen yaygın ve modern şekilde uygulanmasına son yıllarda başlanmıştır.

İlk olarak Çinliler bambu kamışlarıyla tabii gaz iletmış; Romalılar ise su getirme ve atık suların uzaklaştırılması için kurşun borular kullanmışlardır. 1825'de tabii gaz iletimi için döşenen boru hattıyla ilk ticari uygulama başlamıştır. Daha sonra 1850'lerin sonunda California'da kum ve çakıl içerisindeki altını ayırmak için bu kumların yıkama havuzlarına iletilmesi amacıyla yapılan çalışma izlemiştir. Diğer ülkelerde de boru hatları ile taşınım hızla uygulanmaya başlanmıştır.

Önemli boru hatlarından biri de Virginia - Carolina Kimyacılık şirketi tarafından 1949 yılında kurulan 5 mil uzunluğundaki hattır.

1950'den sonra büyük miktardaki maden cevherlerinin taşınımı için elliden fazla boru hattı yapılmıştır.

Günümüzde uygulanmış veya planlama aşamasında olan önemli

TABLO 1.1. Borularla Katı Madde Taşınım Şekilleri ve Özellikleri

Özellikler	Borularla Katı Madde Taşınımının Tipi			
	Hidrolik Taşınım	Pnömatik Taşınım	Pnömo-Kapsül Taşınım	Hidro-Kapsül Taşınım
Teknolojik seviye	Ticari uygulama düzeyinde	Ticari uygulama düzeyinde	Ticari uygulama düzeyinde	Henüz araştırma safhasında
Katı madde tane boyutu	Küçük-genellikle 25 mm'den daha küçük	Orta-genellikle 50 mm'den daha küçük	Her boyutta-kapsül iç çapından küçük	Her boyutta-kapsül iç çapından küçük
İşletme hızı	1 ~ 3 m/sn	8 ~ 25 m/sn	10 m/sn	1 ~ 3 m/sn
Katı maddenin özellikleri	1- Su veya diğer taşıyıcı akışkandan etkilenmemeli 2- Taşıma sırasında özellikleri veya boyutu değişmemeli	1- Taşınım sırasında özelliği ve boyutu değişmemeli 2- Taşınımında bir tehlike yaratma	Her türlü malzeme olabilir	Her türlü malzeme olabilir
Taşınıma ait özel konular	1- Su veya diğer bir taşıyıcı sıvı gerekir 2- Hattın sonunda katı maddenin sıvıdan ayrılması kolay olmalı	Tozla malzeme kaybı önlenmeli	Yok	1- Taşıyıcı bir akışkan gerekir 2- Taşıyıcı akışkan ikinci bir hatla sirküle edilebilir
Taşınabilen tipik katı maddeler	Kömür, cevher, kum, çakıl, v.s. gibi katı malzeme	Tahıl, kül ve katı artıklar gibi katı maddeler	Hemen her şey, posta kolileri, endüstri hammaddesi veya mamul madde dahil	Hemen her şey
Taşıma uzaklığı	Uzun, 50-100 km'den büyük	Kısa, genellikle 100 km'den küçük	Uzun veya kısa olabilir	Henüz ticari bir uygulaması yok

boru hatları ve özellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir /3/.

Türkiye'de cevher nakleden ilk boru hattı 1972 yılında Murgul - Hopa arasında işletmeye açılmıştır. Boru hattı 63 km. uzunluğunda olup, kullanılan boru çapı 12,7 cm, yılda nakledilen cevher miktarı 0,3 Milyon - ton'dur. Bu hattan $4,4 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlıklı konsantre bakır cevheri taşınmaktadır. Karışım-daki cevher konsantrasyonu % 41'dir.

Hidrolik ve pnömatik taşınımın yaygınlaşmasının nedenlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1- Bir boru hattında ilk yatırım, toplam yatırımın %70-80'i kadardır. Bu yüzden işletme ve bakım giderleri toplam yatırım içerisinde az bir pay almakta ve sistem ülkedeki parasal değiş-melerden bağımsız kalmaktadır.

2- Demiryolu hattı döşenmesine göre, boru hattı döşenmesi daha ucuz ve bakım masrafları azdır.

3- İklim koşullarından bağımsızdır. Hidrolik ve pnömatik olarak sürekli taşınmanın sağlanabilmesi ve sistemdeki bozuk-luklarla ilgili olarak bakım işlerinin kısa sürede ve bazı du-rumlarda kesintisiz yapılması nedeniyle işletme verimliliği çok yüksektir.

4- Gerekli yetenekli personel sayısı, otomatik işletme ve kontrol sistemleri kullanıldığında çok azdır.

5- Uygulamada taşınan cevher miktarındaki değişiklikler için elverişli hidrolik veya pnömatik koşullar, karışımın debi-si ve cevherin ağırlıksal konsantrasyonunun düzenlenmesiyle, sis-tem her türlü koşul altında ekonomik biçimde işletilebilir.

6- Taşınım sırasında cevher miktarında herhangi bir ka-

Tablo 1.2. G nt m zde Uygulanm   veya Planlanm  ta Olan Boru Hatları v  ellikleri (21)

Boru Hattının yeri	Ta�ınan Madde	Uzunluk (Km)	Boru �apı (Cm)	Ta�ının Mik. (Milyon Ton/Yıl)	Maks. Tane �apı (mm)	Ağırlık Kons. (%)	Cevher Yo�unl.	Pompa İstasy. Sayısı	Toplam Pompa Sayısı	İşletme Yılı
Black Mesa, Arizona	Kömür	440	30,5-46	4,8	1,20	45-50	1,3-1,6	4	9	1970
�adiz, Ohio, A.B.D.	Kömür	173	27,3	1,2	1,20	50	1,3-1,6	3	9	1957
(1963/de t�rkedildi)	Kömür	61	30,5	1,8	0,03	50-60	1,3-1,6	-	-	1957
Merel�jynskaya, Rusya	Kömür	9,6	-	1,4	-	-	-	-	-	-
Lorraine, Fransa	Kömür	9	-	-	-	-	-	-	-	-
Emilo Hocket, Fransa	Kömür	9	38	2,0	-	-	-	-	-	-
Carling, Fransa	Kömür	9	61	9,1	-	-	-	-	-	-
�tah, A.B.D.	Kömür	290	96,5	22,7	3	50-60	1,3-1,6	-	-	İ��a halinde
Arkansas, A.B.D.	Kömür	1663	56	8,2	-	-	-	-	-	1979
Colorado A.B.D.	K�m�r	680	76,2	14,5	-	-	-	-	-	Proje safhada
Northwest, A.B.D.	K�m�r	1287	25,4	-	-	-	-	-	-	Proje safhada
Polonya	K�m�r	209	25,4	1,6	-	-	-	-	-	-
Rusya	K�m�r	64	25,4	1,4	-	-	-	-	-	-
Fransa	K�m�r	9,6	40,6	0,4	4,8	48	1,05	1	3	1957
�tah A.B.D.	Gilsonite	116	15,2	1,5	0,42	50-60	2,7	1	3	1964
Rugby, İngiltere	Kire� ta�ı	92	25,4	0,4	-	-	2,7	-	-	-
Avustralya	Kire� ta�ı	88,5	-	0,4	-	-	2,7	-	-	-
Kolombiya	Kireç ta�ı	27	19,4	0,4	-	-	2,7	-	-	1944
Kalifornia, A.B.D.	Kireç ta�ı	28	17,8	1,8	0,59	70	2,7	1	2	1971
Jasmania, Avustralya	Demir cevheri	85	22,9	2,3	0,15	55-60	4,6	1	4	1967
Arjantin	Demir cevheri	32	20,3	1,9	0,074	55-65	-	1	3	1976
Samar�o, Brezilya	Demir cevheri	400	50,8	11,0	0,074	60-70	4,9	2	14	1977
Las Truchas, Meksika	Demir cevheri	27	25,4	1,4	0,105	55-65	-	1	3	1976
Pretoria, G.Afrika	-	152	40	6,8	-	-	-	2	-	Proje safhada
-	-	560	32	4,5	-	-	-	4	-	-
Sishen, G.Afrika	Demir cevheri	540	32	3,6	-	-	-	7	-	-
-	-	640	50	9,0	-	-	-	3	-	Proje safhada
-	-	770	51	9,0	-	-	-	3	-	-
Kudremukh, Hindistan	Demir cevheri	58	51-56	10	-	-	-	-	-	1980
Avustralya	Demir cevheri	71	20,3	0,82	-	-	-	-	-	Proje safhada
Güney Kore	Demir cevheri	98	-	4,1	-	-	-	-	-	1975
Pena kolorado, Meksika	Demir cevheri	48	21,9	1,6	0,15	55-65	-	1	2	1974
Waipipi, yeni zelanda	Demir cevheri	9	20,3-30,5	1	0,59	45	-	2-1	8-6	1971
El salvador, �ili	Bakır cevheri	36	15,2	0,3	0,20	-	-	-	-	-
West Irian, Endonezya	Bakır konsantre	110	11,4	0,3	0,15	68-65	-	1	2	1972
Bouganville, Endonezya	Bakır konsantre	27	15,2	1,0	0,21	50-70	-	1	2	1972
Murgul - Hopa	Bakır konsantre	63	12,7	0,3	0,10	40	4,4	1	3	1970
İran	Bakır konsantre	110	5,0	0,3	-	-	-	-	-	-
Yeni Gine	Bakır konsantre	28	15,0	1,0	-	-	-	-	-	-
Polonya	Bakır türevleri	70	30,5	0,6	-	18	-	1	3	1968
Arizona, A.B.D.	Bakır konsantre	18	10,2	0,4	0,15	55-65	-	1	2	1974
Güney Afrika	Altın Türevleri	35	17,5	1,05	-	-	-	-	-	-
Georgia, A.B.D.	Kaolin, Kil	112	45,7	0,073	-	-	-	-	-	-
Akita, Japonya	Maden artıkları	71	30,5	0,5	0,21	-	2,75	-	-	1968
Kardanne, Fransa	Maden artıkları	48	22,9-30,5	0,000135	-	-	-	-	-	-
Westren A.B.D.	Nikel rafi, tür	7	10,2	0,1	0,30	50-60	-	1	2	1970
Ka�oshima, Japonya	Toprak	6,5	61	21,400 m ³ /gün	-	-	-	-	-	1967
Rostock, D.Almanya	Balık	321	-	-	-	-	-	-	-	İ��a halinde
Avustralya	Fosfat	320	41-56	4-6	-	-	-	-	-	Proje safhada
Valep, Brezilya	Fosfat	113	24,4	1,8	0,15	55-65	-	1	3	1976
Afrika	Fosfat	5	30,5	5	-	-	-	-	-	-
Kanada	Sülfür/hid.car	1290	30,5-40,6	3,5	-	-	-	-	-	İ��a halinde
Kanada	Nikel-Bakır	600	20	9	-	30-50	-	-	-	-

yıp olmaz. Cevherin taşınım sırasında kendini aşındırması gibi fiziksel olaylar az olduğundan, cevher boyutundaki değişimler genellikle önemsizdir.

7- Kamulaştırma ve benzeri giderler, diğer demiryolu sistemine göre daha azdır.

8- Boru hatları çoğunlukla yeraltına yerleştirildiğinden estetik ve çevreye etkileri bir sorun yaratmaz.

9- Engibeli güzergâhlardan geçirilmesi, kara ve demiryolu sistemlerine göre daha az sorun olmaktadır.

Boru taşınımında en elverişli koşulların elde edilebilmesi için, taşınacak katıların ince taneler haline getirilmesi gerekmektedir. Çeşitli cevherlerin taşınmasına ilişkin elverişli değerler Tablo 1.3'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Çeşitli cevherlerin borularla taşınmasına ilişkin elverişli değerler.

BÖLÜM II

TAŞINIM TEKNİĞİ VE İNCELENECEK PROBLEM

2.1. Başlıca Tasarım Elemanları

Borularla taşınım, boru içindeki akışkan içerisine sürekli olarak katı madde verilmesi ve bunun bir yerden diğer bir yere ulaştırılması olarak tanımlanabilir. Genellikle maden cevherlerinin çıkarıldığı yerden işletilip, dağıtılacağı yerlere sevkinde kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de bir demir cevheri taşınım sistemi gösterilmiştir.

Maden yatağından çıkarılan cevher, zenginleştirme işlemleri, su ve inhibitör ilavesinden sonra karışım tanklarına aktarılır. Santrifüj pompalarla pompa istasyonuna gelen su-cevher karışımı tekrar pompalanarak ana boru hattına verilir. İşletme sırasında oluşabilecek aksaklıkları önlemek için yedek karışım havuzları bulundurulur. Boru hattı sonuna gelen karışım, karışım tanklarına aktarılarak işleneceği yere gönderilir.

Bir boru hattının tasarımı etkili olan temel inceleme konuları WASP, THOMSON ve AUDE /5/ tarafından Tablo 2.1.'de verilmiştir. Boru hattının özelliklerine göre bunlara başka konular eklenebilir veya çıkarılabilir.

Borularla katı madde taşınım sistemlerinde özellikle taşıyıcı akışkan, katı madde tane çapı, işletme hızı ve yük kayıpları çok iyi belirlenmelidir. Gerek işletme emniyeti gerekse ekonomik açıdan en uygun akım hızının saptanması gerekmektedir. Boru tabanında katı maddenin çökelmeden sürekli taşınmasını sağlayacak, aynı zamanda sistem elemanlarını ve enerji maliyetini minimum yapacak olan hız akım hızı olarak alınmalıdır. İşletme

TABLO 2.1. Bir Boru Hattının Tasarımına İlişkin Temel İnceleme Konuları

I. İŞLETME KONULARI

A. HİDROLİK

- 1- Taşıyıcı akışkanın seçilmesi
- 2- Taşınacak katı maddenin optimum tane çapı ve konsantrasyonunun saptanması
- 3- Boru çapına bağlı olarak en küçük işletme hızının belirlenmesi
- 4- Boru çapı ve akım hızına bağlı olarak yük kayıplarının belirlenmesi

B. KOROZYON-EROZYON (AŞINMA)

- 1- Boru hattı ömrünün belirlenmesi (genellikle 15-20 yıl. Uygun koruma yöntemleriyle 50 yıla kadar çıkılmıştır)
- 2- Korozyon inhibitörünün seçilmesi
- 3- Akımın hızı ve tane çapına bağlı olarak boru malzemesi ve boyutlarının belirlenmesi

C. POMPA AŞINMA TESTLERİ

D. İŞLETİLEBİLİRLİK VE STABİLİTE

- 1- Boru hattında akımın kesilmesi ve yeniden başlatılması esaslarının belirlenmesi
- 2- En büyük boru eğiminin seçimi (% 15'e kadar)

E. TAŞINAN KATI MADDENİN AŞINMASI

- 1- Boru hattı boyunca tane çapındaki aşınma miktarının belirlenmesi
- 2- Pompanın tane çapı aşınmasına etkisinin saptanması

II. MEKANİK KONULAR

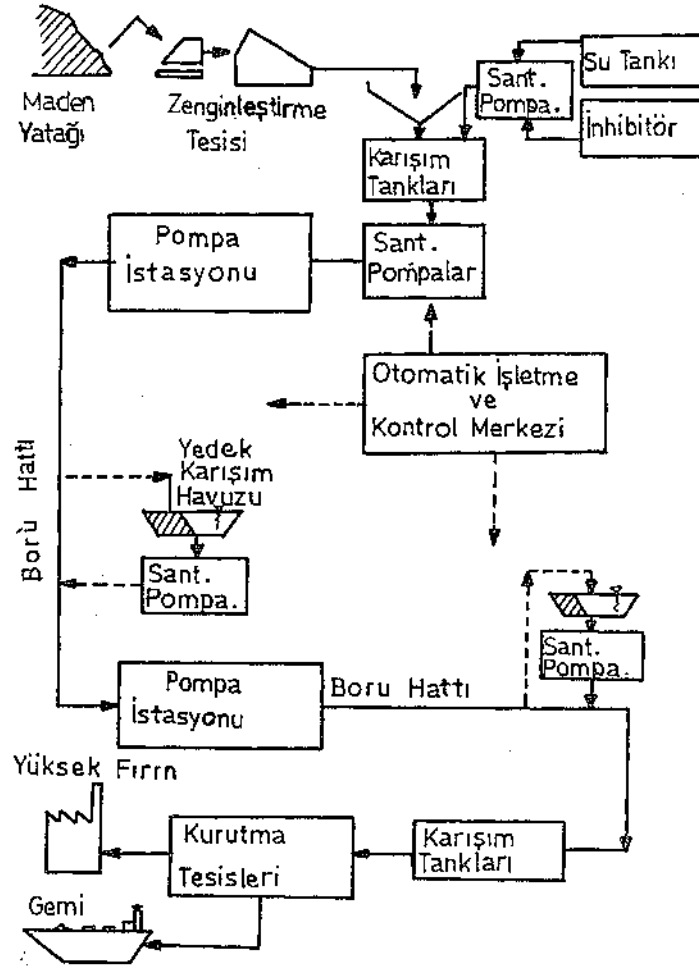
- A. Pompa tipi ve sayısının belirlenmesi (genellikle hacımsal pompa)
- B. Pompa istasyonlarının yer ve sayılarının saptanması
- C. Motor tipi ve pompa tahrik sisteminin seçimi
- D. Boru hattı inşaat kriterlerinin seçimi (yeraltı ya da yer üstünde)
- E. Otomatik işletme ve kontrol:
 - 1- Otomasyon derecesinin seçimi
 - 2- Pompaların senkronizasyonu
- F. Hacımsal pompa kullanıldığında oluşacak titreşim ve vibrasyona karşı önlemlerin saptanması

III. EKONOMİK FAKTÖRLER

- A. Yatırım maliyeti ve finansman kaynakları
- B. İşletme giderleri
 - 1- Pompaların bakımı
 - 2- Korozyon inhibitör giderleri
- C. Boru çapı ve enerji maliyetinin optimizasyonu

IV. İŞLETME FAKTÖRLERİ

- A. İşletme yöntemi ve gerekli emniyet sistemlerinin seçimi
- B. Akım kesme ve başlatma tekniğinin belirlenmesi
- C. Hat boyunca izole edilen boru kısımlarının kontrolü
- D. Personel ihtiyacı



Şekil 2.1. Borularla katı madde taşınımı sistemine örnek olacak bir demir cevheri taşınım şekli /4/.

hızı, kritik hızdan % 10 - % 30 daha büyük seçilmelidir. Kritik hız birçok parametreye bağlı olduğundan, güvenilir bir kritik hız bağıntısı vermek oldukça güçtür. Güvenilir bir şekilde kritik hızı belirlemek amacıyla yapılacak deneysel çalışmada iki yol izlenir. Birincisi boru hattının belli bir yerindeki şeffaf boru kesiminde çökelpmenin başladığı ana karşı gelen hızı kritik hız olarak almaktır. İkincisi ise farklı hızlarda boruda meydana gelen yük kaybını belirleyerek, yük kaybını minimum yapan akım hızını kritik hız olarak almaktır. İkinci yöntem diğerine göre daha güvenilir olmakla beraber, birinci yöntem pratik olması bakımından yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2. İncelenecek Problem

Boru taşımacılığında işletme konuları yanında, incelenmesi ve araştırılması gereken en önemli konulardan biri de taşıma elemanları ile taşınan katı madde tanelerinde oluşan aşınma miktarıdır. Bu nedenle aşınmanın olduğu yerler ve aşınma miktarını tespit için bir takım deney ve testler uygulanmalıdır.

Katı madde taşınmasındaki aşınma, taşınan katı taneciklerin boruların ve diğer elemanların iç çeperlerine çarpmaları ve oradan malzeme parçacıklarını koparmaları ile ortaya çıkar.

Aşınma miktarını ölçmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan birisi, model bir Bogger (tarama) pompası ile ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 1 mm olan kuvars kumu kullanılarak, nominal çapı 125 mm olan borularla bir devridaim oluşturularak yapılan aşınma deneyidir. Bu şekildeki deney setinde ultrasonik ölçme yöntemi kullanılmaktadır.

Ayrıca boya aşınma yöntemi, tartma yöntemi ve komparatör kullanma gibi yöntemler mevcuttur.

Aşınma olayını etkileyen ana faktörler şunlardır:

1- Aşınan Ana Malzeme (Boru malzemesi), 2- Aşındıran Karşı Malzeme (kum), 3- Ara Taşıyıcı Akışkan (Su veya hava)

Genellikle bu üç ana faktöre bağlı kalan aşınma mekanizmalarına tribolojik sistem adı verilir. Yukarıda sayılan üç temel faktöre bazen hareket ve yükleme gibi faktörler de ilave edilir.

Akış durumunun en önemli parametreleri akış hızı, katı maddenin tane iriliği, katı madde konsantrasyonu ve boru çapıdır. Bu nedenle inceleme konumuz olan aşınma, akım durumuna ve

boru malzemesinin özelliklerine bağlı sistem yük büyüklüklerinin bir fonksiyonu olacaktır.

Bu çalışmada amaç; hidrolik ve pnömatik katı madde taşımacılığında, taşıma esnasında katı maddenin borularda ve diğer sistem elemanlarında yaptığı aşınma tahribatının araştırılmasıdır. Bu amaçla önce hidrolik taşımacılıkta meydana gelen aşınma tahribatı üzerinde durulmuş ve bu konuda şimdiye kadar yapılmış deneysel çalışmalar da dahil, bir çok araştırmalar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra eldeki mevcut imkanlarla kurulan ve pnömatik katı madde taşıma sistemlerine iyi bir örnek teşkil edebilecek deney seti üzerinde aşınma ölçümleri alınmıştır. Kurulan deney seti esas itibarıyla bir hava akış kanalından oluşmakta ve hava vakumu vasıtasıyla çekilen kumun kanalın iç çeperlerinde yaptığı aşınma, kalınlık ölçer bir cihazla ölçülmektedir. Boya aşındırma prensibine dayanan bu ölçme yöntemiyle taşıma elemanlarının hangi noktalarında daha çok aşınma olduğu ve bu aşınmaların sayısal olarak hangi değerlerde olduğu tespit edilmektedir. Ayrıca aşınmayı etkileyen ana faktörlerle, aşınma oranı arasında ne gibi bağımlılık ve fonksiyonların olduğu ortaya çıkarılmaya çalışılacaktır.

Netice olarak hidrolik taşınımındaki aşınma ile deney sonuçlarında elde edilecek pnömatik taşımadaki aşınma miktarları karşılaştırılacaktır.

BÖLÜM III

BORULARDA KATI-SIVI KARIŞIMI AKIMLARIN HİDROLİĞİ

3.1. Katı-Sıvı Karışımı Akımların Sınıflandırılması

Katı-sıvı karışımlarının borulardaki hareketi sırasında hidrolik olaylar, karışımın çökelen veya çökelmeyen olmasına göre önemli farklar göstermektedir. Dolayısıyla iki farklı akış özelliği mevcuttur. Bunlardan çökelen karışım nispeten iri tanelerden oluşan karışım olup, taşınım sırasında tanelerin boru tabanına çökmesinin önlenmesi için akım hızının yeterince yüksek tutulması gerekir. Çökelmeyen karışımlarda ise katı taneler çok incedir ve uzun süre çökelmezler. Çünkü katıların konsantrasyonu düşüktür. Bu tür karışımlar sık sık hafif türbülans hatta laminar akım şartlarında boruda çökme tehlikesi yaratmadan taşınabilirler /2/.

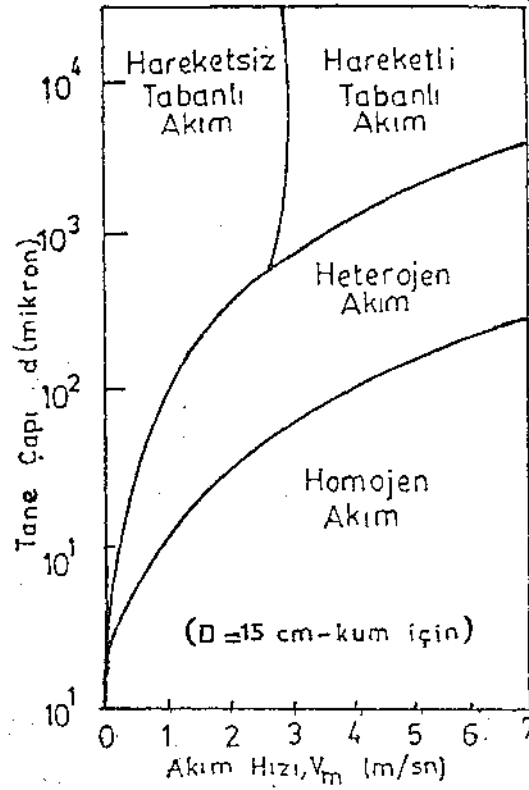
Çökelen karışımlar heterojen özellikteki karışımlardır ve uygun dağılımı sağlayacak bir hızda taşınmalıdırlar.

Çökelmeyen karışımlar ise genelde homojen özelliktedirler ve katı taneler üniform olarak enine kesit boyunca dağılırlar.

Gerçekte çökelen ve çökelmeyen karışımlar arasında bir ayırım yapmak güçtür. Bazı karışımlar her iki gruba da dahil olmayabilirler. DURAND /6/, NEWITT /7/ ve AUDE /8/ gibi araştırmacıların sınıflandırmalarına göre iki karışımı birbirinden ayıran sınır $W = 0,6 \sim 1,5$ mm/sn olarak verilmiştir.

(W: Katı tanenin durgun sudaki çökme hızıdır.)

Bu değerin üzerindeki hızlarda çökelen karışımlar, altında ise çökelmeyen karışımların oluşacağı kabul edilmektedir.(Şekil 3.1.).



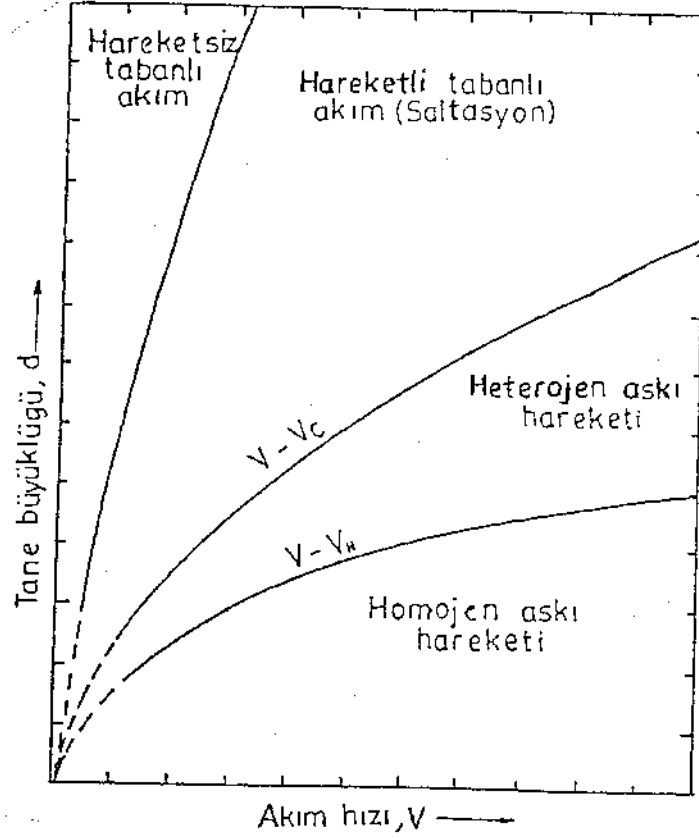
Şekil 3.1. Akım rejimlerinin sınıflandırılması /2/.

Bu çökeltme hızının, karışım yoğunluğundaki akışkan içerisinde hesaplanması gerekir. Buna göre % 30 - 40 hacimsel konsantrasyon veya % 50 ağırlıksal konsantrasyonda katı ihtiva eden ve tane çapı 50 mikrondan (μm) küçük olan katıların oluşturduğu karışımlar çökelmeyen karışım olarak kabul edilebilir. Çökelen karışımların hareketinde meydana gelen çeşitli akım rejimleri şekil 3.2'de verilmiştir.

Bu şekil, belli yoğunluktaki bir malzemenin, belli bir çaptaki boruda hareketi sırasında oluşan bölgeleri göstermektedir.

Belli çaptaki bir malzeme için akım hızının artmasıyla ortaya çıkan rejimler şöyle sıralanabilir /3/:

- 1- Katı madde akım hızının küçük değerlerinde harekete



Şekil 3.2. Boruda katı madde taşınımında görülen akım rejimleri /2/.

geçemez. Katı madde taşınımı yoktur (Hareketsiz Tabanlı Akım).

2- Hızın artmasıyla taneler sürüntü hareketi yapmaya başlarlar ($V < V_c$). Kayarak ve yuvarlanarak hareket eden taneler hızın daha da artmasıyla sıçrama hareketi yapmaya başlarlar. Bu rejim sırasında, taşınan katı madde konsantrasyonu, boru içindeki konsantrasyondan küçüktür.

3- Hızın daha da arttığı ($V > V_c$) durumlarda, taneler askı hareketine geçer. Bu sırada boru tabanında hareketsiz malzeme yoktur ve borunun her yerinde konsantrasyon aynıdır. Pratikte çok karşılaşılan bu rejim "heterojen askı hareketi" olarak isimlendirilir.

BÖLÜM IV

GENEL AŞINMA PROBLEMİ, AŞINMA MEKANİZMALARI VE AŞINMA ÇEŞİTLERİ

4.1. Aşınma Problemi

Temasta olan ve birbirlerine göre relatif (izafi) hareket yapan yüzeyler arasında daima harekete ters yönde bir direnç mevcuttur ve bunun sonucu olarak da aşınma meydana gelir. Frenler ve Kavramalar gibi özellikle sürtünme ile çalışan bazı sistemler hariç, genel olarak sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması gereklidir. Sürtünme sebebiyle oluşan enerji kayıpları ile aşınan parçaların bakımı, yenilenmesi için harcanan paranın toplamı büyük rakamlara ulaşmaktadır. Bazen açık olarak görünmeyen ve çok defa üzerinde fazla durulmayan bu kayıplar tekniğin ilerlemesi ile önemini bir kat daha artırmıştır. İngiltere'de yapılan bir araştırma 1970 fiatlarıyla, aşınma konusunda gerekli önlemler alınmış olsa yılda yaklaşık olarak yalnız İngiltere'de 12 milyar liralık bir tasarruf sağlamanın mümkün olabileceğini göstermiştir /10/. Sadece bu rakamın büyüklüğü bile problemin önemini açık olarak göstermektedir.

Maden işletmeleri, çimento sanayi gibi minarel veya benzeri taneli katı madde taşınımının sözkonusu olduğu yerlerde aşınmanın sebep olduğu kayıplar özellikle büyüktür.

Sanayide otomasyonun her gün biraz daha yaygınlaşması aşınma probleminin önemini de artırmaktadır. Özellikle büyük otomatik tesislerde en küçük bir elemanın aşınma dolayısıyla görevini yapamaz duruma gelmesi çok defa bütün makinelerin durmasına sebep olabilir.

Bu sebepten ön görülen bakım ve tamir zamanlarından önce herhangi bir aksaklığın olmaması için gereken bütün önlemlerin alınması büyük önem taşır.

Bir parçanın aşınması onun şekline, malzemesine ve işletme şartlarına bağlıdır. İşletme şartlarının ve parça şeklinin değiştirilmesi çoğu defa mümkün değildir veya sınırlıdır. Bu nedenle uygun malzeme kullanarak aşınmanın azaltılması yoluna gidilir. Ancak malzemelerin çeşitli işletme şartları altındaki aşınma durumları hakkındaki bilgiler çok azdır. Şartlardaki çok küçük bir değişiklik aşınmaya büyük oranda etki eder ve bazen tamamen ters sonuçlar da verebilir. Çok karışık ve kompleks bir olay olan aşınma problemi, bu alanda yapılan büyük araştırmalara rağmen henüz sınırlı olarak açıklığa kavuşturulabilmektedir.

4.1.1. Aşınmanın Çeşitli Tanımları

Aşınmayı açıklayan bir çok tanım yapılmış olup, bunlardan birkaç tanesi aşağıdaki gibidir.

" Birbirlerine göre hareket halinde olan yüzeylerden birinde veya ikisinde ortaya çıkan malzeme kaybı."

" Katı cisimlerin yüzeylerinden, tribolojik tesirlerle sürekli malzeme kaybı " /11/.

" Malzeme yüzeylerinin, daha çok mekanik zorlanmalar sebebiyle, bazı hallerde kimyasal tesirlerle küçük parçacıkların ayrılması sonucu değişmesi " / 12 /.

DIN 50320 (1970) ' e göre;

" Aşınma, teknik anlamda cisimlerin yüzeylerinde, mekanik bir sebep veya mekanik bir enerji verilmesi sonucu ufak parçacıkların kopup ayrılması ile istenmeyen bir değişikliklerin meydana gelmesidir /10/.

Bu tanıma göre; yüzeylerin taşlanması, parlatılması veya makina parçalarının alıştırılması, aşınma olayı kapsamına alınamaz. Bu işlemlerde yüzey değişikliği arzu edildiğinden, bunlar birer teknolojik biçimlendirme olarak değerlendirilmelidir.

Kimyasal, termik veya fiziksel nedenlerden dolayı eskime ve büyük parçalar halinde kırılmalar da aşınma grubuna dahil edilmelidir.

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi, aşınmayı tek bir tanım olarak vermek oldukça zordur. Bunun yerine aşınma olayını niteleyen bazı şartların veya kriterlerin belirtilmesi yerinde olacaktır.

Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olayının aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki gerekli ve yeter şartların sağlanması zorunludur:

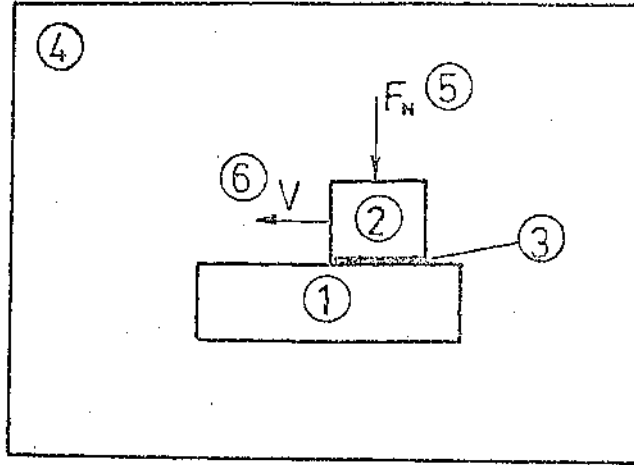
- 1- Mekanik bir etkinin olması,
- 2- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- 3- Yavaş fakat devamlı olması,
- 4- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5- İstenmediği halde (istegimiz dışında) meydana gelmesi

Bu şartlardan herhangi birini sağlamayan yıpranma olayı örneğin genel korrozyon, diğer bütün şartları sağlamasına rağmen sürtünme ve mekanik hareket olmaksızın (sadece kimyasal etki ile) oluşmaktadır.

4.1.2. Aşınmanın Analizi ve Etki Eden Faktörler

Aşınma olayının belirlenmesinde tribolojik sistemi meydana getiren temel unsurların bilinmesi gerekir. Bir

sistemde genel olarak bulunabilecek 6 temel unsurdan hepsi veya bazıları aşınma olayına iştirak edebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Tribolojik sistemi etkileyen faktörler.

1- Temel Sürtünme Elemanı (Aşınan eleman):

Fiziksel ve kimyasal özellikleri yanında; yüzeysel yapısı, şekli, durumu tamamen belirli olan ve aşınması özel ilgi ile incelenen katı cisimdir.

2- Karşı Sürtünme Elemanı (Aşındıran Eleman):

Aşınmanın meydana gelmesinde başlıca öneme sahip olan karşı sürtünme elemanı; katı bir cisim, sıvı ya da gaz ortam olabilir. Bu eleman, temel sürtünme elemanı ile birlikte bir aşınma çifti oluşturur.

3- Ara Madde:

Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir. Örneğin; bu ara maddesini, yüzeyler arasına herhangi bir nedenle girmiş bulunan kum taneleri oluşturulabileceği gibi, aşınma esnasında yüzeyden kopan parçacıklar da ara maddesi görevi üstlenebilirler.

4- Çevre:

Sistemi içine alan ve genellikle sıvı ya da gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar teknikte en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır.

5- Yükleme:

Etki eden kuvvetin büyüklüğü, şekli (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı) doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemenin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.

6- Hareket:

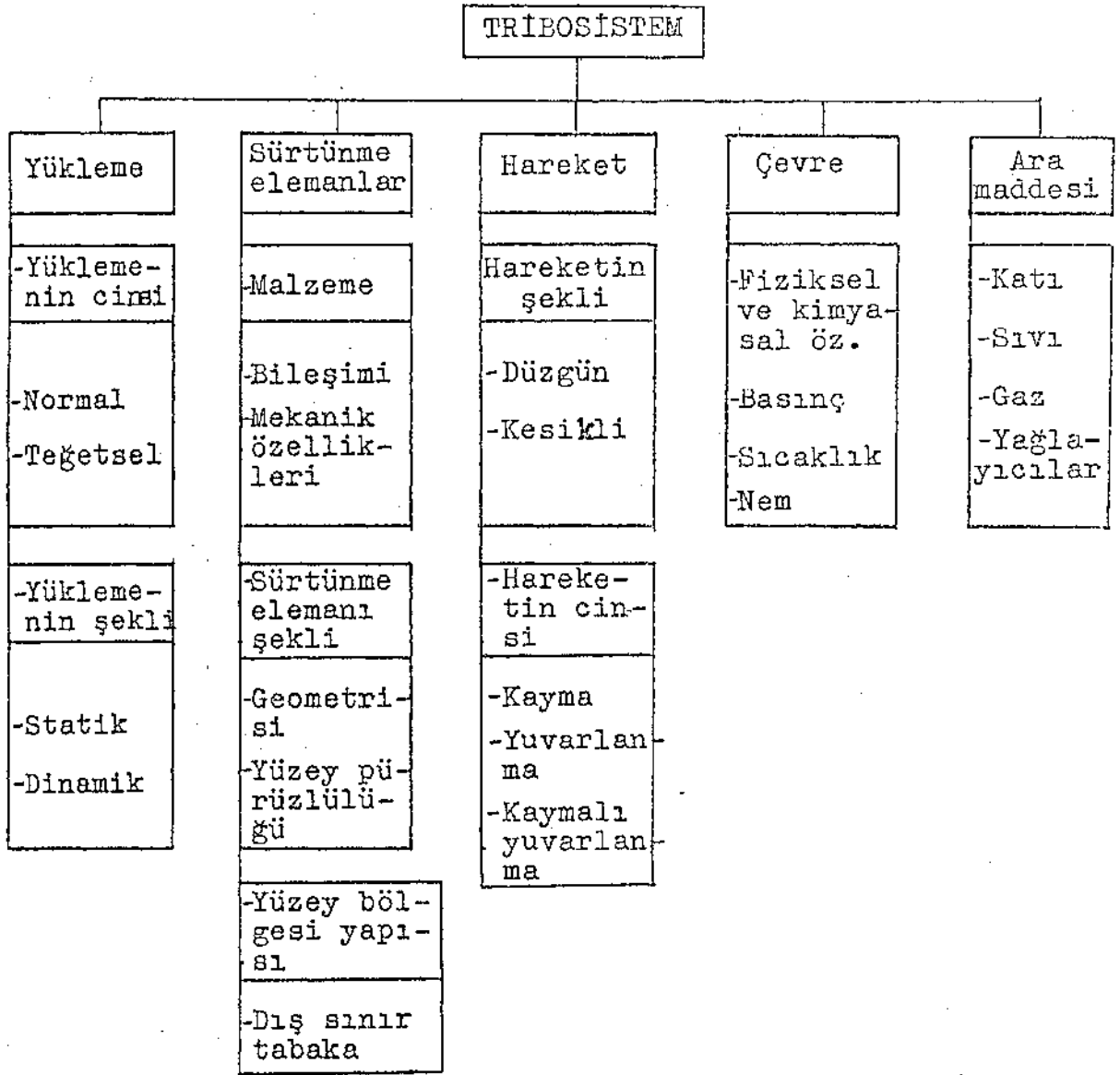
Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıklı olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.

Aşınma miktarının belirlenmesinde önemli bir faktör olan aşınma süresi, aynı zamanda aşınmanın ortaya çıkmasında da çok etkili olan büyüklüktür.

Bir tribolojik sistemin belirlenmesinde sisteme etki eden ve aşağıda verilen faktörlerin bilinmesi gerekir. Bu etken faktörler 5 ana grupta toplanabilir (Şekil 4.2).

Bu etkenlerden birinin değiştirilmesi, aynı zamanda diğerlerinin de değişmesine yol açmakta ve sistem üzerinde karmaşık bir etki oluşturmaktadır. Sözkonusu belirleyici etkenlerin kesin olarak birbirlerinden ayrılamaz oluşları ve bunların karşılıklı etkileşimleri sistem analizini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle sürtünme kuvvetinin ve aşınma hızının genel

bir yasa ile ifade edilmesi imkansız hale gelmektedir.



Şekil 4.2 Tribolojik Sistem /13/.

Yükleme ve hareket değişkenleri sisteme etki eden önemli giriş büyüklüklerini oluştururlar. Bunların etkisi ile yapıda bazı değişimler meydana gelir ve sonuçta sürtünme ve aşınma ile karakterize edilen kayıplar ortaya çıkar (Şekil 4.3).

Başlangıç (Giriş) büyüklükleri	Tribolojik olay sırasında değişen faktörler		Sonuç (çıkış) büyüklükleri
Sürtünme elemanlarının yapısı	Yüzey pürüzlülüğü değişimi	Yapı değişimi	Sürtünme kuvveti
Yükleme	Ara maddesi özellikleri	Fiziksel ve kimyasal öz. değişimi	Aşınma miktarı
Hareket	Sıcaklık değişimi	(mukavemet, iç gerilmeler, eş yönlendirme (tekstür)).	
Çevre			

Şekil 4.3. Sürtünme esnasındaki etkenler ve değişimleri /14/.

Genel olarak malzemelerin aşınma mukavemetlerine tesir eden faktörler şunlardır.

- 1- Sertlik
- 2- Tokluk
- 3- Mukavemet
- 4- Mikroyapı
- 5- Kimyasal Bileşim

Çalışma sırasında karşılaşılan değişkenler şu şekilde sıralanabilir (5).

- a- Temas eden malzeme
- b- Basınç ve kuvvet
- c- Hız
- d- Sıcaklık

e- Yüzey pürüzlülüğü

Bunların haricinde etkili olan diğer iki faktör ise

1- Yağlama

2- Korrozif etkidir.

Aşınmadan dolayı meydana gelen hasar daha çok parçanın şeklinin veya ölçülerinin değişmesi, ısınma sebebi ile yüzeyinde yapı değişimlerinin oluşması şeklindedir.

4.2. Aşınma Mekanizmaları

Yüzeyden malzeme kaybına yol açan mekanizmalar bir bakıma aşınma türünü gösterirler. Birçok durumlarda bu mekanizmalardan birkaçı aynı anda bulunabilirler. Bu durum aşınma konusunun karmaşık yapan nedenlerin başında gelir.

Aşınma tekniğinde görünüşleri ve gösterişleri belirli farklar gösteren aşağıdaki aşınma mekanizmaları bilinmektedir.

4.2.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv Aşınma; benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlı olarak uygulamalarda oldukça yüksek hızlarda ve aşırı yüklemelerde ortaya çıkan aşınma şeklidir.

4.2.2. Abrasiv Aşınma

Bu tip aşınma, malzeme yüzeyine karşı metalik ya da metalik olmayan aşındırıcı bir maddenin temasından ileri gelen, başka bir deyişle sürtünme çiftlerinden daha sert olanının karşı sürtünme elemanı içerisinde yüzey pürüzlülüğü mertebesinde girerek, hareket esnasında onu çizmesi ve talaş kaldırması

olayıdır. Yırtılma ve çizilme diye de adlandırılabilen bu tür aşınma; çizici, raybalayıcı veya çarpan zorlanmalar nedeniyle meydana gelir.

Abrasiv aşınmada sert tanecikler basınç altında yüzeyde kayarken veya yuvarlanırken önce metal yüzeyine girer, sonra metal taneciklerini yerinden yırtarak kazırlar. Sert aşındırıcı katı taneler kesici kenarlar gibi çalışır ve yumuşak yüzeyden sürekli malzeme kaldırır.

Abrasiv aşınmaya daha çok maden sektöründe, cevher çıkarma ve nakletme işlemlerinde rastlanır. Bu tür aşınmayı azaltmak için sertliğin arttırılması önlemlerin başında gelir. Sertlik dışında, yüzeyin göstereceği elastik deformasyon da abrasiv aşınmaya karşı önemli bir özellik teşkil etmektedir.

4.2.3. Tabaka Aşınması

Abrasiv aşınma olayında, malzemenin aşınma yüzeyine yakın yerlerinin (sınır yüzeyinin) pek önemli bir özelliği yoktur. Tabaka aşınmasında ise önemi büyüktür. Bu aşınma şekli malzemelerin sürtünme yüzeyinde oluşur. Malzeme yüzeyinde mevcut olan veya aşınma olayı esnasında meydana gelen tabaka, ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli miktarda değiştirir. Aşınma çifti yüzeylerinde, çevrede bulunan ara malzeme ve gazlar etkisi ile tribo-kimyasal, tribo-adsorbsiyon ve benzeri olaylar sonucunda oluşan sınır tabaka, yassı aşınma parçacığı şeklinde sıyrıldığında, yeniden oluşmakta ve aşınmaya önemli bir ölçüde etkimektedir.

4.2.4 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, titreşim zorlamalarında yorulma kırıl-

ması hasarı olarak ortaya çıkar.

Özellikle malzemenin, sürekli sabit veya değişen dinamik zorlanması sonucunda değme yüzeyinin altında ve yüzeye yakın yerlerde, iç yapının yorularak hasara uğraması sonucu, yüzeyden yer yer ayrılmalar olmasıdır.

Bu aşınma türünde iç yapı tahribatı, çatlamlar, lokal ayrılmalar meydana gelir.

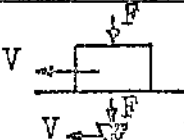
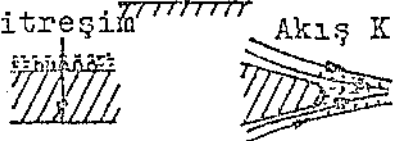
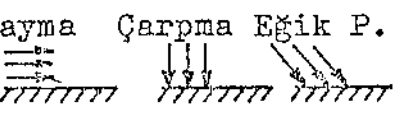
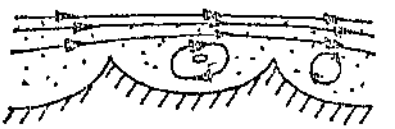
4.2.5. Ablativ Aşınma

Bu tür aşınma, bölgesel olarak aşırı zorlanan ve fiziksel olarak veya kimyasal değişimler nedeniyle ısınan yerlerde meydana gelir.

Bu tür aşınmaya; uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda ve fren balatalarında görülen aşınmayı örnek verebiliriz.

4.3. Aşınma Çeşitleri

Çeşitli şekillerdeki enerji iletimi veya aşınma olayını etkileyen büyüklüklerin değişik kombinasyonlarına göre aşınma şekilleri sınıflandırılabilir. Yani aşınma çifti arasındaki hareket aşınma cinsini (kayma, yuvarlanma, çarpma, püskürtme ve yıkama aşınması) belirler. Aşınma olayı sırasında bunların büyüklüğü, yönü, süresi (zaman ve kayma yolu olarak), hızı ile yüzeydeki sıcaklık değişimi saptanır. Yük statik, dinamik veya darbeli olabilir. Ayrıca yükün büyüklük ve yönü de zamanla değişebilir veya bir kaç aşınma çeşidi aynı anda cereyan edebilir. Şekil 4.4'de önemli aşınma çeşitleri şematik olarak bir arada gösterilmiştir.

Çeşitleri	İşareti	Görünüş şekli Cereyan, Sonuç
Yağlı Kayma aşınması Yağsız		Yenme Yüzeyde yanma
Kavitasyon		Yüzeyin pürüzlenmesi
Püskürtme aşınması.		Çukurlar, yüzeye çakılmalar
Yıkama aşınması		Yıkanma, çukurlar

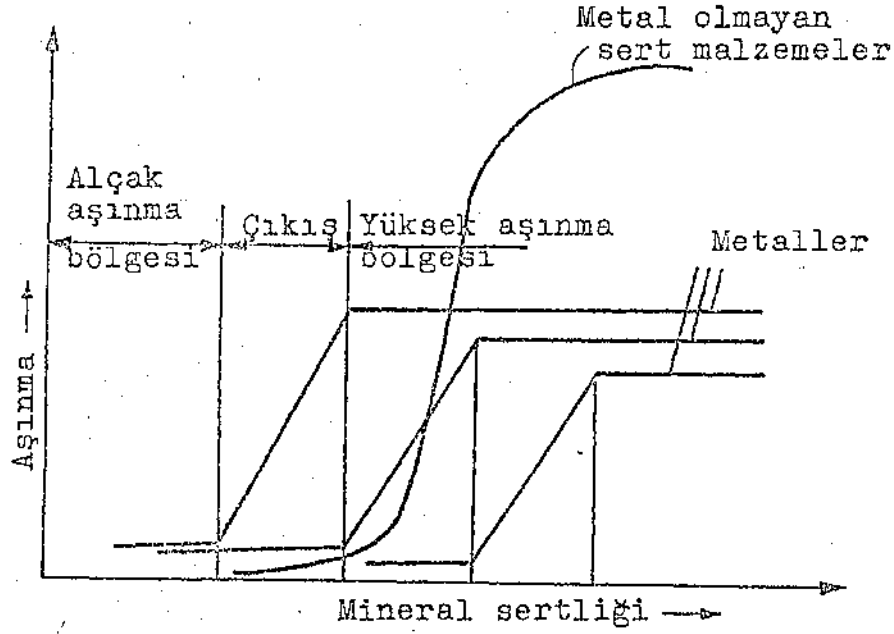
Şekil 4.4. Önemli Aşınma Çeşitleri /15/.

4.3.1. Kayma Aşınması

a) Taneli Mineraller Tarafından Oluşturulan Kayma Aşınması:

Taneli minerallerin meydana getirdiği kayma aşınması zorlanması mineral sertliğine bağlı olarak belirlenir. Metaller şekil 4.5'den de görüleceği gibi aşındırıcı mineral sertliğine bağlı olarak belirli bir yüksek ve alçak aşınma bölgeleri gösterirler.

Geçiş bölgesi, mineral sertliğinin metal sertliğine olan oranına bağlıdır. Eğer mineral sertliği, metalin sertliğinden fazla ise, aşınma miktarı da buna bağlı olarak artar. Ayrıca, yüksek aşınma bölgesinde, tane keskinliği aşınma miktarını artırıcı yönde etki eder. Metalik olmayan sert malzemelerde aşın-



Şekil 4.5 Tanekli minerallerin sertliğine bağlı olarak meydana getirdikleri aşınma miktarları /15/.

ma; metallerden farklı olarak, mineral tanelerin sertliği ile artar ve sert malzemenin aşınma yüzeylerinde (midye kabuğu şeklinde) gevrek kırılmalar meydana gelir.

b) Metal-Metal Aşınması

4.3.2. Püskürtme Aşınması

Püskürtme aşınmasında, püskürtme açısının önemi büyüktür ve bu tür aşınma malzemeye ve onun özelliklerine çok bağlıdır. Her malzemenin püskürtme açısına bağlı olarak dayanıklılığı farklıdır. Örneğin; küçük püskürtme açısında yumuşak ve kolay şekil değiştirebilen malzemeler büyük oranda aşınma gösterirken; sert ve gevrek malzemeler de büyük püskürtme açılarındaki aşırı zorlanarak maksimum aşınma gösterirler.

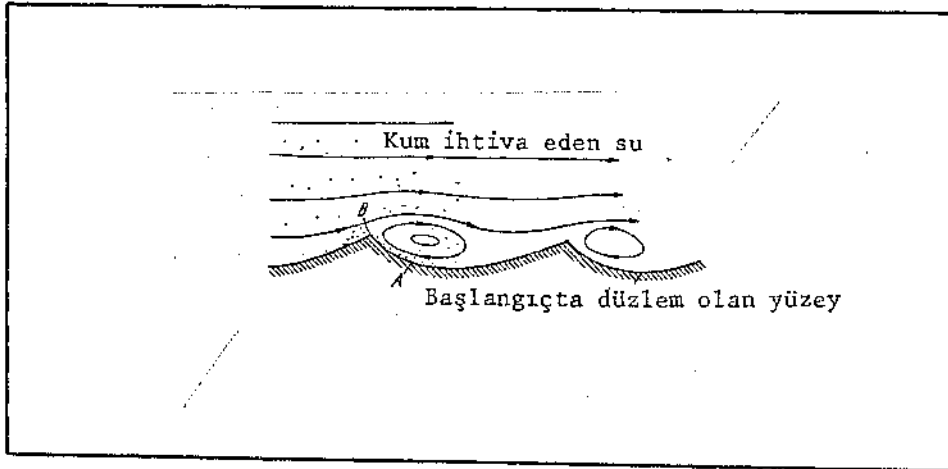
Ayrıca, aşınma miktarı, püskürtülen maddenin sertliğine ve püskürtme hızlarına bağlı olarak da değişim gösterir. Sert

malzemeler yüksek püskürtme hızlarında yumuşak (sünek) malzemelere göre daha fazla aşınırlar.

4.3.3. Erozyon Aşınması

Erozyon (hidro-abrasiv) aşınma, akıcı maddelerin meydana getirdiği aşınmadır. Sıvılar ve gazlar akış sırasında parçanın sınır yüzeylerinde patlama ya da çarpma etkisi yaparak yüzeyden parçacıklar koparırlar ve girdap etkisiyle dalgalı bir yüzey meydana getirirler. Böylece aşınma daha da hızlanır.

Akışkanın birlikte sürüklediği maddeler; örneğin hava içindeki tozlar, su içindeki kumlar ve buhar içindeki oksitler özellikle aşınmayı artırıcı yönde etki gösterirler (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Başlangıçta düzlem olan yüzeyin kum içeren su ile değişimi.

4.3.4. Korrozif Aşınma

Aşınan yüzeyler, aynı zamanda korrozif etkilere de maruz kalırsa buna korrozif aşınma denir.

Kimyasal korrozyon kendi başına oluşabildiği gibi, diğer aşınma türleriyle birlikte de meydana gelebilir.

Yüzeye sıkıca yapışan, filmler meydana getiren kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasını önler. Fakat film kırılğan ve yüzeye gevşek bağlı ise aşınma büyük miktarda hızlanır. Çünkü, sürtünme hareketi sırasında filmler çatlar ve yerlerinden koparlar.

4.3.5. Yuvarlanma Aşınması

Bu tür aşınma, birbiri üzerinde yuvarlanarak hareket eden malzemelerde oluşan aşınmadır. Bu aşınma türü de malzemelerin özelliklerine sıkı sıkıya bağlıdır. Yuvarlanma esnasında aşınma, tek bir malzemede ortaya çıkabileceği gibi her iki malzemede de değişen oranlarda oluşabilir.

Aşındırıcı tanelerin (kireç, cam, kuvars, korund ve silisyum karbür) vickers sertliği 110 -2700 kp/mm² arasında değişmektedir. Bunların aşındırıcı etkilerinin meydana gelişinde deformasyonların ve oksit tabakasının etkisi büyüktür /16/.

4.3.6. Kavitasyon Aşınması

Akış halindeki sıvılarda, ani basınç düşmesi sonucu gaz kabarcıkları veya boşlukların oluşmasına kavitasyon denir. Sıvı içindeki bu boşluğun, darbe şeklinde kapanması sonucunda, gaz kabarcıklarının patlaması ile ani bir basınç ve sıcaklık artışı olur. Buna bağlı olarak doğan kimyasal tepkimeler malzemede hasarlara yol açar.

Kavitasyon neticesinde malzemede oluşan hasarlar, çukurlaşmalar ve küçük çatlaklar, plastik deformasyonlar şeklinde görülür. Kavitasyon nedeniyle meydana gelen aşınma, artan mal-

zeme sertliđiyle azalmaktadır.

4.4. Aşınma Miktarının Ölçülmesi

Aşınma miktarını ölçmek için geliştirilen çeşitli yöntemler vardır. Yöntem seçimi, sürtünme çiftlerinin malzeme özelliklerine ve tribolojik sistemin yapısına bağlı olarak yapılmalıdır.

Yüksek duyarlılık, kolay ve çabuk uygulanabilirlik, teknik sistemlerde ve modellerinde paralel uygulanabilirlik ve ekonomiklik ölçme yönteminden beklenen özelliklerdir.

Aşınma ölçme yöntemlerini esaslarına göre aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

a) Ağırlık Tartma Yöntemi:

Bu yöntemde hassas terazi kullanılır. Deneyden önceki ve deneyden sonraki ağırlık değerlerinin farkı aşınma miktarını verir. Aşınan malzemenin ağırlık farkı (ΔG), özgül ağırlığı (ρ) ise, hacimsel aşınma miktarı

$$\Delta V = \frac{\Delta G}{\rho} \quad (1)$$

olur. Burada ΔG : gr, ρ : gr/cm³ ve ΔV : cm³'dür.

b) Kalınlık Ölçme Yöntemi:

Başlangıç değerleri belirli olan aşınma elemanında, deney sonunda meydana gelen boyut değişikliğinin ölçülmesi esasına dayanır. Bu yöntemde ölçme başlıkları kullanılarak 0,0001mm. duyarlılıkla aşınma miktarı ölçülebilmektedir.

c) Aşınma ölçümlerinde kullanılan diğer yöntemlere göre yeni ve çok yüksek duyarlılığa sahip olan bu yöntem, sürtünme

yüzeyinin radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma sonucu radyoizotopların yüzey bölgesinden ayrılmasıyla ortaya çıkacak aktivite değişimi ölçülür. Bu yöntem pahalı olduğu nedeniyle ancak özel problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

4.5. Aşınma Deneyleri ve Genel İlkeleri

Bir parçanın yapımında kullanılacak malzemenin seçimi, aşınma özellikleri bakımından çeşitli zorluklar arzeder. Aşınma mekanizmasının, yukarıda verilmiş olan teorilere rağmen çok az bilinmesi, karar vermede belli bir esasa dayanma imkanını azaltır. Malzemelerin işletme şartlarındaki aşınma durumlarının, şartlardaki ufak değişimlerde bile farklı olabilmesi zorlukları arttırır. Bu sebepten yapılan malzeme seçiminin uygun olup olmadığını işletme şartlarında kontrol etmek ve gereken değişiklikleri yapmak gerekir. Bir nevi "İşletme Deneyi" diyebileceğimiz bu yol çok daha uzun zamana ve fazla masrafa ihtiyaç gösterir. Şartları değiştirme ve elde edilen sonuçları genelleştirme imkanı sınırlıdır. Bu sebepten dolayı koğu kez "Model Deneyi" yapılır /10/.

Bu deneylerde işletmedeki şartlar ufak boy model setlerde aynen sağlanır. Genel olarak da amaca uygun geliştirilmiş aşınma setlerinde "Laboratuvar Deneyi" yapılır. Deney şartları belli bir programa göre değiştirilebilir. Ancak laboratuvarlarda elde edilen sonuçları yorumlarken çok dikkat etmek gerekir. Zira daha önce de belirtildiği gibi şartlardaki çok küçük bir değişme, aşınma özelliklerini önemli ölçüde etkiler. İşletme şartlarına hakim olmak, nasıl değişeceğini tahmin etmek ise daha zordur.

Kurulan deney düzenekleri belirli koşullarda; örneğin belirli yüzey basıncı, kayma hızı, sıcaklık etkileri altında aşınmanın oluşumunu, değişimini ve miktarını belirleme imkanı sağlar.

Ancak bu deney tesisatları araştırmacının öngördüğü belli koşullarda çalışan, ampirik esaslara göre yapılmıştır. Aşınmaya maruz parça ve malzemelerin kullanıldıkları yer ve şartlar çok farklı olduğu için, bugüne kadar yapılmış yüzlerce deney düzenekleri bilinmektedir.

Elde edilen sonuçlar genel olmaktan çok aşınma durumu hakkında kalitatif bir sıralama yapmaya yarar. Bu tip deney düzeneklerinin bir çoğu standartlaştırılmıştır. Bu düzenekler çok defa aşınmanın nasıl meydana geldiğini değil, şartlara göre nasıl değiştiğini tespit etmeye yarar. Ancak değişkenlere bir çözüm aramak için başka olanak bulunmadığından laboratuvar deneyleri yapmak kaçınılmaz olmuştur.

BÖLÜM V

BORULARLA HİDROLİK KATI TAŞINIMINDA AŞINMA VE ÖLÇME YÖNTEMLERİ

5.1. Borulardaki Aşınma

Hidrolik Katı madde taşımacılığında aşınma problemi, gözardı edilemeyecek büyük ve önemli bir problemdir. Bu sebepten erozyon, korrozyon ve bunların kombinezonları ile bunlardan korunma ile ilgili önlemlerin alınması ve incelenmesi çok önemlidir /17,18/.

Katı madde taşımacılığındaki aşınma, katı taneciklerin boruların ve diğer elemanların iç çeperlerine çarpmaları ve oradan malzeme parçacıkları koparmaları ile ortaya çıkar.

Bu aşınma miktarını ölçmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Eğer farklı boru malzemelerinin ömürleri hakkında fikir yürütülmek isteniyorsa, bu durumda özellikle lineer aşınma oranı büyük önem taşır. Deneylerde boru akış parametrelerinin aşınmaya etkisi belirlenir.

Borulardaki aşınmanın hidrolik katı madde taşımacılığı üzerinde önemli etkileri vardır. Çünkü bu aşınmalar bir yandan boru tesisatındaki çatlaklara ve yedek parça gereksinimine yol açarken, bir yandan da boru çeper kalınlıklarının gereğinden büyük ve uygun olmayan malzemelerden seçilmesine neden olmaktadır.

Statik yöntemlerin kullanılması sonucu akım parametreleri ile aşınma oranı arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Örneğin, bu suretle değişik boru malzemelerinde aşınmanın tahmini ilke olarak mümkün olabilmektedir /19/.

5.2. Tribolojik Sistem

Hidrolik katı madde taşımacılığında boru aşınması genel olarak tribolojik sistem olarak düşünülebilir. Bu sistemin esasını bir çevre ile sınırlandırılması ve bir takım fonksiyonlarla, sistem elemanlarının kendi aralarında ilişkili olması teşkil eder.

Buna göre boru aşınması, özellikleri esas itibarıyla belli akım durumunun mekanik etkileri tarafından yaratılan yükler altındaki malzeme davranışları tarafından belirlenir.

Akış durumunun en önemli parametreleri akış hızı, katı maddenin tane iriliği, katı madde konsantrasyonu ve boru çapıdır. Bu nedenle aşınma, akım durumuna ve boru malzemesinin özelliklerine bağlı sistem yük büyüklüklerinin bir fonksiyonudur.

Bu durumda aşınma, katı madde taneciklerinin boru iç çeperine çarparak oradan ince parçacıklar koparmaları şeklinde ortaya çıkar. Bu olay doğrudan doğruya aşınma olayına katılan elemanların sertlik durumuna ve çarpma açısına bağlıdır /20/.

Uygulamalarda çoğu kez taşınacak malzemenin sertliği boru iç çeperinin sertliğinden daha yüksek olur. Bu durumda aşınma maksimum olur.

Çarpma açısı, boru malzemesinin hangi şekilde; kayma mı yoksa direkt çarpma şeklinde mi zorlandığı ve bunlardan hangi mekanizmanın daha etkili olduğu hakkında fikir veren önemli bir büyüklüktür. Eğer çarpma açısı eğik ise, bu durumda yırtıcı, kazıyıcı ve kesici etki nedeniyle parça mikro aşınma olayına maruz kalır.

Buna göre düşük sertlikteki malzemeler aşırı derecede aşınırlar. Eğer çarpma açısı gittikçe büyürse, yüzeye gelen çarpma zorlanması da büyür. Bu durumda yüzeyin oyulmasından veya yorulma aşınmasından söz edilir.

Gevrek ve sert malzemeler bu etkiye karşı çok hassastırlar ve bu tür aşınmaya karşı sünek-yumuşak malzemelere oranla daha kötü bir davranış gösterirler / 20,21/.

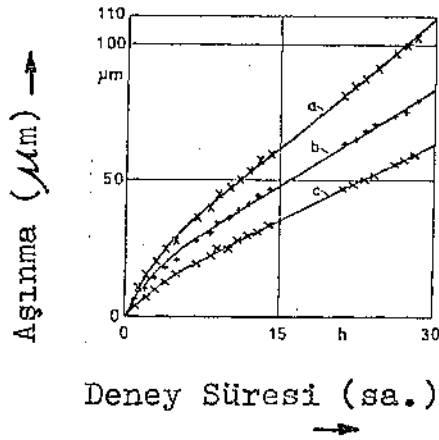
Tribokimyasal reaksiyonlar, yani korrozyondan dolayı şiddetlenen mekanik aşınma, reaksiyon yavaşlatıcıların (inhibitörlerin) kullanılması ile azaltılabilir. Ancak bazı durumlarda bunların da önemli bir rolü olmaz.

5.2.1. Aşınmanın Zamanla Değişimi

Şekil 5.1 de boru çeper kalınlığı ölçümü zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Eğrilerden de görüleceği gibi başlangıçta tane keskinliği etkisiyle lineer yüksek bir aşınma bölgesi ve ardından tane keskinliğinin kaybolması ile daha düşük bir oranda seyreden aşınma safhaları oluşmaktadır. Şekilde yaklaşık 2,5 saat kadar süre sonra keskin aşınma bölgesinin aşıldığı ve doğrusal bir bağıntı içerisine girildiği görülmektedir /1/.

Lineer aşınma oranı W ($\mu\text{m/h}$) oldukça önemlidir. Çünkü bu büyüklüğün uzun sürelerdeki değeri ekstrapolasyonla belirlendiğinde; değişik boru malzemelerinin ömürlerini karşılaştırma imkanı doğmaktadır. Bu değerlerden gidilerek boru tesisatlarının maksimum ömrü tahmin edilebilir.

Aşınma dağılımını taşıma (işletme) şartları ile belirlemek mümkünse de sayısal olarak belirlemek güçtür.



- a Maksimum değer ($3,14 \mu\text{m}/\text{h}$)
 - b Ortalama değer ($2,43 \mu\text{m}/\text{h}$)
 - c Tabandaki aşınma ($1,91 \mu\text{m}/\text{h}$)
- ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$)

Şekil 5.1 Aşınmanın zamanla değişimi.

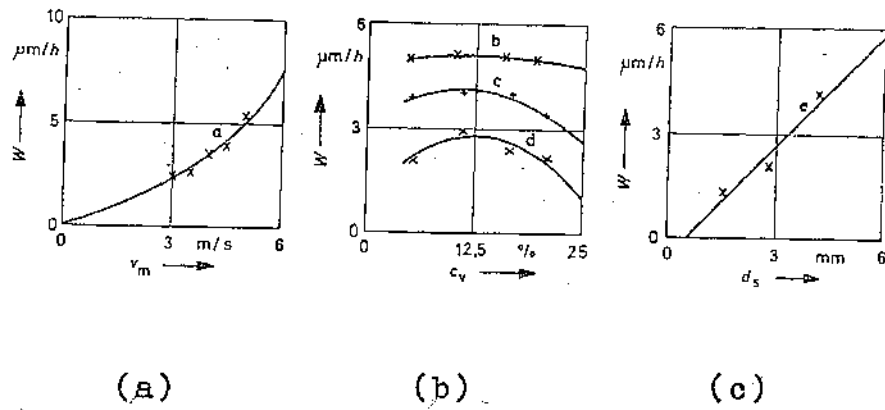
Aynı taşıma hızı, katı madde konsantrasyonu ve tane iriliğinde aynı malzeme ile farklı boru çaplarında yapılan iki deney serisinin sonuçlarından, artan taşıma hızı ile en büyük aşınmanın boru tabanına doğru kaydığı belirlenmiştir.

5.2.2. Akım Parametrelerinin Boru Aşınmasına Etkisi

Bütün aşınma deneyleri kritik çökelme hızının üstündeki hızlarda yapılmıştır. Çünkü katı maddelerin boru tabanında toplanması halinde hiç bir aşınma meydana gelmez. Şekil 5.2.a'dan görüleceği üzere taşıma hızı V_m 'e bağlı olarak aşınma oranı da gittikçe artmaktadır.

W ile V_m arasındaki bu ilişkiyi ikinci dereceden bir polinom denklemi ile ifade etmek mümkündür. Deneylerden taşıma hızının aşınma oranına en büyük etkiyi yapan faktör olduğu belirlenmiştir. Tanelerin başlangıçtaki keskinliğinden dolayı ortaya çıkan büyük aşınma safhasından sonra aşınma oranı, taşıma hızının ikinci kuvvetine bağlı olarak artmasına devam etmektedir /19/.

Aşınma oranının katı madde konsantrasyonuna bağlı olarak değişiminde ise bir maksimum görülmektedir.



- a $C_V = 6\%$, W_{max} d $V_m = 4$ m/s, $\bar{W}$
 b $V_m = 5$ m/s, W_{max} e $V_m = 4$ m/s, $C_V = 12\%$, W_{max}
 c $V_m = 4$ m/s, W_{max}

Şekil 5.2. Aşınma Oranı W 'nin akış hızı V_m , katı madde konsantrasyonu C_V ve tane iriliği d_s 'ye bağlı olarak değişimi.

İlke olarak tüm deneylerde ortaya çıkan bu bulgunun çeper ve ikili çarpışmalardan ileri geldiği sanılmaktadır.(Şekil 5.2.b). Belli bir katı madde miktarından sonra eğri düşüş göstermekte ve aşınma oranı azalmaktadır. Bu durum tanelerin kendi aralarında çarpışmaları suretiyle, boru çeperini kendi kendilerine korumaları ile açıklanmaktadır /19/.

Şekil 5.2.c.'de aşınma oranı W 'nin ortalama tane iriliğinin yaklaşık 0,5 mm - 5 mm. aralığında bu parametre (d_s) ile doğru bir orantı içerisinde arttığı görülüyor. Eğriden görüldüğü gibi 0,5 mm'den küçük tane çaplarında aşınma sıfır olmaktadır.

Boru çapının aşınma üzerindeki etkisi çok azdır. Ancak küçük boru çaplarından büyük boru çaplarına geçildiğinde aşınmada az oranda artış olmaktadır. Eğer aynı konsantrasyon ve tane iriliklerinde, boru içerisinde karışımların aynı taşıma durumları, farklı nominal çaplarda gözönüne alınırsa, yani ay-

nı Froude (Fr) sayıları ile çalışırsa, bu durumda küçük boru çaplarında kritik hız da küçük olur. Dolayısı ile katı madde- nin taşınması düşük taşıma hızlarında gerçekleşir ve aşınma da buna bağlı olarak düşük değerler alır.

$$Fr = V_m^2 / g \cdot d_R$$

$$Fr_s = W_{so}^2 / g \cdot d_s$$

$$Eu = \Delta P / \rho_f \cdot V_m^2$$

5.2.3. Aşınma Tahminiyle İlgili Üslü Çarpım Esitliği

Boru taşımacılığına ait Froude sayısı Fr , katı madde için Froude sayısı Fr_s , (tane iriliği/boru çapı) oranı d_s/d_R , hacimsel katı madde konsantrasyonu C_v ve Euler sayısı da Eu olsun. Bu büyüklükler akış durumu açısından, boru aşınması için çok önemlidir. Bu büyüklüklere bağlı olarak aşınma oranı

$$W = f(Fr, Fr_s, d_s/d_R, C_v, Eu) \dots \dots \dots (2)$$

fonksiyonu ile verilebilir.

Aşınmanın tahmini için bir üslü çarpım eşitliği seçimi yapılır /22/. Buna göre (1) nolu eşitlik aşağıdaki şekle gelir:

$$W_s = Fr^{a_1} \cdot Fr_s^{a_2} \cdot (d_s/d_R)^{a_3} \cdot C_v^{a_4} \cdot Eu^{a_5} \dots \dots (3)$$

En küçük kareler metodu kullanılarak St 35 GBK'dan imal edilmiş deney borularıyla optimum parametre tahmini yapıldığında

$$W_s = Fr^{0,26} \cdot Fr_s^2 \cdot (d_s/d_R)^{1,47} \cdot C_v^{0,99} \cdot Eu^{-1,88} \dots (4)$$

bağıntısı (tahmin fonksiyonu) elde edilir.

Eğer W_s , $K = 1 \mu m/h$ faktörü ile çarpılırsa, ömür hesabı için gerekli maksimum aşınma oranı W elde edilir.

Tahmini, regresyonun belirlilik derecesi etkiler. Bu büyüklük St 35 GBK için 0,46'dır. Eğer regresyonun belirlilik derecesi 0,5'in altında kalırsa, iyi bir tahmindensöz edilir.

Her deney tesisatında aşınma testine tabi tutulan boru malzemesi St 35 GBK'da olduğu gibi $W = \dots\dots\dots$ şeklinde bir fonksiyonla verilebilir. Ancak bu fonksiyonun malzeme özelliklerinin aşınma tahminine etkisi hakkında bir fikir vermeyişi eşitliğin dezavantajıdır.

Malzeme özelliklerinin genel eşitliğe katılması bugüne kadar gerçekleştirilememiştir. Bunun da nedeni prensip olarak malzeme özelliklerinin, fiziksel özellikler vasıtasıyla sayısal olarak verilmesinin güç olmasıdır. Bu yüzden öncelikle sertlik, çekme dayanımı veya süneklik gibi mekanik malzeme deneyleri sonuçlarından hareket etmek gerekir.

Gerek literatürlerden alınan bilgiler gerekse deney sonuçları, örneğin sadece sertliğin tek başına malzemelerden beklenen aşınma dayanımı değerleri hakkında fikir yürütmeye yetmeyeceğini göstermektedir.

Bu nedenle aynı aşınma koşullarında elde edilen malzeme faktörü tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu faktör bir malzemenin başka bir temel karşılaştırma malzemesine göre aşınma mukayesesini vermektedir /19/.

Eğer (3) nolu tahmin fonksiyonu, aşınması tahmin edilecek malzemenin faktörü (M) ile çarpılırsa, bu malzemenin aşınma değeri çok büyük bir yaklaşımla tahmin edilmiş olur (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Aşınma yönünden karşılaştırılmış Boru Malzemelerinin Sıralanması

Boru malzemesi	St 35 GBK'ya oranlanmış aşınma değeri	Malzeme aşınma faktörü (M)	Değerlendirme Sıralanması
St 35 GBK	-	1	8
St 35 BK	% 99	0,989	7
St 55 HV 210	% 78	0,783	5
St 55 HV 290	% 78	0,782	4
St 55 HV 467	% 72	0,719	3
St 55 HV 520	% 60	0,602	2
St 55 HV 660	% 59	0,592	1
Soy Çelik	% 79	0,786	6
Polimetakrilester (Plastik)	% 863	8,626	9

St 35 GBK malzemesi esas alınarak değişik boru malzemeleri için kurulan genel tahmin fonksiyonunun son şekli

$$W = K.M.Fr^{0,26} \cdot Fr_s^2 \cdot (d_s/d_R)^{1,47} \cdot C_v^{0,99} \cdot Eu^{-1,88} \dots (5)$$

olur.

Bu (4) bağıntısı farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik-teknolojik özelliklere sahip diğer bütün boru malzemeleri için de uygulanabilir. Ancak bu bağıntının kullanımı, malzeme faktörünün bulunması esnasında aşınma koşullarının aynı kalması ile mümkündür.

Bütün bu sonuçlardan, hidrolik katı madde taşımacılığın-

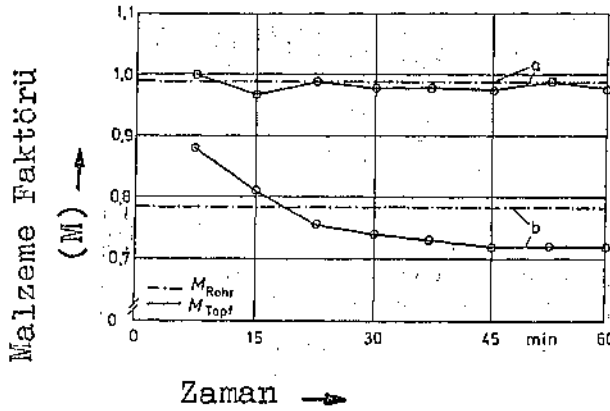
da yatay doğrusal aralıkta, aşınma mekanizması olarak abrasiyonun etkili olduğu ispatlanmış olur.

5.2.3.1. Malzeme Faktörünün Aşınma Kabında Tespiti

Hidrolik katı madde taşımacılığında abrasiyonun öncelikli aşınma mekanizması olduğu sonucuna dayanarak, boru deneyleri yapmadan malzeme faktörünü aşınma kabı deneyleri ile tespit yoluna gidilmiştir /1/.

Şekil 5.3.'de St 35 GBK esas alınarak St 35 BK ve St 55 HV 210 malzemeleri için boru deneylerinde (kesik çizgiler) ve aşınma kabında (düz çizgi) malzeme faktörleri deney süresine bağlı olarak gösterilmiştir.

Malzeme faktörlerinin karşılaştırılmasını esas alan başka deneyler de yapılmıştır.



a- St 35 BK için St 35 GBK ile karşılaştırılmış M değeri.

b- St 55 HV 210 için St 35 GBK ile karşılaştırılmış M değeri.

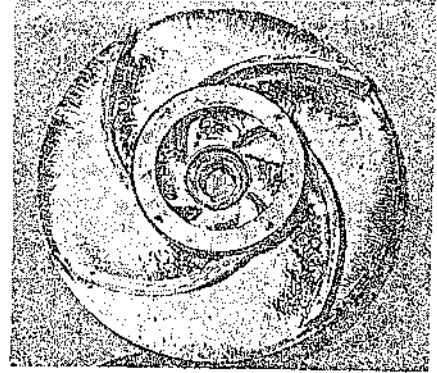
Şekil 5.3. Boru taşıma deneylerindeki ve aşınma kabı deneylerindeki malzeme faktörlerinin karşılaştırılması.

Buna göre herhangi bir boru malzemesinin (4) nolu eşitliğe göre aşınma tahmini, eğer malzeme faktörü aşınma kabında önceden belirlenirse kolaylıkla mümkün olmaktadır.

5.3. Boya Aşındırma Yöntemi

Bu yöntemde değişik renklerdeki bir kaç boya tabakalar halinde üst üste, incelenecek elemanın üzerine sürülür. Kısa bir çalışmadan sonra aşınma etkisinin görüldüğü yerler, işletme şartlarına bağlı olarak gözlenir /23, 24/. Bu oldukça hassas yöntem aşınma etkisi hakkında şekil 5.4.'de görüleceği üzere yeterli bir bilgi verebilmektedir. Aşındırıcılığı az olan katı maddelerin çok küçük konsantrasyonlarında bile pompanın veya kompresörün hangi çalışma değerlerinde nasıl bir aşınmanın bekleneceği bu yöntemle tespit edilebilir.

Şekil 5.4. Model bir Bagger
(Tarama) pompasının
çarkındaki boya aşın-
ması.



5.4. Tartma Yöntemi

Tartma bilindiği üzere ölçme yöntemleri içerisinde en kolay yapılabilenidir. Bir çok durumda kolaylıkla uygulanabilir. Bu yöntemin kullanımında ortaya çıkan en büyük problem aşınması ölçülecek malzemenin nem kapmasıdır /25/. Aşınma ölçümü hakkında yalnız tartmaktan söz etmek doğru olmamakla beraber, bu yöntem daha sonra da gösterileceği gibi karmaşık şekilli elemanlarda yoruma açık ve çok iyi kullanılabilen ölçme değerleri vermiştir /25/.

5.5. Ultrasonik Çeper Kalınlığı Ölçme Yöntemi

Her ne kadar yukarıda söz edilen yöntemler birçok haller

için uygun iseler de, bazı aşınma elemanlarındaki ölçümler için bütün istenenleri vermemektedirler. İdeal bir ölçüm yönteminden beklenen hususlar şöyle sıralanabilir.

- 1- Her noktada çeper kalınlığının mutlak ölçümü.
- 2- Herhangi bir yüzey kıvrımında (örneğin dirseklerde) kullanılabilirlik, yani noktasal ölçüm.
- 3- Bütün cins malzemelerde kullanılabilirlik.
- 4- Çok katlı (tabakalı) malzemelerde kullanılabilirlik.
- 5- Geniş bir ölçme aralığına sahip olma.
- 6- Yüksek hassasiyet.
- 7- Basitlik ve güvenilir olması.
- 8- Otomatik uygulamalara uyarlabilirlik.

Çeper kalınlığı ölçme yöntemleri arasında, günümüze kadar bütün bu istekleri yerine getiren, bilinen bir yöntem yoktur. En yakın değeri ancak ultrasonik çeper kalınlığını ölçme yöntemi ile almak mümkündür. Bu yöntem 1, 2, 3, 6 ve 7. maddeleri az çok sağlamakta ve bu nedenle diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar vermektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ve küçük çaplı eğrilikler (kıvrımlar) ölçme esnasında zorluklar yaratır. Bunun için ölçme sisteminden çok yüksek bir hassasiyet beklenir. Ultrasonik ölçümler için son yıllarda kullanılan alet Krautkrämer Firmasının Caliper 204 cihazıdır.

Bu cihaz iki ses kesici kafası ile değişik ölçme aralıkları verir /26/.

1. Kafa: 0.25 mm'den 9.99 mm'ye kadar
2. Kafa: 10,00 mm'den 99,99 mm'ye kadar ölçer.

Birinci kafa özellikle boru ve dirseklerin çeper kalınlığı ölçümünde kullanılır. Çarklardaki ve pompa gövdelerindeki ölçümler için ikinci kafa kullanılır /26/.

5.6. İç Komparatörün Kullanılması

Ultrasonik ölçme yöntemi normal tek tabakalı malzemelerin kalınlık ölçümünde bir çok avantajlara sahiptir. Ancak hidrolik katı madde taşımacılığında kapalı boru tesisatları ve kaplanmış pompa elemanları önemli konstrüksiyonları oluştururlar.

Sözkonusu konstrüksiyonlarda bazı durumlarda yine ultrasonik yöntemi kullanmak mümkünse de, genellikle bu elemanlarda komparatör kullanılır. Bu durumlarda ölçüm alınacak elemanların iç kısımlarına rahatlıkla girilebilmelidir.

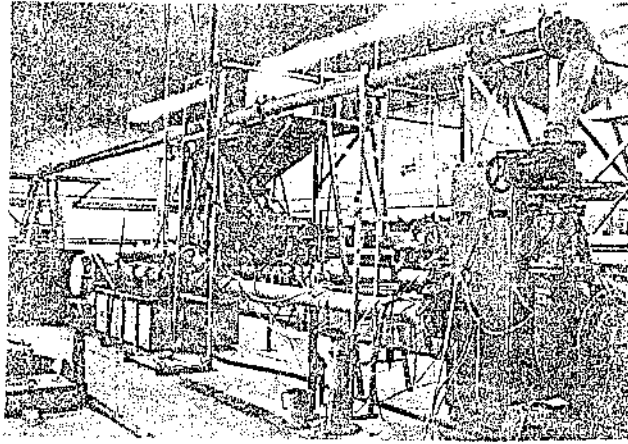
5.7. Model Bagger Pompası ile Aşınmanın Deneysel Olarak Ölçülmesi

5.7.1. Deney Seti ve Ölçme Yöntemi

Şekil 5'de Hidrolik taşımacılıkta taşıma elemanlarındaki aşınmaların ölçülmesi için Meschede'de kurulmuş bulunan bir model deney seti görülmektedir. /26/. Bu deney setinde kullanılan boruların nominal çapları 125 mm olup, toplam boru uzunluğu yaklaşık 25 metredir /26/. Deney pompası olarak bir Bagger (tarama) pompası kullanılmıştır. Bu pompanın gövdesi yüksek aşınmaya dayanıklı bir malzemeden yapılmıştır.

Aşınma deneyi, ortalama tane iriliği yaklaşık 1 mm olan kuvars kumu kullanılarak % 40 katı madde konsantrasyonu ile 8,2 m/s'lik akış hızında dairesel akışla (bir devridaim ile) gerçekleştirilmiştir /26/.

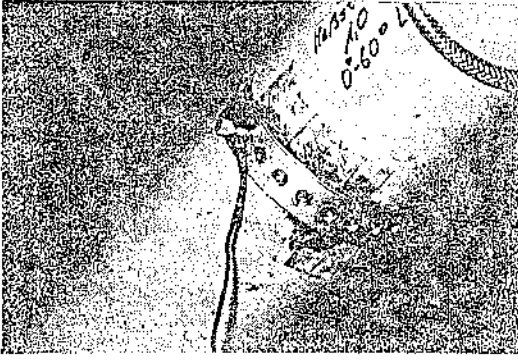
Deneylerden, pompa çarkındaki aşınmanın, sistemden geçen katı madde hacmi ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Ay-



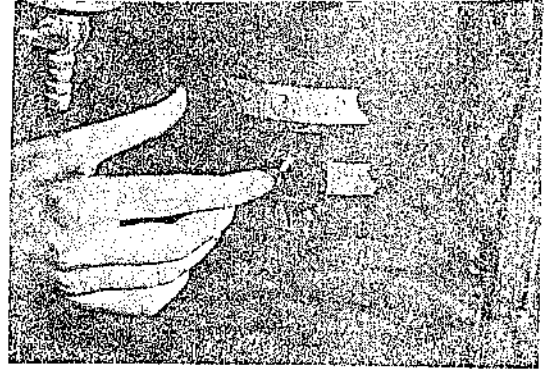
Şekil 5.5. Hidrolik taşıyımındaki aşınma ölçümleri için Meschede'de kurulmuş olan 125 mm nominal boru çaplı deney setinin görünüşü.

rıca çark devrinin de aşınma üzerinde önemli bir etken olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Dökme Demir çarklara nazaran, yüksek aşınmaya dayanıklı özel (CBR 315.3) çeliğinden imal edilmiş bulunan pompa çarklarının 10 kat daha düşük bir aşınma gösterdikleri tespit edilmiştir /26/.

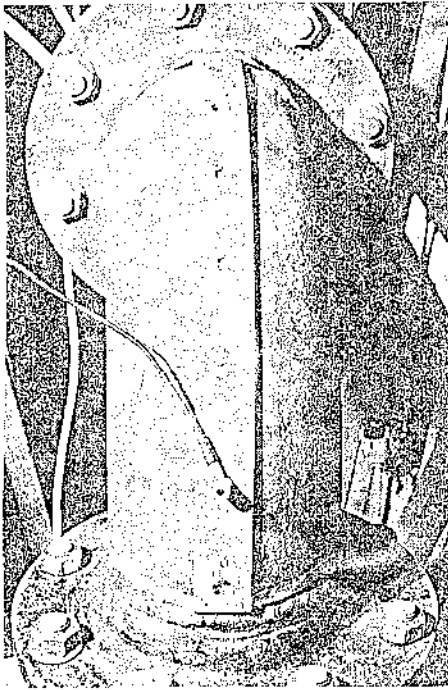
Aşınma ölçümleri için ultrasonik yöntem kullanılmış olup, ölçme kafalarının çeşitli elemanlar üzerine yerleştiriliş biçimleri şekil 5.6.'da görülmektedir. Şekil 5.6. (a) ve (b)'de ölçme kafalarının boru ve dirseklere yerleştirilişi , (c)'de pompa gövdesine yerleştirilişi, (d) ve (e)'de ise pompa çarkına yerleştiriliş pozisyonları verilmiştir /26/.



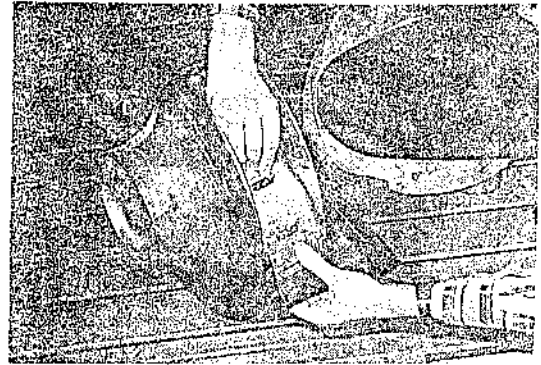
(a)



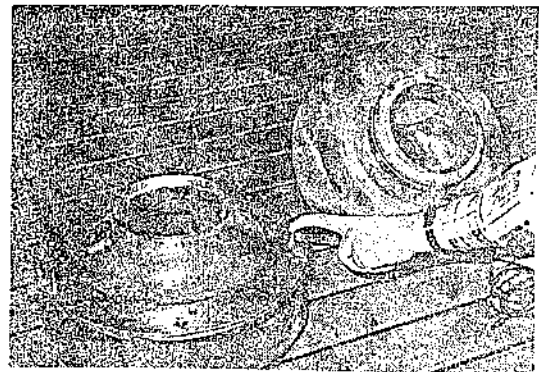
(c)



(b)



(d)



(e)

Şekil 5.6. Ölçüm noktalarının hazırlanışı

5.7.2. Deneyin Yapılışı

Deneyde kullanılacak katı maddenin seçiminde; bu katı maddenin aşınmaya dayanıklı, düşük maliyetli, yeterli miktarda bulunabilmesi ve değişmez kalitede bir katı madde olması gibi şartlar aranmaktadır. Seçilen katı madde ortalama tane büyüklüğü 1 mm olan Kuvars Kumudur. Hollanda'da "de Bree"nin yaptığı araştırmalarda kumun yüksek bir aşınma kararlılığı ve düşük bir aşınma özelliği gösterdiği belirlenmiştir /27/.

Pompa çarklarındaki aşınmanın belirlenebilmesi için, 3 değişik malzemeden yapılmış çarklar kullanılmıştır. Bu malzemeler GS 52, 20 MnCr5 ve özel CBR 315.3 dökme çeliğidir.

İlk deney farklı devirlerle saf su taşınmasında pompanın karakteristik eğrisini elde etmek amacıyla yapılmıştır. Çarkın çeper kalınlığını ölçmek için yapılan bundan sonraki deneyler, döküm yüzeyinin pürüzlülüğü nedeniyle sonuç vermemiştir /26/. Bunu % 10 katı madde konsantrasyonu ile, 700 d/dak. ve yaklaşık $85 \text{ dm}^3/\text{s}$ hacim debisinde, 2,5 saate varan, yüzey düzeltilmesi için yapılan taşıma deneyi takip etmiştir. İkinci bir çalışmada bu süre 5 saate kadar uzatılmıştır.

Daha sonra katı madde konsantrasyonu kademe kademe % 10'dan % 40'a kadar çıkartılarak, konsantrasyonun aşınma üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Bir sonraki adımda aşınma gradiyentinin, zamana olan bağımlılığı incelenmiştir.

Bunun için % 30'luk katı madde konsantrasyonu ile her defasında 2,5 saat süren deney serileri uygulanmıştır. Deney sa-

bit çalışma şartlarında toplam 10 saat sürmüştür. Yapılan gözlemler 7,5 saatlik deney süresinden sonra, aşınma oranı $W(\mu\text{m/h})$ de bir azalma olduğu göstermiştir. Bu sebepten daha sonraki deneylerde her 5 saatten sonra deneyde kullanılan kum vars kumu değiştirilerek yeniden verilmiştir. Böylece, katı maddedeki değişmelerden oldukça az etkilenen deney sonuçları elde edilmiştir.

Diğer bir araştırma hedefi pompa devrinin, aşınma üzerindeki etkisini belirlemektir. Bunun için çarklardaki ölçümler 700 d/dak'nın yanısıra 500 ve 900 d/dak'da alınmıştır. Bu deneyde pompa çarkını kullanım süresi, çarkın aşınması ve pompa karakteristik eğrileri arasındaki ilişkiler büyük önem taşımaktadır.

Deneylerden sonra ölçümlerin alınabilmesi için pompa sökülmüş ve çarkın ağırlığı tartılmıştır. Daha sonra çeper kalınlığı ölçümlerine geçilmiştir. Tesisattaki ölçümler ekseriya 5'şer saatlik katı madde değişim aralıklarında yapılmıştır /26/.

5.7.3. Deney Sonuçları

Wiedenroth /26/ tarafından yapılan deneylerde, özellikle aşınma etkilerinin en çok dirseğin hemen arkasındaki boru bağlantısında olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi yine Wiedenroth /26/ tarafından şöyle açıklanmaktadır. Dirsek nedeniyle, dirseğin dış iç çeperinde katı madde konsantrasyonu aşırı yükselecek karışım dengesi, yani homojenlik bozulur. Bu yüksek konsantrasyonlu karışım (su + kum) ayrıca flaşda boru ile dirsek arasında girdap oluşturur ve bu suretle aşınma yeniden hızlanır.

Eğer flanştan sonra 0,2 metre uzaklıktaki ölçme noktasına ait aşınma oranı, ortalama akım hızına bağlı olarak gösterilmek

istenirse, bu durumda literatürde sık rastlanan ve teorik olarak geliştirilen

$$S = a_1 \cdot V^b$$

bağıntısı geçerli olmaktadır/26/. Burada,

$$S = \text{Aşınma Oranını (mm/m}^3\text{)}$$

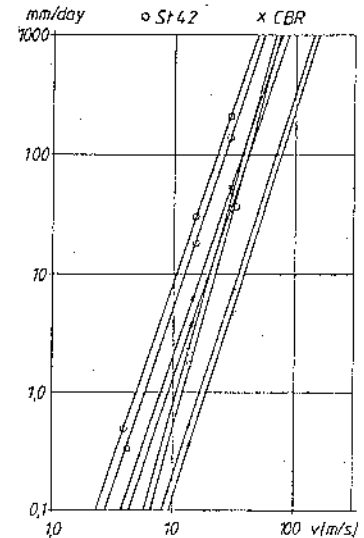
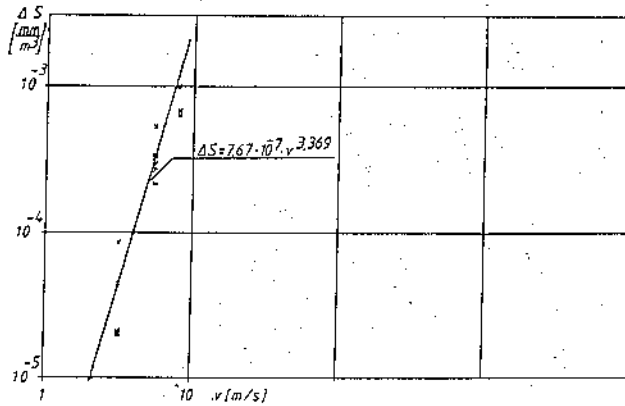
$$a_1 = \text{Bir sabiti}$$

$$V = \text{Relatif hızı (burada ortalama akış hızını)}$$

$$b = \text{Bir üssü}$$

göstermektedir.

Deney sonuçları şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu eğri $V_1 = 3,22 \text{ m/s}$, $V_2 = 5,62 \text{ m/s}$, $V_3 = 8,15 \text{ m/s}$ gibi üç değişik akış hızına bağlı olarak çizilmiştir. Bu doğru için b üssü



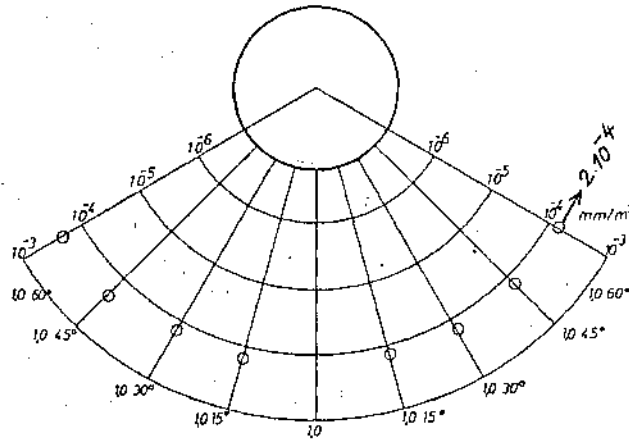
Şekil 5.7. Aşınma oranının dirseğin 0,2 metre altında akım hızına bağımlılığı

Şekil 5.8. Günlük aşınma oranının hıza bağımlılığı.

3,37 $\pm$ 0,37 olup, hata payı % 68,3'dür. Bu değer teorik olarak bulunan değerın üzerindedir. Çünkü burada flanş dolayısıyla akış sürekliliği değişmektedir /26/.

Araştırmalarda bu genel ilişki ispatlanmış ve St 42 çeliği için 3,06 üssü elde edilmiştir (Şekil 5.8.) /26/.

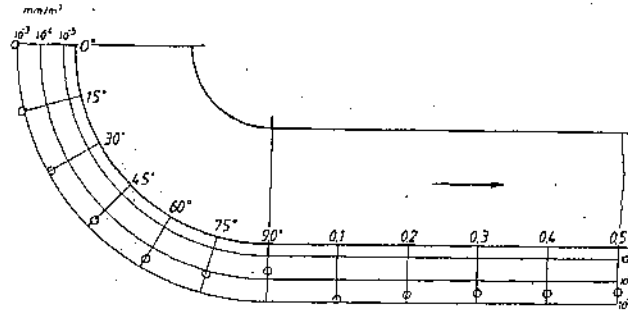
Şekil 5.6.a.'da verilen resimde ölçümler, yatay üst borunun son çeyreğinde borunun alt yarı bölgesinden (120°) çevresel olarak alınmıştır. Ölçüm değerleri 15° 'lik açılar halinde düzenlenmiştir. 8,15 m/s'lik akış hızında 5'şer saatlik deney serileri ile elde edilen sonuçlar şekil 5.9.'da gösterilmiştir /26/.



Şekil 5.9. Yatay borunun alt kısmında 120° 'lik çevre boyunca aşınma oranları.

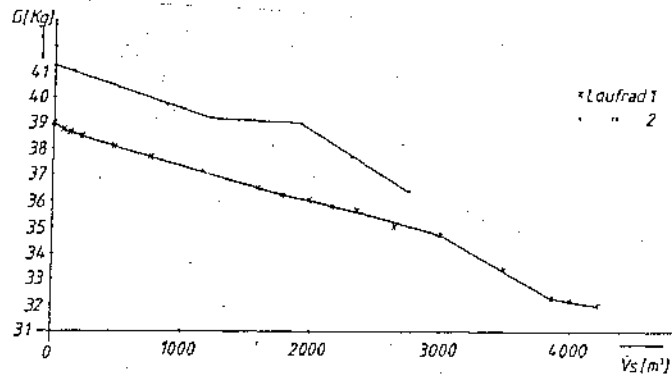
Şekilde yaklaşık sabit denebilecek 2.10^{-4} mm/m³'lük aşınma oranı dikkat çekicidir. Bu bulgu beklenen sonuç olmuştur. Çünkü yüksek akış hızı ve 1 mm ortalama tane iriliğindeki ince kuvars kumunun kullanılması boru içerisinde homojen bir karışım oluşmasını sağlamıştır.

Şekil 5.10'da ise bir dirsek ve buna bağlanmış boru parçasındaki aşınmalar çeşitli noktalar için gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Bir dirsek ve bağlantı borusunun alt tarafında oluşan aşınmalar.

Şekil 5.11. GS 52 Dökme çeliğinden imal edilmiş 2 pompa çarkı için ayrı ayrı geçen katı madde hacmine bağlı olarak ağırlık düşüşünü göstermektedir. Her iki eğride de ilk bölüm 700 d/dak, ikinci bölüm 500 d/dak ve eğrilerin son parçası 900 d/dak'lık çark devirleri için çizilmiştir.



Şekil 5.11. DÇ çarklarda taşınan katı madde hacmine bağlı olarak çark ağırlıklarının azalması.

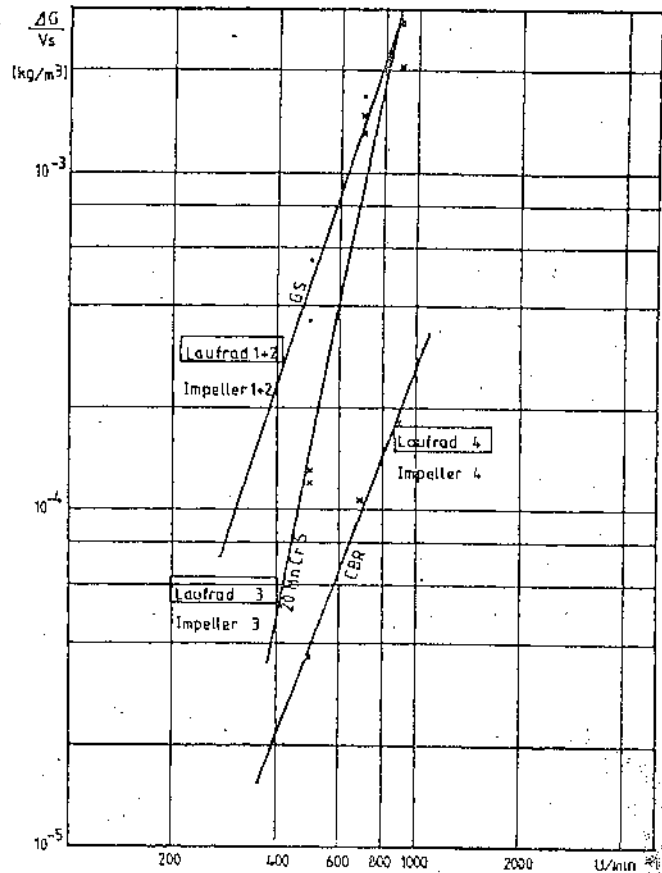
Tablo 5.2.'de sözkonusu pompa çarklarının devir sayısına bağlı olarak ağırlık azalmaları verilmiştir /26/.

Tablo 5.2. 1 ve 2 nolu çarklara ait ağırlık azalmaları.

Çark No	Devir Sayısı	Aşınma Oranı	Başlangıçtaki Çark Ağırlığı
1	900 d/dak	- 0,00279 kg/m ³	43,08 kg
1	700 d/dak	-0,00140 kg/m ³	38,78 kg
1	500 d/dak	- 0,00055 kg/m ³	34,42 kg
2	900 d/dak	- 0,00274 kg/m ³	43,96 kg
2	700 d/dak	- 0,00167 kg/m ³	41,21 kg
2	500 d/dak	- 0,00036 kg/m ³	39,64 kg

Şekil 5.12.'de Ağırlık azalması oranı değişik çark malzemeleri ve devir adetleri için gösterilmiştir.

Şekil 5.12. Çark ağırlık oranlarının devir ve malzemeye bağlı değişimi.



BÖLÜM VI

PNÖMATİK KATI MADDE TAŞINMASINDA AŞINMANIN BOYA YÖNTEMİYLE SAPTANMASI İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Borularla Pnömatik Katı Madde Taşımacılığı

Şayet katı maddelerin borularla taşınması esnasında taşıyıcı akışkan olarak gaz (örneğin hava) kullanılıyorsa, bu tür taşıma sistemine "Pnömatik Taşınım" adı verilir. Genellikle kullanılan taşıyıcı gaz havadır. Çünkü hava atmosferden bol miktarda kolay ve çok ucuz temin edilmektedir. Yaklaşık 50 mm. tane iriliğine kadar katı madde taşımak mümkün olabilmektedir. Hidrolik taşımaya nazaran pnömatik taşınımında elektrokimyasal aşınma mekanizmaları daha az etkilidir. Buna karşın pnömatik taşınım esnasında fazla malzeme kaybı önlenmelidir.

Bu taşıma yöntemi kum, tahıl, kül ve katı sanayi artıklarının taşınmasında sıkça kullanılmaktadır.

Diğer bir pnömatik taşıma yöntemi olan pnömo-kapsül taşınım yöntemiyle, posta kolileri, endüstri hammaddesi veya mamul maddeler taşınabilmektedir.

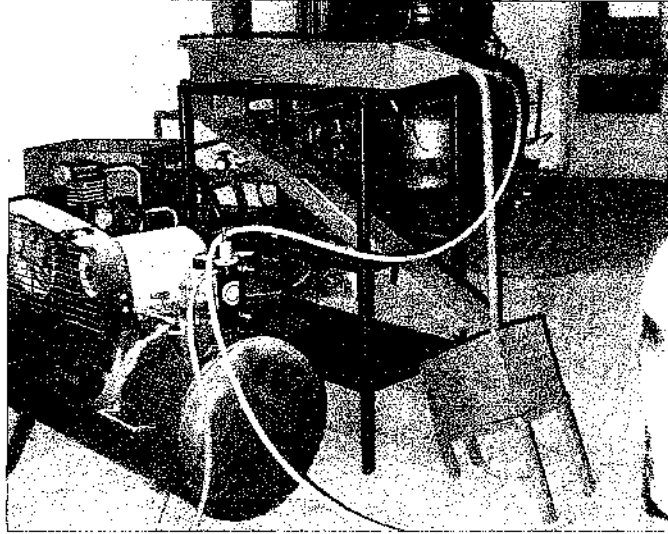
6.2. Pnömatik Taşınımında Aşınma Problemi ve Ölçülmesi

Pnömatik taşınımında, katı maddenin uzun uzun mesafelere sevkinde daha yüksek taşıma hızları ($8 \div 25$ m/s) gerekmektedir /2/. Dolayısıyla katı maddenin çökelmeden taşınabilmesi için gerekli büyük işletme hızları aşınma oranını arttırır.

Taşıma elemanlarının iç çeperlerine çarpan katı maddeler (örneğin kum taneleri) kazıyıcı etki yaparak önemli aşınmalara neden olmaktadır. Burada etkili olan aşınma mekanizması püskürtme aşınmasıdır.

Hidrolik taşımada olduğu gibi, pnömatik taşımadaki aşınmaların ölçülmesi için de en güvenilir ve sık kullanılan yöntem Model deney setleri kurarak, deneysel çalışmaktır.

Bu tez çalışmasında da pnömatik taşımadaki aşınmaları tespit amacıyla bir model deney seti kurulmuştur (Resim 1).



Resim 1. Deney Setinin Görünüşü

Bu deney seti üzerinde kanal boyunca 4'er cm. aralıklarla enine ortalama aşınma değerleri ölçülüp tespit edilmiş ve değerler diyagramlara geçirilmiştir. Ayrıca belirli deney sürelerine bağlı olarak (1'er saat aralıklarla), kanal iç yüzeylerindeki aşınmalar bir kalınlık ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Yine deney sürelerine bağlı olarak ölçülen aşınma değerlerinin kanal boyunca değişimi diyagramlar halinde verilmiştir.

Deney sistemi ve deneylerin yapılışı aşağıda anlatılmıştır.

6.3. Deney Setinin Tanıtılması

Deneyleri yapmak için kurulan deney seti Resim 1'de görülen sistem olup, şematik görünüşü Şekil 6.1.'deki gibidir.

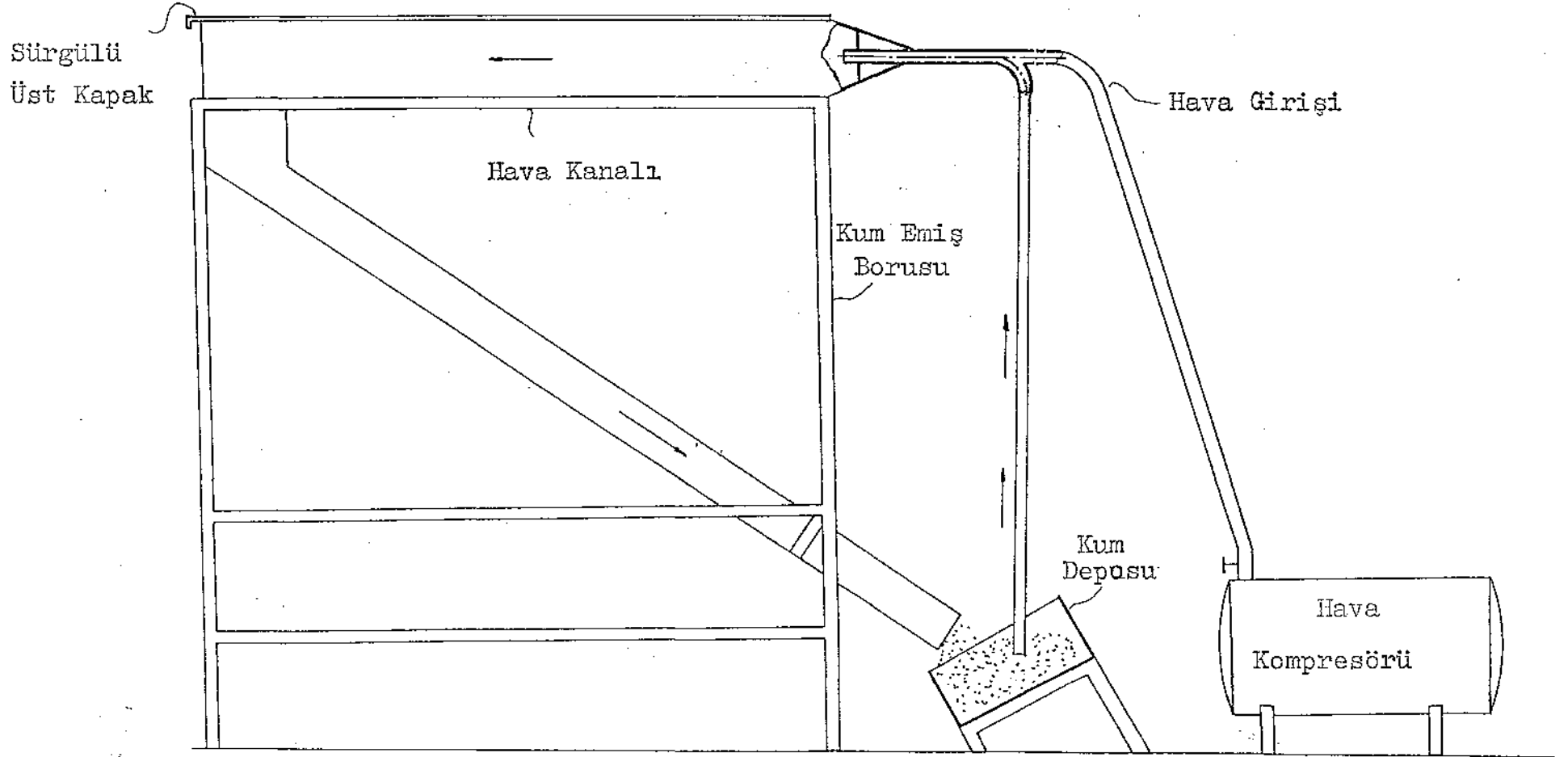
Deney seti esas itibariyle pnömatik (hava ile) kum taşınımını (geçişini) sağlayan 95 cm boyunda bir kare kesitli (15 x 15 cm) kanal ve dirseğinden oluşmaktadır. Sistemin öteki önemli birimi ise, taşınacak kumu kanala basıp püskürterek taşımayı sağlayacak olan basınçlı havanın temini için kullanılan kompresördür. Bu hava kompresörünün, kumu kanala püskürtüp taşımasının yanında, diğer en önemli bir görevi de kumun bulunduğu depodan vakumla çekilmesini sağlamasıdır. Kompresörün basınçlı havası hortumla, kanal girişindeki dirsek kısmına bağlanmış olup, böylece hem depodan emiş borusu vasıtasıyla kumun çekilmesi ve hem de bu kumun kanal içine püskürtülmesi aynı anda sağlanmaktadır.

Taşıyı elaman olarak boru yerine kare kesitli bir kanal kullanılmasının sebebi; aşınmaları ölçmede kullanılacak olan cihazın ölçme yapan hassas ucunun (prob), örneğin boru gibi dairesel geometriye sahip kıvrımlar üzerinde ölçü alamayışındır.

Deney serilerinden sonra kanal iç yüzeylerindeki aşınmaların cihazla tespit edilebilmesi için, taşıma kanalının üstü açılıp kapatılabilecek biçimde sürgülü yapılmıştır.

Pnömatik katı madde (kum) taşınması esnasında oluşan aşınmaların tespiti için kurulan bu deney setinde, direkt taşıyıcı elemanlardaki gerçek malzeme aşınmalarını belirleme

Şekil 6.1. Deney setinin şematik görünüşü.



yerine, taşıma kanalının iç yüzeylerine boya atılarak, bu boyanın aşınma miktarı ölçülmüştür. Bunun da sebebi, hidrolik taşıma sistemlerindeki gibi (direkt malzeme aşınmalarını belirleyebilen) ultrasonik ölçme yöntemi için gerekli çok pahalı kalınlık ölçer cihazları temin etme imkanımızın olmayışındır.

Ölçümler için kullanılan cihaz, ferromagnetik malzemeler üzerinde magnetik olmayan her türlü kaplama (bakır, çinko, kadmiyum, krom, fosfat, plastik, boya, emaye, vs.) kalınlığını ölçebilmektedir. Bu ölçme cihazı magnetik endüksiyon prensibi ile çalışır. Ölçme aralığı $0 - 3000 \mu\text{m}$ ($0 - 3 \text{ mm}$)'dir.

Deneylerde kullanılan kum meş eleğinden geçirilmiş olup tane iriliği $1,2 \text{ mm}$ 'dir.

Basıncılı havayı temin için 10 Atü 'lük max basınca sahip bir hava kompresörü kullanılmıştır. Deneyler $8 - 10 \text{ Atü}$ lük basınç değerleri arasında yapılmış olup, bu basınçta kanal içindeki hava akış hızı yaklaşık 20 m/s olarak ölçülmüştür.

6.4. Deneylerin Yapılışı ve Deney Sonuçları

6.4.1. Aşınmaların Zamanla Değişimini Tespit İçin Yapılan Deneyler

Deney serilerinin amacı, çalışma sürelerine bağlı olarak kanal iç yüzeylerinde ve dirsekte ne miktar aşınmanın meydana geleceğinin ölçülüp tespit edilmesidir.

Bu amaçla yukarıda tanıtılan deney setinde, deneylere geçmeden önce kanal taban ve üst kapağı ile kanal kenarlarının iç yüzeylerine üst üste 5 değişik renkte ve eşit kalın-

lıkta (25 μm) boya tabakaları atılmıştır. Her seferinde atılan değişik renklerdeki boyaların kalınlığı cihazla ölçülmüş ve yaklaşık 25 μm olduğu tespit edilmiştir. Üst üste eşit kalınlıkta atılan boyaların renkleri alttan üste doğru sırasıyla şöyleydi:

5 - Yeşil	25 μm
4 - Siyah	25 μm
3 - Kurşuni	25 μm
2 - Mavi	25 μm
1 - Kahverengi	+ 25 μm

125 μm (Toplam Boya Kalınlığı)

(Kanalın dört cidarında da aynı işlem yapılmıştır.).

Kanal iç yüzeylerine değişik renk boyalar atmadaki amaç, belirli deney aralıklarında üst.kapağı açıp yüzeylerdeki değişik yersel aşınmaların çıkan renklere göre gözlenmesiydi.

Nitekim çeşitli deney sürelerinden sonra kanal yüzeylerinde gözlenen aşınmalar Resim 3., 4., 5., 6., ve 7.'de görülmektedir. Resim 2. ise henüz deneylere başlamadan önceki kanal yüzeylerini göstermektedir.

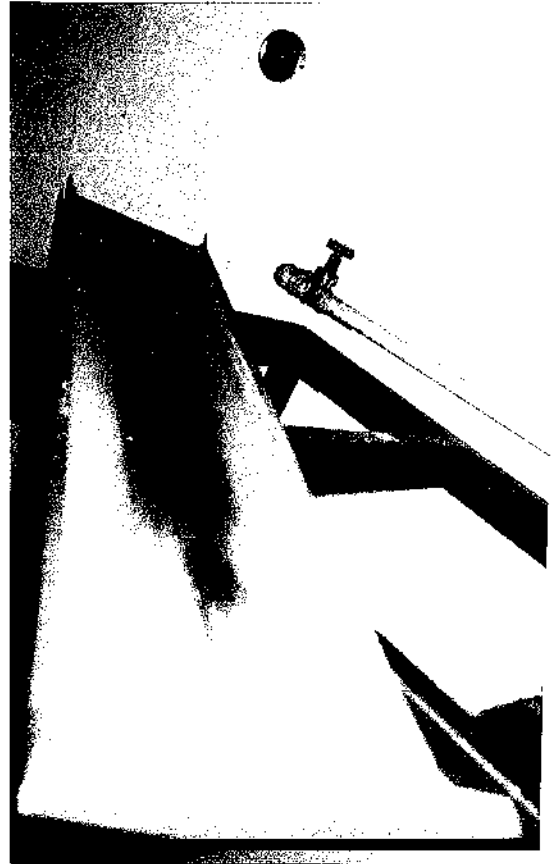
Deneyler, 10 Atü'lük basınç ve 20 m/s'lik hava hızında, 1,2 mm tane iriliğine sahip kum ile yapılmıştır. Vakumla çekilen kumun kütsel debisi 2 kg/dak olarak tespit edilmiştir. Yaklaşık 20 dakikalık sürede kullanılan kompresörün basıncı 8 Atü'nün altına düştüğünden, hava hızı azalmasından dolayı



Resim 2. Beş kat boya atıldıktan sonra, deney yapılmadan önceki kanal yüzeylerinin görünüşü.



Resim 3. 4 saatlik deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü.



Resim 4. 6 Saatlik deney süresinden sonra üst kapağın görünüşü.



Resim 5. 8 Saatlik deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü.



Resim 6. 10 Saatlik deney süresinden sonra kanal yüzeylerinin görünüşü.



Resim 7. Toplam 12 Saatlik deney süresinden sonraki kanal yüzeylerinin görünüşü.

vakumla çekilen kumun kütleli dehisinin azaldığı saptandığından, her 20 dakikada bir kompresör hava çıkışı kapatılarak kompresör deposu yeniden doldurularak deneyler sürdürülmüştür. Toplam 60 dakikalık çalışma süresinden sonra dirsek kısmının tamamen aşındığı saptanmıştır.

6.4.1.1. Ölçüm Değerlerinin Alınması

Her 1 saatlik deney süresinden sonra ölçme cihazı ile boya kalınlıkları tespit edilmiştir. Boya kalınlıkları ölçülürken şöyle bir yol izlenmiştir: Önce her dört kanal iç yüzeyinde, enine kanal kesiti boyunca 2'şer cm aralıkla (yalnız bir kesitte) toplam 7 noktada olmak üzere boya kalınlıkları cihazla tespit edilmiştir. Bu aşınma değerleri toplanıp ölçüm sayısına (7'ye) bölünerek bir kesitteki ortalama aşınma değeri tespit edilmiştir. Bu işleme kanal uzunluğu boyunca her 4 cm aralıklarla yeni kesitler üzerinde (yine 7 noktada olmak üzere) değerler alınıp ortalamaları bulunmak suretiyle devam edilmiştir (Tablo 6.1.). Böylece kanal boyunca toplam 23 tane enine kesitin ortalama aşınma değerleri bulunmuş ve bu değerler de toplanıp kesit sayısına bölünerek bir enine kanal kesitindeki ortalama tek aşınma değeri tespit edilmiştir. Bu değer 1 saat aralıklı deney süreleri için her dört kanal iç yüzeyi için de hesaplanmıştır. Daha sonra acaba (15 x 15 cm) enine kesitli kanala eşdeğer çaplı bir boru kullanılsaydı ne kadarlık bir aşınma olacağı araştırılmıştır. Bu amaçla her 1 saatlik deney süreleri için ayrı ayrı dört kanal yüzeyinde meydana gelen aşınma değerleri toplanıp yüzey sayısına bölünerek ortalama bir aşınma değeri tespit edilmiştir (Tablo 6.1.).

Toplam 12 saatlik çalışma süresinde her 1 saat aralıklarla yukarıda açıklandığı gibi tespit edilen aşınma değerleri, kanal yüzeyleri ve eşdeğer çaplı boru için ayrı ayrı zamana bağlı olarak Şekil 6.2., 6.3., 6.4., 6.5. ve 6.6.'da diyagram halinde gösterilmiştir.

Diyagramlardan da görüldüğü gibi yaklaşık 4 saatlik deney süresinden sonra aşınmanın hemen hemen hiç olmadığı veya çok az olduğu saptanmıştır. 4. saat ve 5. saatten sonraki ortalama aşınmanın birbirine çok yakın değerler olduğundan, 5 saatlik deney periyodundan sonra her 4 saatten bir deney kumu değiştirilip taze kum verilmiştir. Çünkü kanal içine püskürtülen kum tekrar devridaim ile kanala basıldığından, kumun tane keskinliğinin azalabileceği düşünülmüştür.

6.4.2. Aşınmaların Kanal Yüzeylerinde Yersel (Noktasal)

Olarak Değişimi

Kanal yüzeylerindeki aşınmaların kanuma bağlı olarak tespiti, toplam 12 saatlik deney süresi tamamlandıktan sonra yine enine 23 kesitte ortalama aşınmalar ölçülerek yapılmıştır.

Yukarıda açıklandığı gibi enine kesitlerin ortalama değerleri her 4 cm aralıklarla kanal boyunca tespit edildikten sonra, kanalın dört yüzeyi ve eşdeğer çaplı boru için Tablo 6.2, 6.3., 6.4.'de verilmiştir. Bu tablo değerlerine göre çizilen Diyagramlar ise Şekil 6.7., 6.8., 6.9., 6.10. ve 6.11.'de gösterilmiştir.

6.5. Deney Sonuçları

Aşınmanın zamanla değişimini gösteren diyagramlardan da görüleceği gibi, 5 saatlik deney süresinden sonra bulunan aşınma değerinin 4 saatten sonra pek artmadığı hatta sabit kaldığı ortaya çıkmıştır. Bu durum kullanılan kumun devamlı devridaim yaptırılmasından dolayı tane keskinliğinin giderek azalmış olacağı şeklinde yorumlanabilir. Kullanılan kumun 5 satten sonra değiştirilmesi ile aşınma miktarı zamana bağlı olarak yine lineer bir şekilde artmıştır. 4. ve 5. satten sonraki aşınma değerleri birbirine çok yakın olduğundan, kum tane keskinliğinin 4. saatten sonra hemen hemen hiç aşındırıcı özellik göstermeyecek oranda azalmış olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçtan hareketle 5.saatten sonra, bir evvelki aşınma değeri çok az artmış olduğundan, deneyde kullanılan kum değiştirilip taze kum verilmiştir. Kumun tane keskinliği 4 saatten çok düştüğünden, 5. saatten sonra 4 saatlik bir çalışma süresi sonunda (yani 9. saatten sonra) kum yeniden değiştirilmiştir.

Tablo 6.1.'e bakıldığında kanal tabanındaki aşınma değerlerinin diğer yüzeylerdeki aşınmalara oranla daha yüksek olduğu görülür. Bu durum ise her 20 dakikada bir kum emişinin azalmasından dolayı kompresörün durdurulması esnasında kum tanelerinin kanal tabanına çökmesi ve tekrar çalışmaya geçildiğinde tabanda biriken bu kumların sürüklenmesi (erozyonu) ile aşınmanın daha da artması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca yerçekimi etkisiyle alt yüzeye çarpan kum miktarının da diğer yüzeylere çarpan miktarlardan fazla olacağı açıktır.

Bu yüksek aşınma, borularla taşıma sistemlerinde borula-

rın ters çevrilmesine benzer şekilde, kanal 180° ters çevrilerek azaltılabilir. Bu yolla tabandaki büyük aşınmalar karşı yüzeye yönlendirilmiş olur. Böylece taşıma elemanının (burada kanalın) kullanma ömrü daha da arttırılmış olur.

Deneylerden çıkan diğer önemli bir sonuç ise Şekil 6.7., 6.8., 6.9., 6.10. ve 6.11.'deki diyagramlarda da görüleceği üzere, aşınmaların kanalın orta kısımlarında daha yüksek olmasıdır. Bu durum ise kumu püskürtme açısı ile açıklanabilir. Kum çekiş borusu çapının küçük olması ve hava akış hızının homojen bir dağılım sağlayacak şekilde tam ayarlanmaması, bu durumun etkenleri olarak tahmin edilmektedir. Örneğin kanal dirseğine kum taneleri direkt çarptığından boya tabakları tamamen kalkmıştır.

Ayrıca 12 saatlik toplam deney süresinden sonra boya özelliğinden dolayı, alttaki kahverengi boya tabakası gözlemedi. Bunun da sebebi boya tabakası çok incelliğinden mavi boyadan sonra boyanın tamamen tabaka tabaka kalkmasıdır.

BULGULAR

Pnömatik katı madde taşınmasındaki aşınmaların incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda şu bulgular tesbit edilmiştir :

1- Sistemi besleyen kompresörlerin basıncı, katı maddenin çökmesine meydan vermeyecek seviyede olmalıdır. Bu sağlanamadığı takdirde özellikle yatay taşımacılıkta tabanda katı madde birikebildiğinden, bu katı madde borunun tıkanmasına neden olabilmektedir. Tabanda katı madde birikimi, o noktalarda erozyon aşınmasını arttırabilmektedir.

2- Deney sonuçlarında da belirtildiği gibi 90° lik dirsekte yaklaşık 1 saat içerisinde 125 m kalınlığındaki boyanın tümünden kalktığı saptanmıştır. O halde sistemler kurulurken mümkün mertebe 90° lik dirseklerden kaçınılmalıdır. İdeal dirsek açısı, yatay eksenle 40° yi aşmaması tavsiye edilir.

3- Pnömatik taşımacılıkta taşınmanın yapılacağı uzaklık önemli bir husustur. Örneğin hidrolik taşımacılıkta dünyada 450 Km mesafeye taşımacılık yapılabilirken pnömatik taşımacılıkta bu mesafe 3 Km de bir kompresör istasyonları kurulacak şekilde yapılmaktadır. Çünkü hava genleşebilen özelliklere sahiptir. Basınç çok yükseldiğinde ses üstü hızlara varılabileceği unutulmamalıdır. Ses üstü hızlara erişildiğinde sistemde titreşimlere ve ara ara basınç patlamaları olabilecektir.

4- Cidarlardaki sürtünmelerin asgariye indirilmesi amacıyla sistemde kullanılan taşıma borularının mümkün olduğunca düğey yerleştirilmesi önerilir.

5- Aşınmayı azaltmak için boru sistemleri içerisine seramik malzeme kullanılması düşünülebilir.

Tablo 6.1 Kanal Yüzeylerinde Deney Sürelerine Bağlı Olarak
Enine Kesitler Boyunca Ortalama Aşınma Değerleri.

Kanal Yüzeyleri	D e n e y s ü r e l e r i (saat)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Ortalama Aşınma Değerleri (μ m)											
Sağ Kenar	4	8	11	14	15	20	25	29	32	37	39	40
Sol Kenar	3	7	10	13	13	18	24	28	30	34	37	39
Kanal Tabanı	5	10	13	17	19	25	28	32	34	39	40	41
Kanal Üst Kapağı	4	8	10	13	14	19	23	26	29	33	35	37
Eşdeğer Çaplı Boru	4	8	11	14	15	20	25	29	31	36	38	39

Tablo 6.2 Sağ ve Sol Kenarlarda, Kanal Boyuna Göre
Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri (μm).

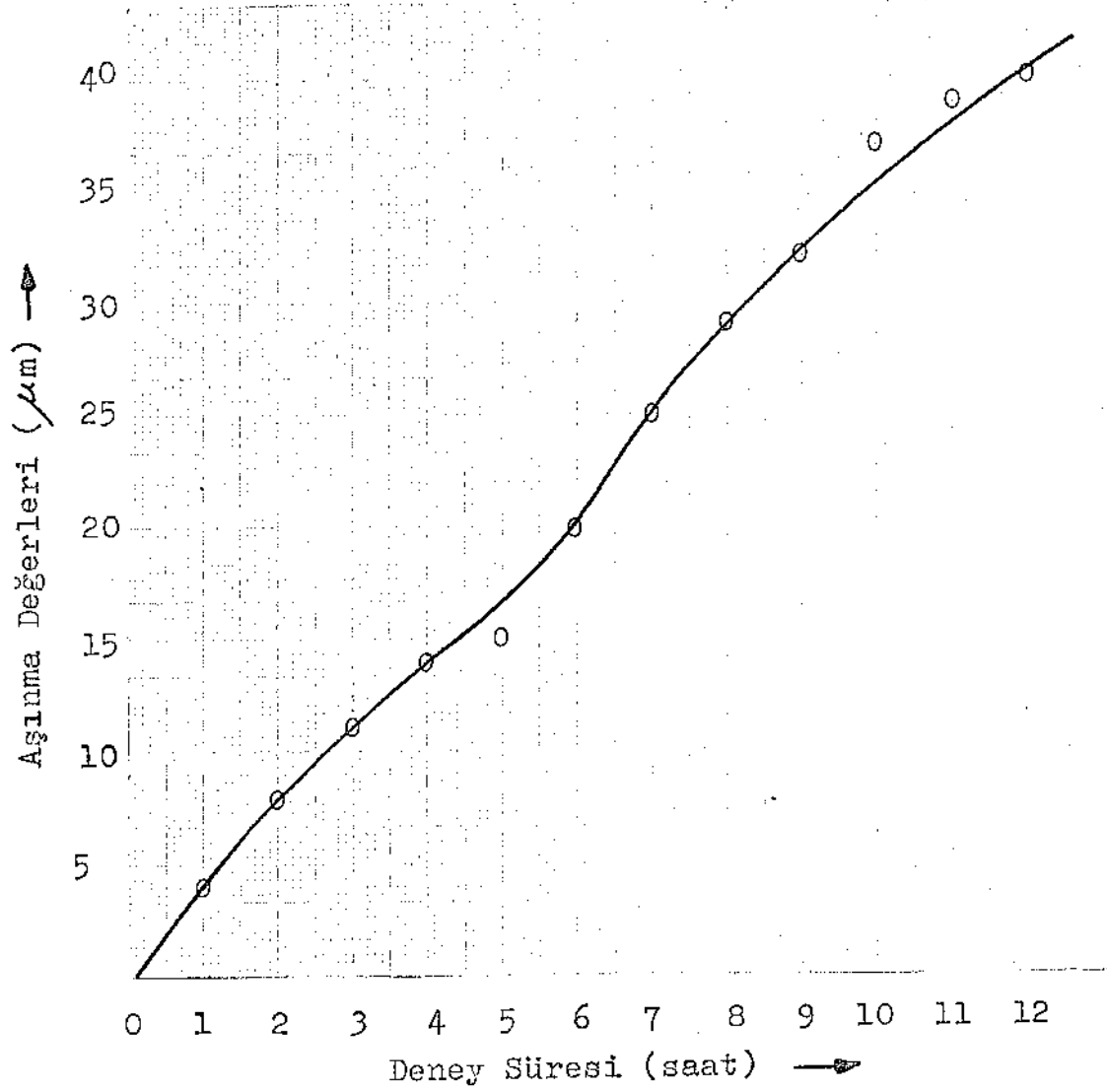
Kanal Boyuna (cm)	Sağ Kenar Genişliği (cm)							Enine Ort. Aşınma	Sol Kenar Genişliği (cm)							Enine Ort. Aşınma
	2	4	6	8	10	12	14		2	4	6	8	10	12	14	
	Aşınma Değerleri (μm)															
4	10	15	15	30	25	20	10	18	5	10	20	30	25	15	5	16
8	5	15	25	40	35	20	15	22	10	15	15	25	30	25	15	19
12	10	20	20	35	40	25	15	24	15	25	25	30	15	20	15	21
16	10	30	35	45	35	25	15	28	15	30	25	35	30	20	20	25
20	15	35	40	40	30	25	20	29	20	40	35	40	30	25	15	29
24	25	35	50	50	40	35	20	36	25	40	55	50	35	30	20	36
28	30	40	50	55	45	35	25	40	30	50	55	55	50	45	35	46
32	35	50	60	65	50	45	40	49	35	45	60	60	55	45	35	48
36	40	60	65	70	55	60	45	56	35	50	60	75	65	55	40	54
40	45	55	65	65	70	60	50	59	45	55	65	60	45	40	40	50
44	45	55	60	55	70	50	50	55	45	60	70	70	65	50	45	58
48	40	60	70	75	70	50	40	58	40	55	75	65	65	45	35	54
52	50	45	60	75	65	45	40	54	45	50	65	70	55	50	40	54
56	45	60	70	70	55	35	60	52	40	55	60	60	50	45	35	49
60	50	45	60	75	65	45	40	54	45	60	50	55	45	35	40	47
64	45	50	65	50	45	50	45	50	40	55	55	60	50	45	45	50
68	45	45	50	50	40	45	35	44	35	45	50	50	60	40	40	46
72	40	35	50	60	45	40	30	43	25	40	55	50	45	35	30	40
76	35	45	50	50	45	35	25	41	30	35	45	55	40	30	25	37
80	30	40	45	50	40	35	20	37	25	30	50	55	40	35	25	37
84	20	30	35	45	35	30	15	30	15	25	40	45	35	25	10	28
88	10	25	30	35	40	25	20	26	10	20	35	30	30	25	10	24
92	10	15	25	20	30	25	15	20	10	15	20	30	20	15	5	18

Tablo:6.3. Kanal Tabanında ve Üst Kapakta, Kanal Boyuna Göre Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri (μm).

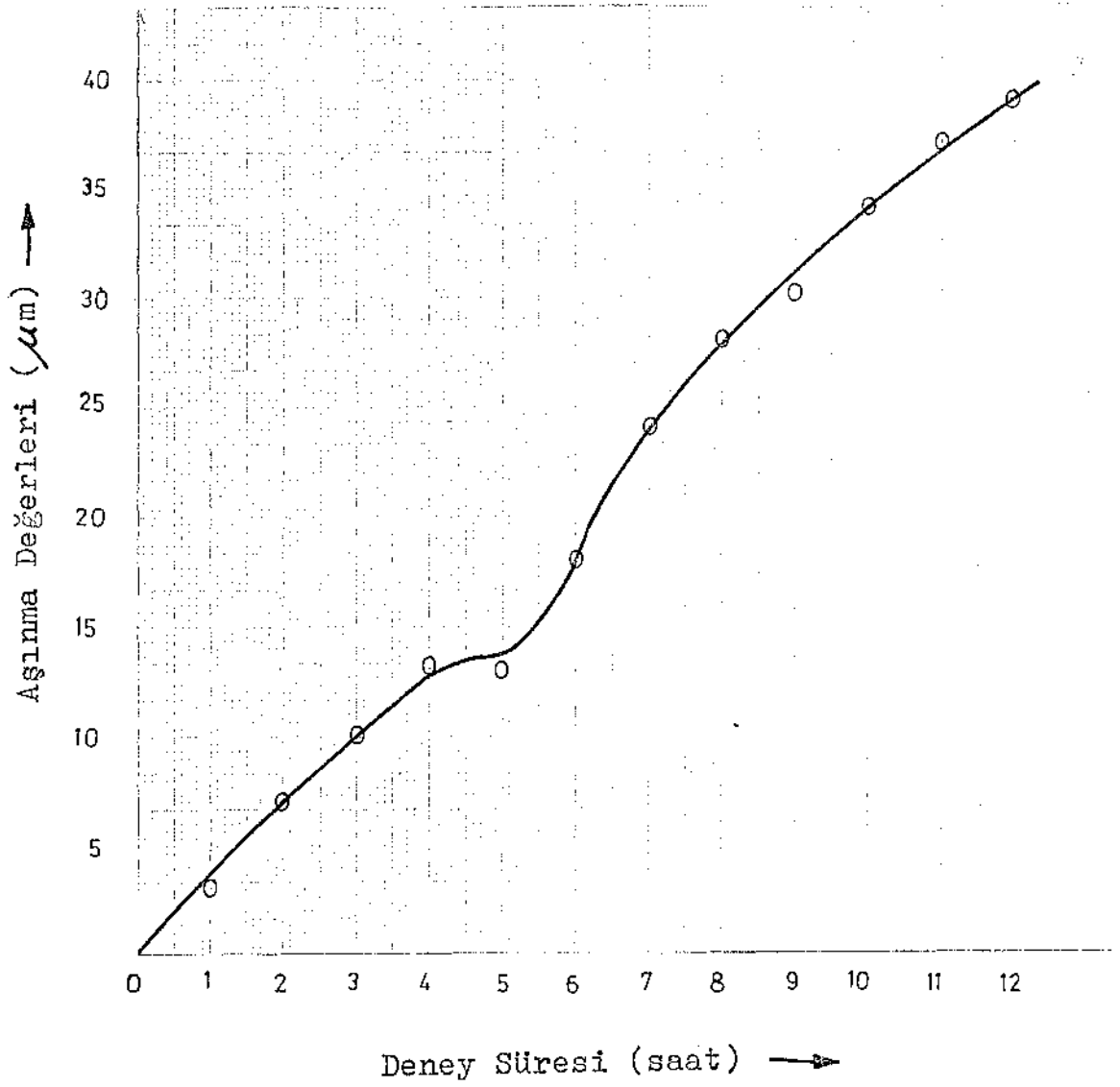
Kanal Boyu	Kanal Taban Genişliği (cm)								En.Ort. Aşınma	Üst Kapak Genişliği (cm)								En.Ort. Aşınma
	2	4	6	8	10	12	14	2		4	6	8	10	12	14			
	Aşınma Değerleri (µm)																	
4	10	20	35	30	25	15	15	21	5	15	30	35	25	20	15	21		
8	10	20	30	35	30	20	15	23	10	20	35	30	25	25	15	23		
12	15	30	40	35	30	30	20	29	15	25	30	30	35	25	20	26		
16	10	25	35	40	30	30	20	27	15	30	35	40	35	30	15	29		
20	20	30	40	50	40	35	25	34	15	30	40	50	35	30	25	32		
24	20	35	45	40	45	25	15	32	25	35	35	30	35	25	20	29		
28	25	40	45	50	45	35	30	39	30	35	40	40	25	30	35	34		
32	35	50	55	50	50	50	40	47	30	45	40	35	35	30	35	36		
36	45	50	65	65	60	45	50	54	40	45	55	45	45	35	40	44		
40	50	60	70	65	60	50	45	57	45	50	65	60	50	45	45	51		
44	50	60	55	70	65	60	50	59	50	65	65	70	50	45	45	56		
48	50	65	75	75	60	60	55	63	50	55	60	75	70	45	50	58		
52	50	60	65	70	65	50	50	59	45	60	65	60	60	50	45	55		
56	45	55	70	70	60	50	50	57	40	55	70	60	50	45	40	51		
60	40	50	65	70	60	50	40	54	35	45	60	50	55	50	40	48		
64	45	45	50	45	45	50	40	46	40	45	55	55	35	40	40	44		
68	35	45	50	50	40	40	35	42	35	40	45	50	45	40	30	41		
72	40	35	50	45	40	35	35	40	30	40	55	45	50	30	35	41		
76	30	40	45	35	40	35	25	36	30	45	35	50	50	30	25	38		
80	35	30	45	30	35	30	25	33	30	30	35	25	30	25	20	28		
84	25	25	40	30	30	25	30	29	25	25	30	30	25	30	20	26		
88	15	25	30	35	35	25	20	26	15	20	30	25	20	15	10	19		
92	15	25	35	40	25	20	15	25	15	10	15	20	25	15	10	16		

Tablo 6.4. Kanal Yüzeylerinde ve Eşdeğer Çaplı Boruda Kanal Boyuna Göre Enine Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri

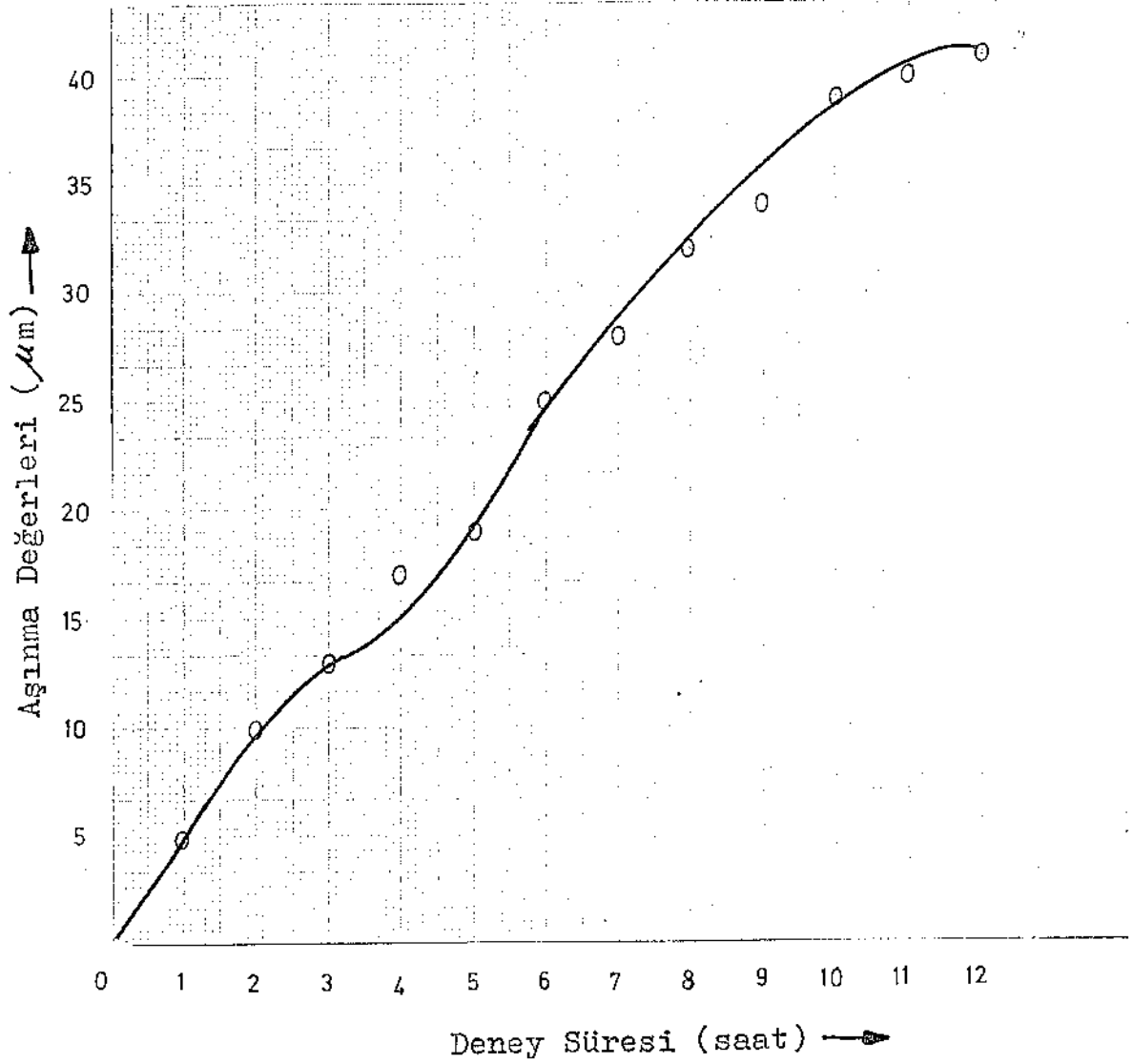
Kanal Boyu (cm)	Sağ Kenar	Sol Kenar	Kanal Tabanı	Kanal Üst Kapağı	Kare Kesitli Kanala Eşdeğer Çaplı Boru
Enine Kesitler Boyunca Alınmış Ortalama Aşınma Değerleri (μm).					
4	18	16	21	21	19
8	22	19	23	23	22
12	24	21	29	26	25
16	28	25	27	29	27
20	29	29	34	32	31
24	36	36	32	29	33
28	40	46	39	34	40
32	49	48	47	36	45
36	56	54	54	44	52
40	59	50	57	51	54
44	55	58	59	56	57
48	58	54	63	58	58
52	54	54	59	55	55
56	52	49	57	51	52
60	54	47	54	48	51
64	50	50	46	44	48
68	44	46	42	41	43
72	43	40	40	41	41
76	41	37	36	38	38
80	37	37	33	28	34
84	30	28	29	26	28
88	26	24	26	19	24
92	20	18	25	16	20



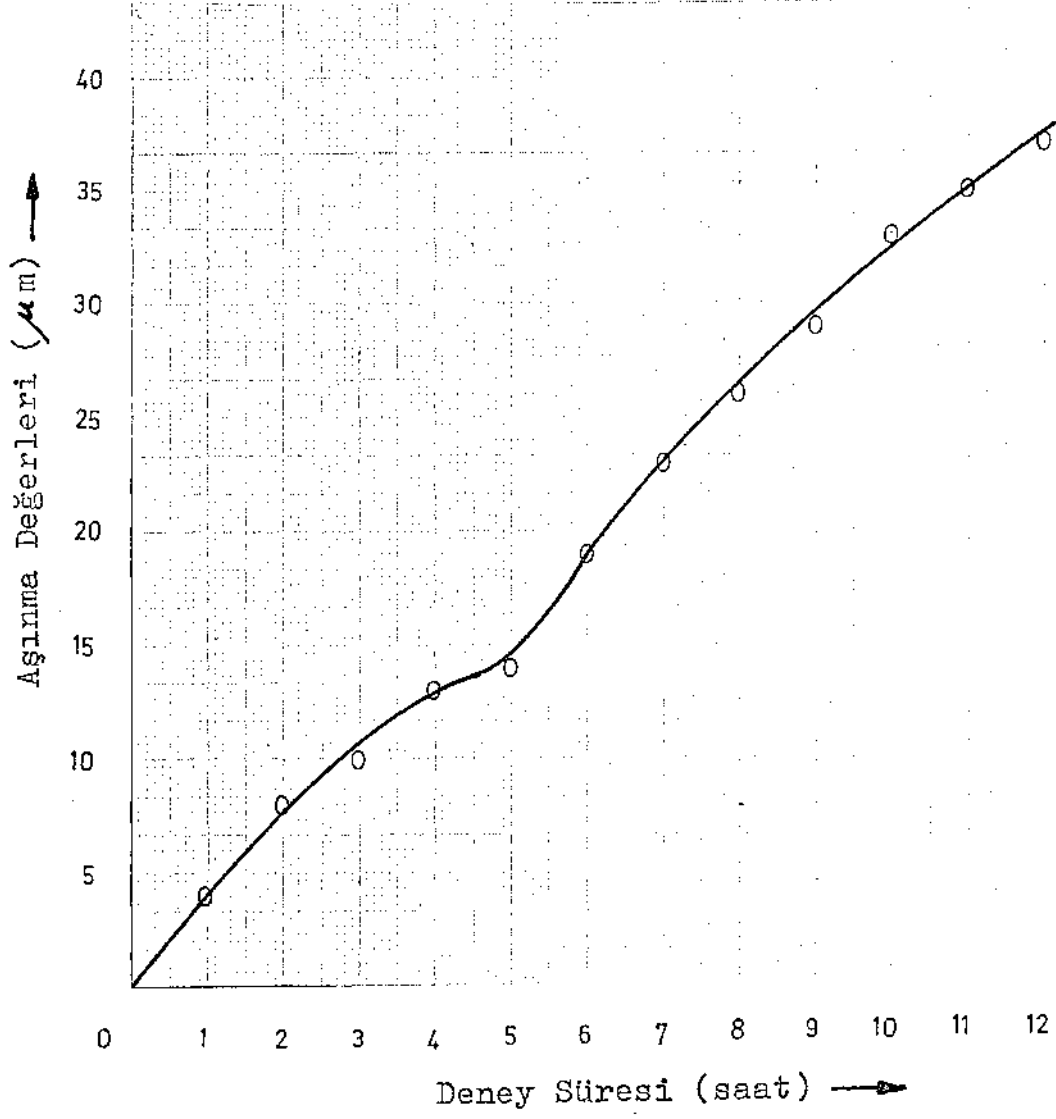
Şekil 6.2. Sağ kenarda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi



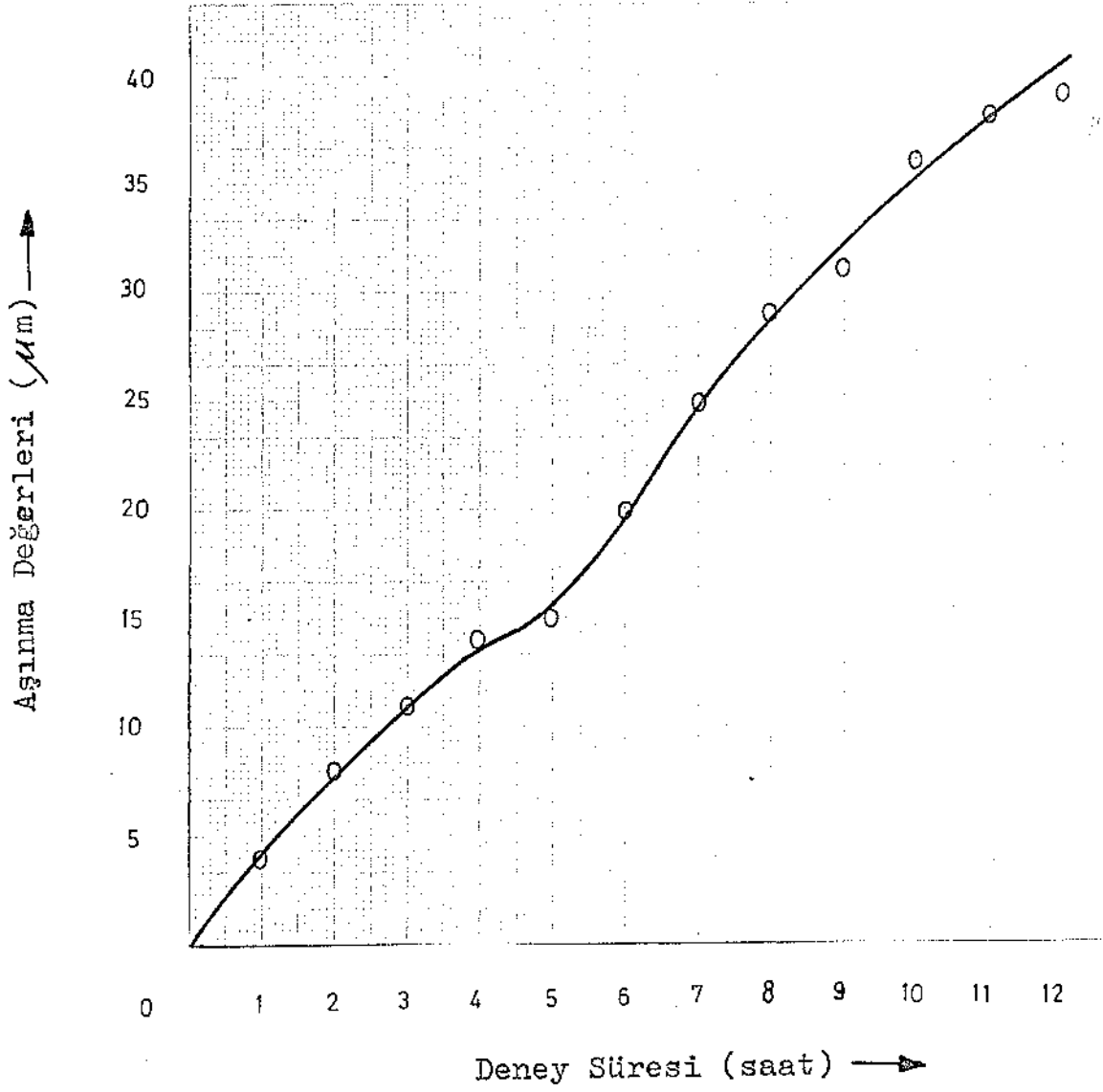
Şekil 6.3. Sol kenarda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi.



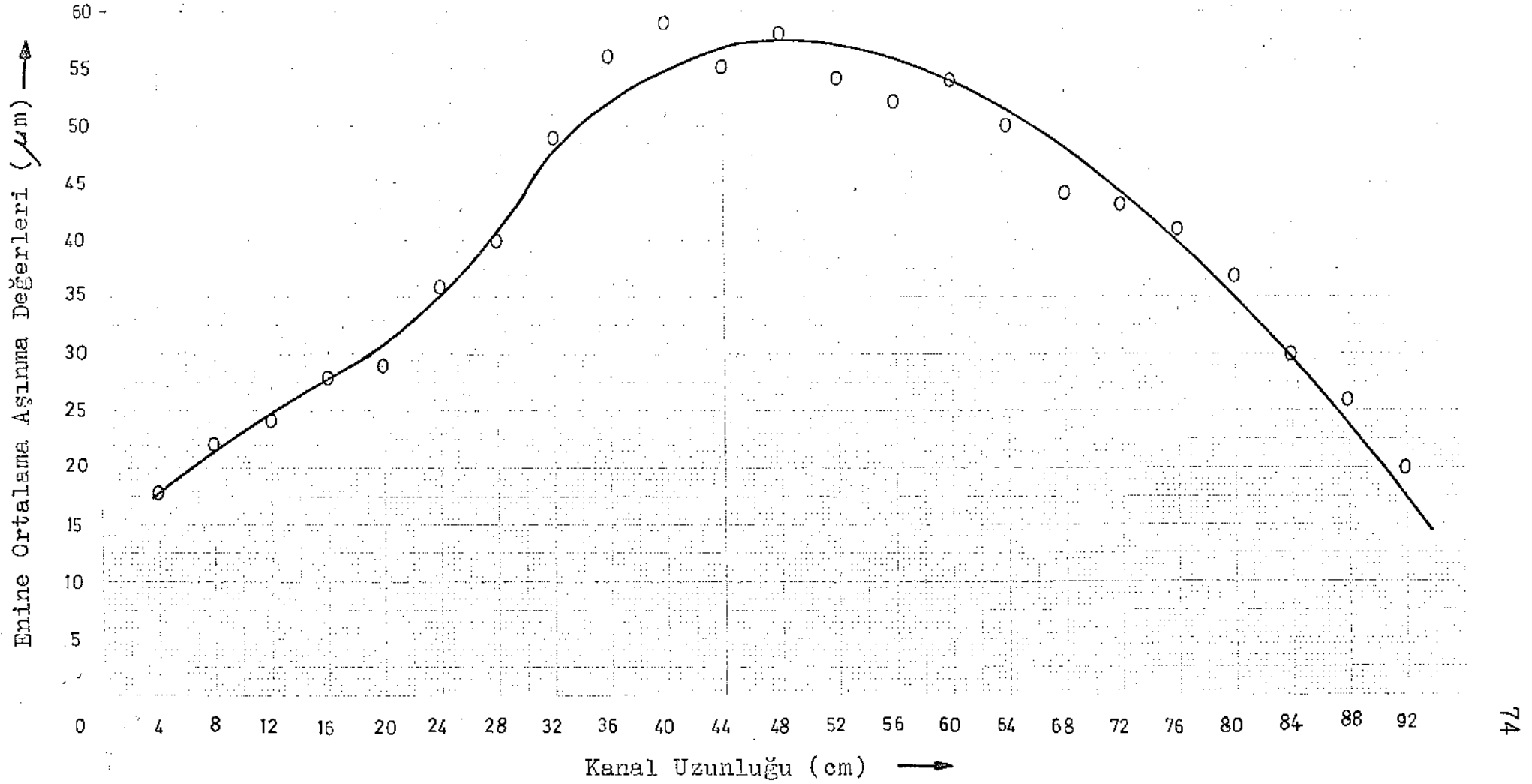
Şekil 6.4. Kanal Tabanında deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi.



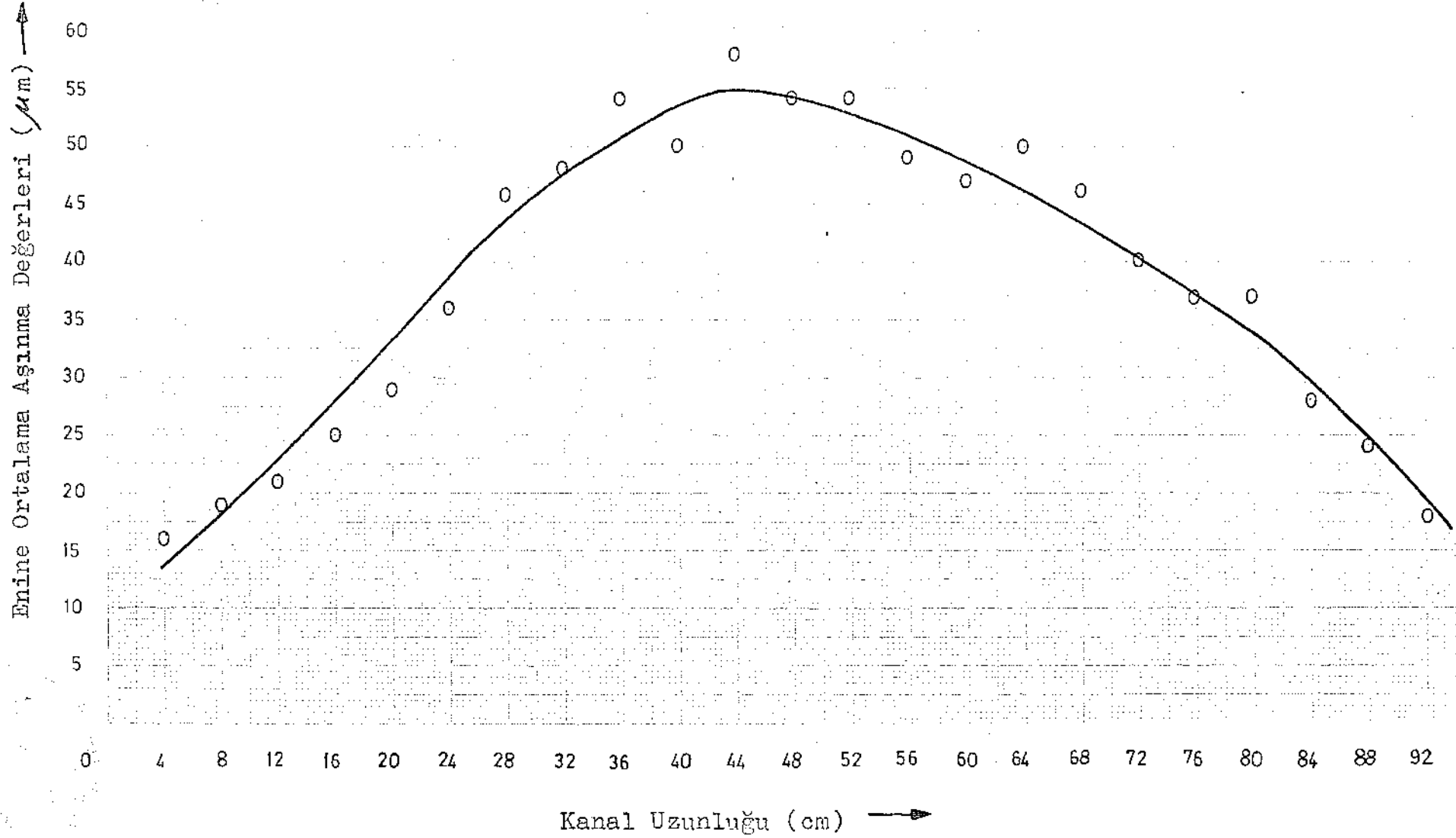
Şekil 6.5. Kanal üst kapağında deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi.



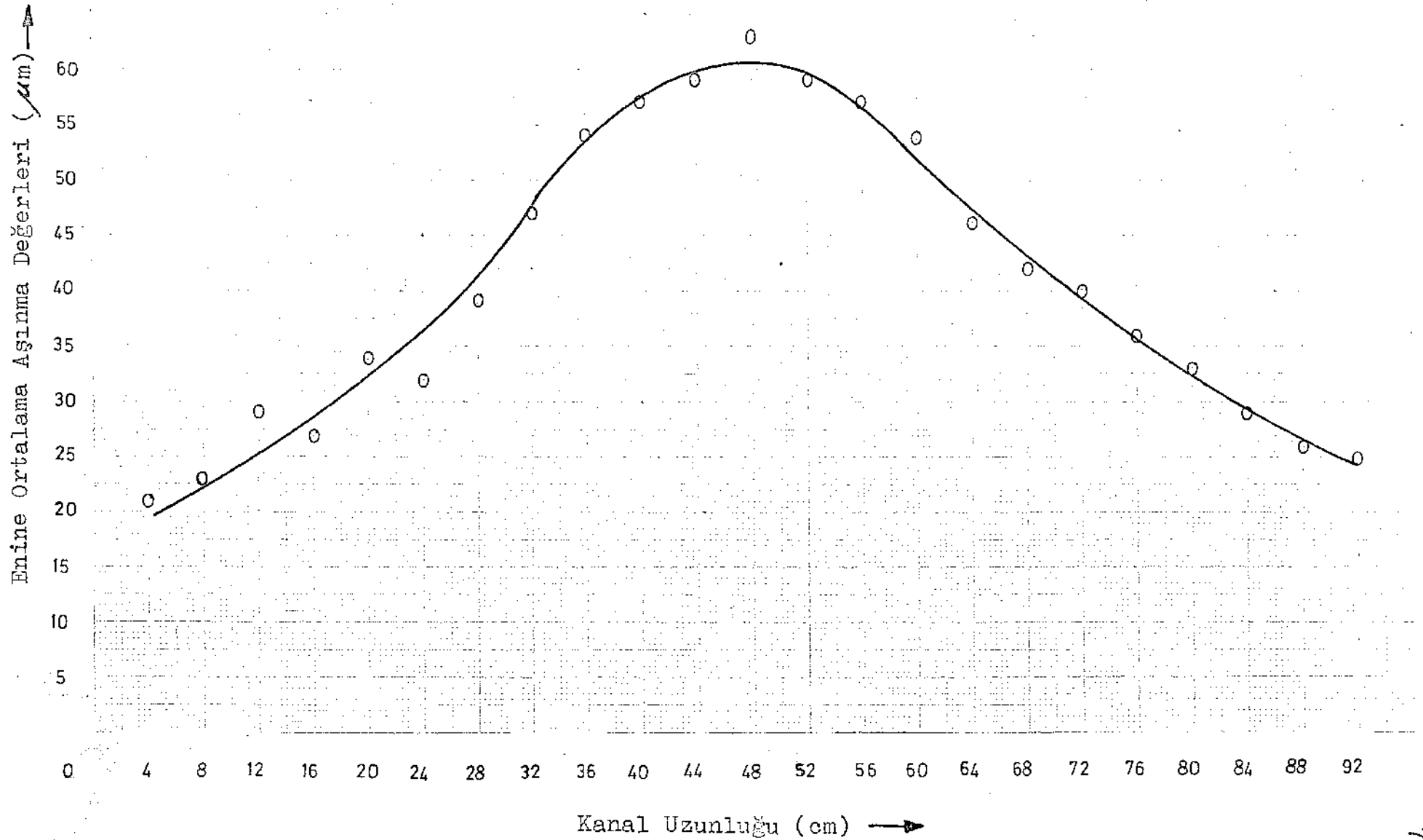
Şekil 6.6. Eşdeğer çaplı boruda deney süresine bağlı olarak aşınmanın değişimi.



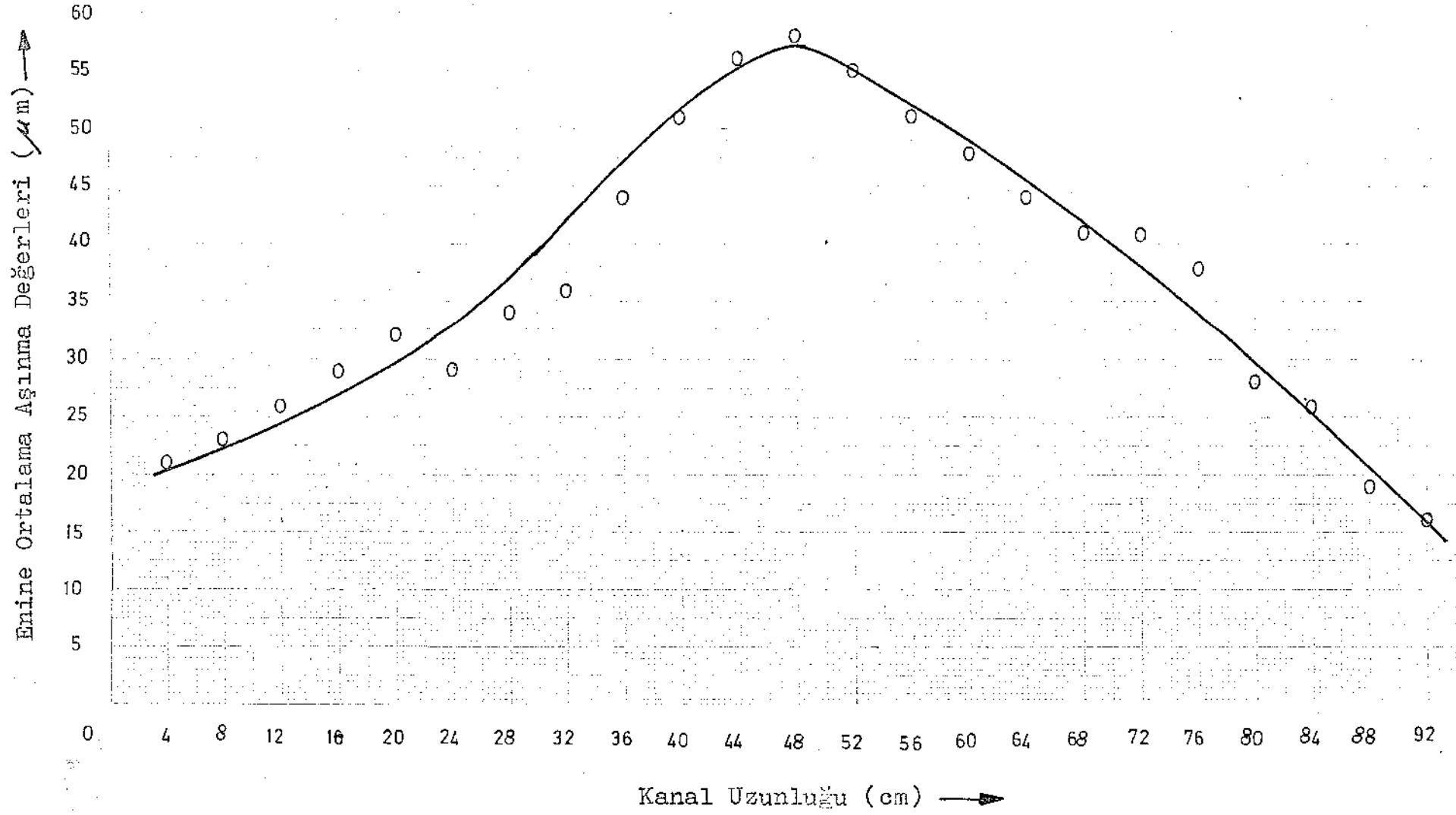
Şekil 6.7. Sağ kenarda, kanal uzunluğuna bağlı olarak enine alınmış ortalama aşınma değerleri



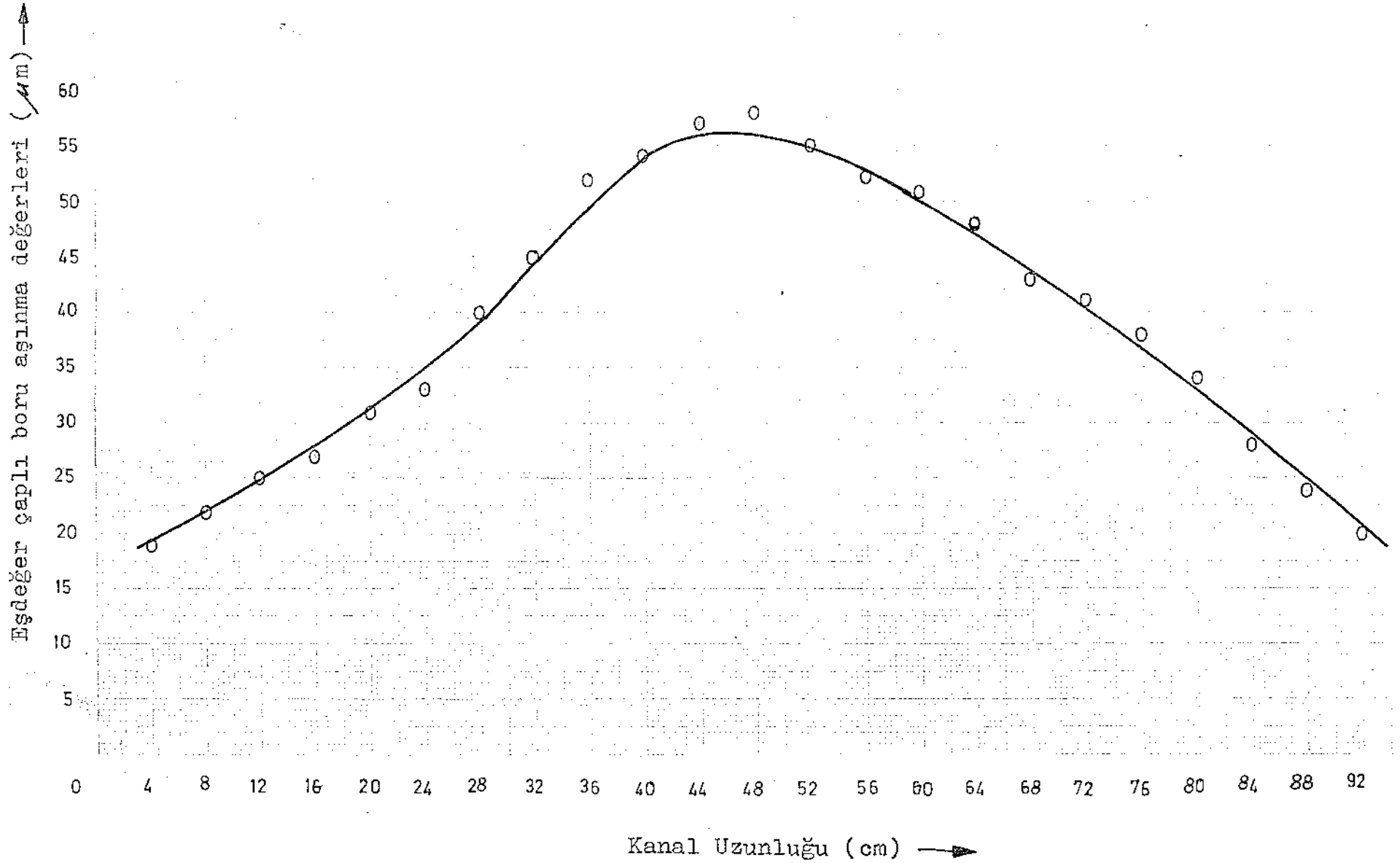
Şekil 6.8. Sol kenarda, kanal uzunluğuna bağlı olarak enine alınmış ortalama aşınma değerleri



Şekil 6.9. Kanal Tabanında, kanal uzunluğuna bağlı olarak enine alınmış ortalama aşınma değerleri.



Şekil 6.10. Üst kapakta, kanal uzunluğuna bağlı olarak enine alınmış ortalama aşınma değerleri.



Şekil 6.11. Eşdeğer çaplı boruda, kanal uzunluğuna bağlı olarak enine kesitlerdeki ortalama aşınma değerleri.

REFERANSLAR

1. Scheurell, H.-G.: Rohrverschleisschätzung bei hydraulischem Transport von Festen Stoffen. Maschinenmarkt, Würzburg 91 (1985) 61, S. 1155 - 1157.
2. Egiyok, G., "Borularla Katı Maddenin Hidrolik Taşınımı ve Kritik Hızın Deneysel Olarak Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi., İstanbul, 1986.
3. Avcı, İ.: "Borularla Katı Maddenin Hidrolik Taşınımında Kritik Hızın Deneysel Olarak Belirlenmesi", İ.T.Ü. İnş. Fak., Doçentlik Tezi, 1982.
4. O.D.T.Ü. Müh.Fak., İnşaat Müh.Bölümü, Hidrolik Lab.:
"Hasançelebi - İskenderun Arasında Boru Hattı ile Demir Cevheri Taşınması Teknik ve Mali Fizibilite Etüdü", O.D.T.Ü. Raporu, UKİ Yayın No: 5.129, (Şubat 1978).
5. Wasp, E.J., Thomson, T.L. ve Aude, T.C.: "Process Basis and Economics of Pipeline Systems", The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, P.1373 - 83, (Dec., 1970).
6. Durand, R.: "Basic Relationships of the Transporttation of Solids in Pipes - Experimental Research", Proceedings, 5th Congress of I.A.H.R., Minneapolis, Minn. USA. (1953).
7. Newitt, D.M., Richardson, J.F., Abbott, M. ve Turtle, R.B.: "Hydraulic Conveying of Solids in Horizontal Pipes", Trans. Inst. of Chemical Eng., Vol. 33, p. 93 -113, (1955).
8. Aude, T.C., Cowper, N.T., Thonson, T.H. ve Wasp, E.J.:
"Slurry Piping Systems: Trends, Design Methods, Guidelines", Chem.Eng. 78,14, p.74-9, (June 28, 1971).

9. İ.T.Ü.İnşaat Fak. Hidrolik Kürsüsü: "Boru Hatlarının Teknik ve İşletme Karakteristikleri, Alt Yapı Maliyeti ve İşletme Giderleri", İ.T.Ü.Raporu, Uki Yayın No (199.008). Uki 5.094, (Mayıs, 1976).
10. Gediktaş, M.: "Sürtünme ve Aşınma", İ.T.Ü.D, Cilt 28, Yıl 28, Sayı 3, S. 21, 26, (1970).
11. Gürleyik, M.Y., "Makina Mühendisliğinde Aşınma Olayları", K.Ü., Trabzon, 1987.
12. Yurderi, F.,: "Aşınmaya Dayanıklı Malzemelerin Aşınma Özelliklerine Metalurjik ve Diğer Faktörlerin Etkileri", İ.T.Ü., İstanbul, 1982,
13. Okur, İ.: "Orta Karbonlu Çeliklerde Temperleme Sıcaklığının Aşınma Direncine Etkisi", F.Ü.Mak.Müh.Böl., Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 1988.
14. Kragelsky, I.V., Dobichin, M.N., Komalov, V.S., "Friction and Wear", Calculation Methods, U.S.S.R., 1980.
15. Gürleyik, M.Y., "Hasar Bilgisi", K.Ü.Mak.Müh.Böl. Yayın No:3, Trabzon, 1976, s. 131-143.
16. Yurderi, F., "Aşınmaya Dayanıklı Malzemelerin Aşınma Özelliklerine Metalurjik ve Diğer Faktörlerin Etkileri", İ.T.Ü., Y.Lisans Tezi, 1982, s. 8-21.
17. Wiedenroth, W.: Verschleiß Bei Hydraulischem Feststofftransport., Maschinenmarkt 76(1970), 35, S. 742 - 747.
18. Wiedenroth, W.: In Hydraulischen Förderanlagen Verschleiß Mindern durch Kunststoffauskleidungen., Maschinenmarkt 81 (1975), 33, S. 582 - 585.

19. Scheurell, H.G.: Rohrverschleiß beim Hydraulischen Feststofftransport., Dissertation, TH Karlsruhe, 1985.
20. Czichos, H.: Tribology. Amsterdam, Oxford, NewYork: Elsevier 1978.
21. Khrushov, M.M: Principles of Abrasive Wear. Wear 28 (1974) 1, S. 69 - 88.
22. Koch, K.R.: Parameterschätzung und Hypothesentests in Linearen Modellen. Bonn: Dümmler-Verlag 1979.
23. Wiedenroth, W.: Untersuchungen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen., Diss. Hannover 1967.
24. Wiedenroth, W.: The Influence of Sand and Gravel on The Characteristics Ofcentrifugal Pumps, some Aspects of Wear in Hydraulic Transportation Installations., Proceedings of Hydrotransport 1, Coventry, 1970.
25. Jacobs, B.E.A.: The Measurement of Wear Rates in Pipes Carrying Abrasive Slurries., Proceedings of Hydrotransport 8, Johannesburg, 25, 27.8.1982.
26. Wiedenroth, W.: Möglichkeiten zur Messung des Verschleißes beim Hydraulischen Feststofftransport. Aufbereitungs-Technik (1985), 1, S. 19 - 27.
27. De Bree, S., Rosenbrand, W., und de Gee, A.: On the erosion resistance in water-sand mixtures of steels for application in slurry pipelines., Proceedings of Hydrotransport 8, Johannesburg, 25.-27.8.1982.