

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

114395

PETROL BORU HATLARINDA SÜRTÜNME
KAYIPLARININ AZALTILMASI

Tarkan KOCA

114395

YÜKSEK LİSANS TEZİ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ

2001

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PETROL BORU HATLARINDA SÜRTÜNME KAYIPLARININ
AZALTILMASI

Tarkan KOCA

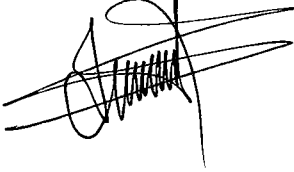
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez, 2021/2022 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği
/Oyçokluğu İle Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)

Danışman

Yrd.Doç.Dr.Aydın ÇITLAK



(İmza)

Üye

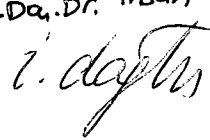
Yrd. Doç. Dr. Haydar BİZEN



(İmza)

Üye

Yrd. Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../.....
tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PETROL BORU HATLARINDA SÜRTÜNME KAYIPLARININ
AZALTILMASI

Tarkan KOCA

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
2001,Sayfa:74

Günümüzde akışkan iletiminde boru hatları veya boru sistemleri kullanılmaktadır. Bu boru sistemlerinin dizaynı en fazla verimi elde edebilmek için çok önemlidir. Boru hatları sistemlerinde “Kayıp Enerji” küçümsenmeyecek kadar çoktur.

Bu kayıpları en aza indirmek için klasik yöntemlere ilave olarak özel kimyasal bileşimleri de kullanmak son zamanlarda uygulanan yöntemlerdendir. Bu çalışmamızda boru hattı boyunca akan akışkana polimer zincirli kimyasal maddelerin belirli oranlarda ilave edilmesiyle enerji kayıplarındaki azalma teorik ve pratik olarak araştırılmıştır.

Yapılan çalışmada boru hatları boyunca meydana gelen enerji kayıpları tanıtılmış ve bu kayıpların azaltılma yöntemleri incelenmiştir. Akımı kötü yönde etkileme özelliği olmayan polimer zincirli kimyasal maddelerin ilavesinin verim ve ekonomi açısından sağladığı faydalar anlatılmıştır.Sonuç olarak petrole bir miktar kimyasal maddenin ilave edilmesiyle, boru hatlarında debinin %8 lere kadar arttığı görülmüştür. 465 numaralı projemi Fırat üniversitesi araştırma fonu desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler: Petrol, kimyasal madde (Arcopla),sürtünme kaybı,enerji

ABSTRACT

Master Thesis

DECREASING FRICTION LOSSES IN PETROLEUM PIPE LINES

Tarkan KOCA

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2001, Page:74

In our days, pipe lines or pipe systems for are used for transferring fluids. The design systems is very important in order to obtain the most efficient work. “Energy losses ” are very high in such systems.

In order to minimize these losses, in addition to classical methods, special chemical are also used. Energy losses along the pipe lines were investigated theoretically and experimentally by adding different rates of polymer chain chemical articles to the fluid.

In the study, Energy losses along the pipe were presented and the methods of decreasing the energy losses were investigated. The effects of the addition of polymer chemical articles which do not effect the flow on effectiveness and economy were studied.. As a result, it as observed that adding some chemical articles to petroleum increased the volume rate about %8 in pipe lines. This study was supported by FÜNAF under the contract of 465.

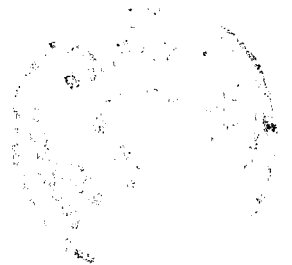
Key Words: Petroleum, chemical agent, frictional loss, energy



TEŞEKKÜR

Bütün araştırmam boyunca yardımlarını ve desteğini gördüğüm, danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Aydın ÇITLAK beye, İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç.Dr. Suat CANBAZOĞLU beye, Ceyhan ve Pazarcık BOTAŞ şefliklerine, deney setinin hazırlanmasında yardımcı olan mesai arkadaşım Öğr.Gör. Alaaddin SAÇAK beye teşekkür ederim. Ayrıca projemi destekleyen FÜNAF' a da teşekkürlerimi sunarım.

Öğr.Gör. Tarkan KOCA

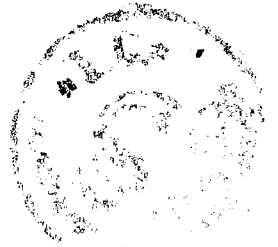


İÇİNDEKİLER

BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
BÖLÜM III GERÇEK AKIŞKANLARIN AKIMI.....	8
III.1. Giriş.....	8
III.2. Farklı Akım Rejimlerinin Oluşumu.....	8
III.3 Laminar ve Türbülanslı Akım.....	11
III.4 Katı Cidar Etrafından Akışkan Akımı.....	16
III.5 Borularda İç Akım.....	20
III.5.1 Laminar Akım (Hagen poiseuille Kanunu).....	20
III.5.1.1 Kinetik Enerji Katsayısı.....	25
III.5.2 Türbülanslı Akım.....	27
III.5.2.1 Hız Profili ve Ortalama Hızın Maksimum Hıza Oranı.....	27
III.5.2.2 Kinetik Enerji Katsayısı.....	30
BÖLÜM IV ENERJİ KAYIPLARININ TEORİK ANALİZİ.....	32
IV.1. Giriş.....	32
IV.2. Sürekli Üniversal Kayıplar.....	33
IV.2.1 Sürtünme Faktörüne Boyut Analizi Yaklaşımı.....	35
IV.2.2 Dairesel Olmayan Borularda Enerji Kaybı ve Hidrolik Çap.....	41
IV.3. Lokal-Yerel Kayıplar.....	42
IV.3.1. Ani Daralma Kaybı.....	44
IV.3.2. Depo Çıkış Kaybı.....	46
IV.3.3. Tedrici Genişleme Kaybı.....	46
IV.4. Boru Hattı Problemleri.....	47
IV.4.1. Seri Bağlı Borularda Enerji Kaybı.....	48
IV.4.2. Paralel Borularda Enerji Kaybı.....	49



BÖLÜM V ENERJİ KAYIPLARININ AZALTILMASI.....	52
V.1.Polimer Malzemeye Etki Eden Faktörler.....	53
V.2.Deneyde Kullanılacak Polimer Maddenin Özellikleri.....	54
BÖLÜM VI DENEYSEL ÇALIŞMA.....	57
KAYNAKLAR.....	73



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil.III.1 Reynolds'un Kullandığı Deney Düzenegi.....	9
Şekil.III.2 Hareket Eden Komşu Tabakalar Arasındaki Kayma Gerilmesi.....	12
Şekil.III.3 Akım İçindeki Partiküllerin Düzensiz Hız Pülsasyonları.....	13
Şekil III.4 Türbülanslı Akımdaki İki Komşu Nokta Arasındaki Kayma Gerilmesi.	14
Şekil III.5 Pürüzlü ve Pürüzsüz Yüzeylerde Oluşan Laminar Akım.....	17
Şekil III.6 Türbülanslı Akım ve Laminar Alt Tabaka Oluşumu.....	18
Şekil III.7 Laminar Akımda Bir Akışkan Elamanı Üzerine Etkiyen Kuvvetler.....	20
Şekil III.8 Laminar Akım Parabolik Hız Profili.....	25
Şekil III.9 Türbülanslı Akım Parabolik Hız Profili.....	28
Şekil IV.1 Bir Borudaki Akımı Etkileyen Parametreler.....	34
Şekil IV.2 D Çaplı Bir Borudaki Akışkan Akımı.....	35
Şekil IV.3 Nikuradse'nin Deney Sonuçları.....	37
Şekil IV.4 Moody Diyagramı.....	39
Şekil IV.5 Farklı Boru Tipleri İçin Golebrook Geçiş Fonksiyonu.....	40
Şekil IV.6 Dairesel Kesitli Olmayan Boru.....	41
Şekil IV.7 Boru Hattındaki Ani Genişleme.....	43
Şekil IV.8 Boru Hattındaki Ani Daralma.....	44
Şekil IV.9 Boru Hattındaki Tedrici Genişleme.....	45
Şekil IV.10 Paralel Bağlı Boruların Bağlanması.....	49
Şekil V.1 Polimer Zincirli Maddenin Akım Gelişimi Üzerine Etkisi.	54
Şekil VI.1 Deney Tesisat Şeması.....	64
Şekil VI.2 Deney Seti Fotoğrafı.....	71
Şekil VI.3 Deney Seti Fotoğrafı.....	72



TABLÖLAR

Tablo IV.1 Bazı Önemli Bağlantı Parçalarına Ait Lokal Enerji Kayıp Katsayıları...	47
Tablo VI.1 Deney Sonuçları.....	61
Tablo VI.2 Ölçüm Sonuçları.....	62



GRAFİKLER

GrafikVI.1.Reynolds Sayısı-Kimyasal Madde Miktarı.....	65
GrafikVI.2.Reynolds Sayısı-Basınç Farkı.....	66
GrafikVI.3.Hız-Kimyasal Madde Miktarı.....	67
GrafikVI.4.Debi-Basınç Farkı.....	68
GrafikVI.5.Debi-Reynolds Sayısı.....	69
GrafikVI.6.Debi-Kimyasal Madde Miktarı.....	70



BÖLÜM I

I. GİRİŞ

Mühendislik sistemlerinde, boru hatları boyunca akışkan iletimi, gerek basınç, gerek enerji iletimi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Söz konusu akışkan iletiminin verimliliğini etkileyen en önemli unsur, iletim hattı boyunca meydana gelen enerji kayıplarıdır. İletim hattı boyunca bir kısım enerji ısıya dönüşerek kayıp enerji olarak karşımıza çıkar. Bu kayıp enerjinin minimize edilmesi sistemin verimliliği ve ekonomisi açısından son derece önemlidir. Bir boru iletim hattı boyunca sürekli (üniversal) kayıplar ve yerel (lokal) kayıplar olmak üzere iki tip enerji kaybı meydana gelir.

Sürekli yük kayıplarına düz boru kayıpları da diyebiliriz. 1850 yılından beri, uzun, silindirik ve düz borularda su akımı üzerine yapılan deneylerde, düz bir borudaki enerji kaybının, akım hızı ve boru uzunluğu ile doğru, boru çapı ile ters orantılı olduğu gözlenmiştir.

Boru hatlarında gözlenen diğer kayıp olan lokal kayıplar; kesit değişimi, yön değiştirme, manşon, rakor, dirsek ve T gibi bağlantı elemanları, vana ve çek valf gibi elemanlarda meydana gelir. Bir çok sistemlerde ihmal edilmesine karşın, bazı sistemlerde ihmal edilemez ve büyük önemi haizdir.

İfade edilen bu enerji kayıpları göz önüne alınarak boru sistemlerinin dizaynına gereken önem verilmelidir. Enerji kayıplarını azaltmaya yönelik bu hususun yanısıra ileri bir safha olarak iletilen akışkana polimer eriyikler ilave edilmesi son yıllarda uygulama alanı bulmuştur. Bu tezin amacı esas olarak, bu katkı maddelerinin akım üzerine geliştirici özelliklerini teorik ve pratik olarak incelenmesidir.

BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1996 yılında San Diego (U.S.A)'da yapılan bir konferansta polimerik ve sürtünmeyi azaltıcı katyonik katkı maddelerinin kıyaslandığı bir konferans düzenlenmiştir. Bu konferansta ; Sürtünmeyi azaltmak amacıyla kullanılan iki ana katkı maddesinin akım davranışları ile ilgili önemli farklılıklar ortaya konulmuştur. Bu iki ana katkı maddesi; yüksek molekül ağırlıklı polimerler ve yüzey gerilmesini azaltan katyonik sıvılardır. Konferansta; mekanik kesme hareketlerinin, boru çapının, hız profilleri şekillerinin sürtünmenin azalması üzerine etkileri incelenmiştir.

Aynı konferansta Huyer, Klaus W, Gyr, Albert, "Heterojen Drag azaltması Kavramı ve Sonuçları" konulu çalışmalarını sunmuşlardır. Bu çalışmada, boru içerisine eriyik halindeki polimer enjekte edildiğinde, türbülanslı akımda meydana gelen sürtünmenin azalması irdelenmiştir. Daha önceki kanıya göre; meydana gelen sürüklemenin azalması, viskoelastik polimer iplikçiler ile türbülanslı akım bölgesi arasındaki etkileşim ile ilgilidir. Ancak katılımcılar bu kanının doğru olmadığını, heterojen sürüklemenin azalmasının sadece akım içerisindeki erimiş polimerlerden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Aynı konferansta Tokyo Üniversitesi tarafından, polimer çözeltinin serbest yüzey üzerinde türbülans azaltılmasına yönelik araştırması sunulmuştur. Bu araştırmanın özeti şöyledir ;

Polimer ilavesiyle türbülansın değiştirilmesi çok bilinen bir olgudur. Özellikle bir boru akımı içerisinde; polimer eriyik boru yüzeyi üzerindeki dragı azaltabilir. Bu durum birçok çalışmayla ispatlanmıştır. Bununla birlikte bir sıvının serbest yüzeyindeki Toms etkisine yönelik birkaç çalışma 1983 yılında Hayt tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, serbest bir yüzeydeki Toms etkisi araştırılmıştır. Polimer eriyiğin serbest yüzeyi üzerindeki türbülansa, yatay nitrojen gaz jeti neden olur. Nitrojen gaz jeti, serbest yüzey üzerinde dalgalara sebep olan yüksek kesme gerilmeleri meydana getirir.

Bundan dolayı, bu dalgaların yüzey türbülansı için dolaylı olarak Toms etkisini ifade ettikleri düşünülmüştür. Bu çalışmada, Toms etkisini ölçmek için, yüzey yüksekliğinin fotoğrafları çekilmiş ve su seviye ölçme cihazı kullanılmıştır. Polimer eriyiklerin fiziksel özelliği suyunkiyle benzerdir (yüzey gerilmesi ve kinematik viskozite). Su yüzeyindeki küçük ve dik dalgalar gözlenirken, polimer eriyik üzerinde daha geniş ve daha az dik dalgalar gözlenmiştir.

Tokyo Metropolitan Üniversitesi'nde H.Veda ve K Yokovchi tarafından ise "Riblet ve Polimer Maddenin Türbülans Azaltılmasına Birlikte Olan Etkileri" sunulmuştur. Bu araştırmada polimer katkı maddeleri ve bir sürtünmesi düşük borudan oluşan kombine bir sistem için drag azalması incelenmiştir. V şeklindeki riblet oluğun yüksekliği 1.01 mm, uzunluğu ise 1,3 mm'dir. Kullanılan polimer katkı maddeleri Aronfloc N-110 ve Separan AP-30'dur. Aronfloc drag azaltmaya başladığında, meydana gelen kesme gerilmesi, separan'a göre 8 kat daha fazladır. Polimer katkı maddesinin drag azaltılmasına yönelik etkisi maksimum değerinin altındayken, kombine sistem pozitif bir birleşik (synergistic) etki göstermiştir.

1996 yılında Güney Kore İnha Üniversitesi'nden Chui, Hyoungh J., John, Myung S. Tarafından yayınlanan makalede, polimer katkı maddelerinin drag azaltılmasına etkileri sunulmuştur. Bu makalede, su ile çözülebilir polietilenoksit (PED) ve yağ ile çözülebilen polisobütülen (PID)'in seyrelmiş eriyiklerinin neden olduğu türbülans drag azalması araştırılmıştır. Bu sistemde, drag azalmasına bağlı olarak konsantrasyon, dairesel bir boru içindeki akım için daha önceden uygulanan deneysel bir drag azaltma denklemini doğrulamak için gösterilmiştir. Bu çalışmada polimer konsantrasyonu ve PED ile PIB'in farklı molekül ağırlıkları için drag azalması arasındaki lineer ilişki ortaya konulmuştur.

Ağustos 1996'da Swiss Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih'ten Hoyer K, Gyr A. Tarafından yayınlanan makalede heterojen bir drag azalmasına sahip boru akımındaki türbülans hız bölgeleri araştırılmıştır. Gereken ölçümler, iki boyutlu Laseyn Doppler hız ölçer ile basınç düşümü ölçüm cihazları ile yapılmıştır. Ağırlığın % 0.75'i PAMH olan polimerli eriyik 30x30 mm ebatlarındaki dikdörtgen kesitindeki bir kanala merkezinden enjekte edilmiştir. Sonuç olarak; hız, zaman, farklı Fourier analizleri ve kayıt

edilen hız sinyalleri arasındaki ilişkiden oluşan detaylı bir istatistiksel analiz sunulmuştur.

Haziran 1996'da Fang Yi, Hasegawa Tamiichi, Watanabe Hiroshi, Narumi Takatsune tarafından yayınlanan makalede boru akımlarında seyreltik polimer eriyiklerin drag azaltmaları ve basınç değişimleri incelenmiştir. Drag azalması ve basınç değişimi arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için, boru akımındaki drag azalmasının ve basınç değişiminin frekansının ölçümü, seyreltilmiş polimer eriyikleri ve sulandırılmış deterjan solüsyonları kullanılarak yapılmıştır. Frekans analizleri; seyreltik polimer eriyiğin basınç değişiminin güç spektrum yoğunluğunun alçak frekans bölgelerinde daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu değer suyun 30 Hz olan değerinden daha küçüktür.

Mayıs 1955'te Hindistan Bombay üniversitesi'nden bir heyet tarafından yayınlanan makalede "Kabarcık Bırakma Bölgesindeki Türbülanslı Yapı Üzerine Polimer Esaslı Katkı Maddelerinin Rolü" irdelenmiştir.

Akıma uzun polimer zincirli katkı maddesinin ilavesi gaz-sıvı ara yüzeyindeki veya kabarcık bırakma bölgesindeki türbülansı azaltır. Hız histogramları, sıvı faz türbülansının izotropik özelliklerini gösteren Laser-Doppler anemometresi tarafından elde edilmiştir. Kalınlığın 2 mm olduğu gaz ara yüzeyin en üst noktasında, sıvı faz hızı ve Reynolds gerilmesinin daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, drag azaltıcı polimer ilavesinin, sıvı faz hızı ve Reynolds gerilmesinin her ikisini birden azalttığı görülmüştür.

Hollanda Amsterdam Üniversitesi'nden Von Doan P.H. ve Wegdam G.H. tarafından "Drag azaltıcı eriyikler içindeki Türbülans Hız Değişiklerinin Dağılımı" incelenmiş ve bir makale halinde sunulmuştur.

Bir türbülanslı boru akımındaki hız değişimlerinin muhtemel yoğunluk fonksiyonu, ölçülen hız-hız ilişki fonksiyonlarından Gaussian ve Lorentzian'ın bir ürünü olarak düşünülebilir. Bir türbülanslı akıma drag azaltıcı polimer maddenin ilave edilmesi, türbülans enerji kaybının büyük ölçüde azalmasına neden olur.

Moussa T, Tiu C. Tarafından Mayıs 1994 yılında yayınlanan makale “Türbülanslı Boru Akımında Polimer Bozulmasını Etkileyen Faktörler” konuludur.

Türbülanslı akım içindeki polimer üzerinde çeşitli parametrelerin etkilerini araştırmak için kılcal bir rheometer kullanılmıştır. Bu parametreler, polimer konsantrasyonunun büzülme oranını, boru uzunluğunu, boru çapını, geçiş sayısını ve polimerin molekül ağırlığını içermektedir. Araştırmalarda; ticari bir organik drag azaltıcı olan (ODR), iki dereceli poliakrilamid (SEPARAN AP 30 ve AP 302) ve yüksek molekül ağırlıklı polisabotulen (PIB) kullanılmıştır. Araştırma, drag azaltma etkisindeki kaybın ölçülmesi esasına dayanır. Türbülanslı akımda, yüksek bir Reynolds sayısında karşı bir etki incelenirken, polimer kalitesiz bir solvante doğru bozulur. Polimer moleküllerinin, yüksek uzama özellikleri nedeniyle, bozulmanın çoğu giriş bölgesinde yer alır.

1994 yılında Portekiz, İnstituta Suparior de engenharia do Porto enstitüsünden Pareina A.Sa, Pinha F.T. tarafından yayınlanan makalede “Düşük Moleküllü Polimer Eriyiklerin Türbülanslı Akım Özellikleri” incelenmiştir.

Yapılan incelemelerde, bir metilhidroksil selüloz olan Tylose maddesinin sulu eriyiğinin, normal Reynolds gerilmesi ve basınç düşümü 0,4 ve 66 olarak ölçülmüştür. Viskozide ölçümleri, kesme davranışları göstermiş, titreşim ve sürünme testleri bir rheometer vasıtasıyla gerilmenin elastik kısımlarının en küçük değerlerini vermiştir. Boru cidarı yakınlığında, türbülansın iki bileşeni azalırken, eksenel türbülans gerilmesi suya göre daha yüksek olarak ölçülmüştür.

Hollanda, Amsterdam üniversitesi’nden bir grup araştırmacı ve “Sulandırılmış Polimer Eriyikler İçindeki Türbülans Oluşumları” konulu çalışmalarını bir makale halinde yayınlamışlardır.

Türbülans oluşumları, sistem içindeki hız farklılık dağılımlarının daha yüksek momentlerine göre incelenir ve sınıflandırılır. Bu momentlere deneysel olarak, foton ilişkili spektroskopi tekniği ile ulaşılabilir. Ancak, Van Dam P.H.J. Wesdam G.H., Van Der Elsken J.’den oluşan bu ekip, ölçülmüş ilişkili fonksiyonların daha yüksek spektral momentlerinden direk olarak hız dağılım farklılıklarını hesaplayan yeni bir analiz yön-

temi geliştirilmiştir. Ekip bu yöntemle çalışarak, bir türbülanslı akım üzerinde drag azaltıcı polimerlerin etkisini incelemiştir.

1994 A.B.D. Newyork'ta "Boru Hatlarındaki Akışkanlar Üzerine Gelişmeler" konulu konferansta Garry e. Blizzard "Mekanik Sorunlara Kimyasal Bir Çözüm "CDR" konulu çalışmasını sunmuştur.

Bir akış geliştirici olan CDR (Conoco Drag Reducer), hidrokarbonların türbülans karakterlerini değiştirerek verimi yükselten tek üründür. CDR boru hattı problemlerinin çözümü için iyi bir araçtır. Bu madde, bir hidrokarbon solvent içindeki uzun zincirli hidrokarbon bir polimerdir. CDR boru hattı içerisine p.p.m yoğunluğunda direk olarak enjekte edilir. CDR tüm ham petrol ve rafine edilmiş petrol ürünleri içerisinde çok kolay çözünebilir. Çözülmüş CDR akışkan ile birlikte hareket eder, boru içinde bir katman teşkil etmez, viskoziteyi arttırmaz. Molekülleri, metal veya oksijen, nitrür veya nitrojen gibi bağlı metal bulunmayan saf hidrokarbondur. CDR ürünleri Non-Newtonien'dir ve viskoziteleri hareketle azalır.

1993 yılında Rusya'da Manzhaj, İlyushnikov, Gareev ve Nesyn tarafından "Enerji Tüketiminin Azaltılması İçin Polimer ilavelerinin Laboratuvar Araştırmaları ve Endüstriyel Testleri" konulu bir makale yayınlanmıştır. Makalede, Toms etkisi altında meydana gelen şartlar ele alınmıştır. Bu şartlar, bir boru hattında hidrodinamik drag azaltma yeteneği olan polimerin sentezi için temel kriterler olmuşlardır. Çeşitli kimyasal maddelerin hidrokarbon eriyiklerin içinde üretilen polimerin üzerinde yapılan laboratuvar araştırmaları tamamlanmıştır. Katkı maddesinin endüstriyel testler altındaki şartlar yerine getirilmiş ve tanımlanmıştır. Test sonuçları, Trans-Alaska boru hattındaki verilerle karşılaştırılmıştır.

Hans-Wermen, Theil ve Horst tarafından "6. Avrupa Drag Azaltma Konferansı'nda Pürüzlü Borulardaki Gerilme Giderici Eriyiklerin ve Polimerlerin Türbülans Yapıları" konulu çalışmalarını sunmuşlardır.

Basınç düşümü ve hız profillerinin ölçümü, drag azaltıcı akışkanların türbülanslı akışlarını göstermek için yapılmıştır. Araştırma "k" ve "d" tipi pürüzlü bo-

rular olarak bilinen iki tip boruda yapılmıştır. Sonuçları benzer çaptaki pürüzsüz hidrolik borular ile mukayese edilmiştir.

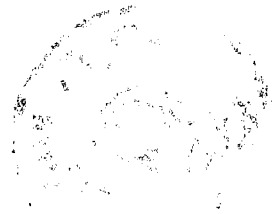
Quensland Üniversitesi (Avusturya)'den Chanson, Hubert, Giav, Galvin benzer bir konferansta "Hidrolik Akımlarda Drag Azaltılması" konulu çalışmalarını sunmuşlardır.

Hidrolik akışlarda, partiküller ve türbülans arasındaki etkileşim, polimer eriyiklerin etkisiyle meydana gelen drag azalmasının incelenmesiyle anlaşılabilir. Çalışmalarda, geciktirici sediment akışları, polimer eriyikli su akışları analiz edilmiştir. Sonuç olarak drag azalma mekanizması açıklanmış ve bu akışlar arasında bazı benzeşimler geliştirilmiştir.

1993 yılında Northwestern Polytechnical üniversitesi (Çin) tarafından yayınlanan makalede "Drag Azalması için Polimer Film Ribletlerin Gelişimi" konusu araştırılmıştır.

Üniversite polimer film ribletlerini araştırmaya 1989 yılında başlamıştır. Çalışmalarında yüksekliği, genişliğinden daha küçük olan V şeklinde bir oluk kullanılmıştır. Kanal genişliği "S" 0,04 % 0,39 mm arasında değişmektedir. Kanal genişliğinin 0,1 0,06 ve 0,04 mm'ye eşitken, NPU polimer film ribletleriyle kaplı alüminyum levha modelinde rüzgar tüneliyle yapılan testlerde türbülans oluşmamıştır.

Solvent içerisine polimer moleküllerinin ilave edilmesi, türbülans özelliklerini etkiler, bu etkiler makro karışım ve mikro karışım şeklindedir. Boru içindeki sulu polimer eriyiklerinin karışım uzunlukları, Newtonien akışlara göre birkaç kat daha fazladır. Sürtünme faktöründeki azalmayı belirtmek üzere basit bir polimer-türbülans etkileşim modeli hazırlanarak, bir boyutlu türbülanslı akışları analiz etmek için kullanılmıştır. Sulu polimer eriyiklerin karışım uzunlukları miktar olarak önceden bilinebilir.



BÖLÜM III

GERÇEK AKIŞKANLARIN AKIMI

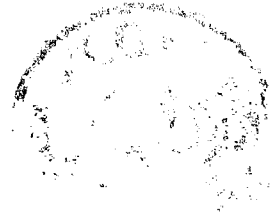
III. 1. Giriş

Gerçek akışkanların akımı, viskoziten dolayı meydana gelen ilave etkiler nedeniyle ideal (viskozitesiz) akışkan akımına nazaran çok daha karmaşıktır. Viskozite; akışkan partikülleri arasında ve bu partiküllerle onların sınırlayan katı cidar arasında sürtünme veya kayma kuvvetlerine sebep olduğundan, akışa karşı direnci temsil eden bir büyüklüktür. Akımın meydana gelebilmesi için bu direnç kuvvetlerine karşı iş yapılması gerekir ve bu iş için kullanılması gereken fazla enerji ısıya dönüşerek akışkanlar mekaniği açısından kullanılmayan (kaybolmuş) enerji hükmüne girer.

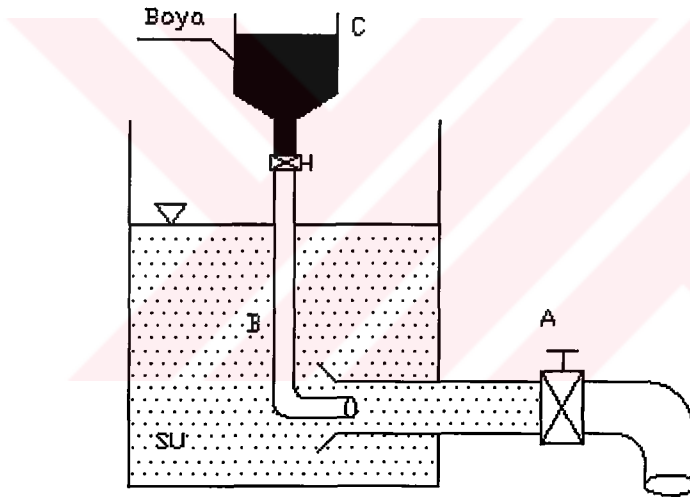
Viskozitenin varlığı, akışkan akımlarında fiziksel olarak birbirinden farklı bir akım rejiminin oluşmasını sağlar ve ayrıca ideal akışkanlarınkinden tamamen farklı akım davranışları üreterek, hız profiline etkisi neticesinde, “Üniform hız profili” kabulünü geçersiz kılar. Her ne kadar Euler denklemleri gerçek akışkanların kayma gerilmelelerini içerecek şekilde değiştirilebilirse de, sonuç; genel çözümü olmayan bir diferansiyel denklem takımına gider. Bu karmaşıklıklar yüzünden mühendisler analitik çözümü bulunmayan problemleri çözmek için deneysel ve yarı deneysel metotlara başvurmak zorundadırlar. Böyle bir yaklaşım ise olayların fiziksel varyasyonlarının çok iyi anlaşılmış olmasını gerektirir.

III. 2. Farklı Akım Rejimlerinin Oluşumu

Viskozite etkisi sebebiyle gerçek akışkanların akımında; Laminar ve türbülanslı akım olmak üzere çok farklı iki akım rejimi meydana gelir. Bu rejimlerin karakteristiği ilk defa Reynolds tarafından, Şekil III.1’dekine benzer bir deney seti ile gösterilmiştir.

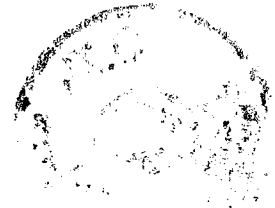


Şekil III.1'deki gibi şeffaf bir cam boru ile tanktan çekilen su, A vanası ile kontrol edilmiştir. Bir boya kabından beslenen ince bir boru ise, cam borunun girişine irtibatlandırılmıştır. Reynolds yapmış olduğu bu deneyle, cam borudaki küçük hızlarda ince borudan çıkan boya ipçiklerinin boru eksenine paralel ve ince doğrular halinde şekillendiğini keşfetmiştir. Vana daha fazla açılarak yüksek hızlara varıldığında; boya ipçikleri giderek dalgalanmaya ve bozulmaya ve boru içerisinde akan su da dağılmaya başlamıştır. Reynolds, boya ipçiklerinde dalgalanmanın başladığı ortalama hızı (kritik hızı), tankdaki suyun durgunluk derecesine bağımlı olarak bulmuştur. Buna göre artan hızla daha yüksek kritik hızlar elde edilebilmiştir. Aynı zamanda; boya ipçiği dağıldığında onu tekrar düzeltmek için hızın azaltılması gerektiğini ve restorasyonun yaklaşık olarak, boru içerisinde daima aynı ortalama hızda meydana geldiğini de keşfetmiştir.[1]



Şekil III. 1. Reynolds'un kullandığı deney düzeneği

Akım esnasında akışkan partiküllerin birbirine karışması, boya ipçiğinin dağılmasına sebep olduğundan, Reynolds; düşük hızlarda ve karışıklığın olmadığı ve akışkan partiküllerinin birbirine paralel tabakalar halinde hareket ettiği veya tabakaların komşu tabakalar üzerinden birbirine karışmaksızın kaydığı sonucunu çıkarmıştır. İşte bu laminar akım rejimidir.



Daha yüksek hızlarda boya ipçikleri boru içerisinde dağıldığından, akışkan partiküllerinin birbirine karıştığı görülür veya başka bir ifadeyle akım türbülanslı olur. Laminar akımın türbülanslı akıma dönüştüğü bazı kritik hızların üzerinde türbülanslı akım yeniden laminar konuma geçebilir. Buradaki ilk değere “alt kritik hız”; sonrakine ise “üst kritik hız”; denir.

Reynolds, bu boya akımı deneylerinden elde ettiği sonuçları, boyutsuz bir Reynolds sayısı tanımlayarak, genellemiştir. Bu sayı kendisinden sonra “Reynolds sayısı” olarak isimlendirilmiştir. V ; boru içerisindeki ortalama hız, d ; boru çap, ρ , akışkan ortamın özgül kütlesi ve μ ; viskozitesi olmak üzere ;

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad \text{veya} \quad Re = \frac{V d}{\nu} \quad (III.1)$$

olarak tanımlanmıştır. Reynolds, çeşitli ölçüdeki borularda akan tüm akışkanlar için alt ve üst kritik hızlara göre tanımlanmış bir çok kritik Reynolds sayıları (Re) elde etmiş ve tüm akışkanlar için borularda laminar ve türbülanslı akım sınırlarını tek bir sayısının tanımlayacağı sonucunu çıkarmıştır.

Laminar akımın üst limiti Reynolds tarafından $12000 < Re < 14000$ olarak bulunmuştur, fakat ne yazık ki bu üst kritik Reynolds sayısı bir takım gelişmiş varsayımlara dayandırılarak belirsizleştirilmiştir. Zaten bu yüksek kritik değerler pratikte fazla ilgi görmemiştir. Uygulamacılar bu kritik Reynolds sayısının üst sınırını $2700 < Re < 4000$ olarak tanımlamışlardır. [3]

Alt kritik Reynolds sayısı olarak tanımlanan, türbülanslı akımın alt sınırı daha büyük mühendislik öneme sahiptir. Zira bu; herhangi bir kaynaktan akım başlarken oluşan tüm türbülansın viskozite tarafından er geç sönmüneceği bir konumun başlangıcı olarak tanımlanır. Bu alt kritik Reynolds sayısı bu şekilde, Laminar akımın her zaman oluşacağı limit altında kalır. Bir çok deneyler; bu kritik Reynolds sayısının yaklaşık ola-

rak 2100 ile 4000 arasında bir belirsizlik bölgesi oluşturduğunu göstermiştir. Bu durumda uygulamacılar Reynolds sayısına bağlı değişkenler için bu bölgede makul bir seçim yapmak zorundadırlar.

Bu “Kritik Reynolds sayısı” kavramı pratik olarak gerçekten akım rejiminin, laminar veya türbülanslı olduğu hususunda önceden karar verebilmek için çok faydalı bir yaklaşımdır. Mesela; bu yaklaşımı silindirik bir boruda bir akışkan akımına uyguladığımızda, $Re < 2100$ ise, akımın “laminar” olduğunu, $Re > 4000$ ise türbülanslı olduğunu hemen söyleyebiliriz.

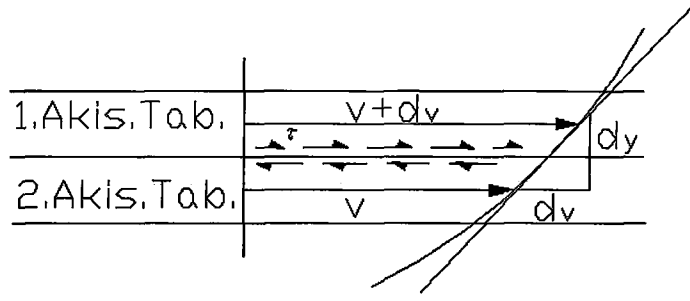
Burada kritik Reynolds sayısının cidarın geometrisiyle de değiştiğini vurgulamak gerekir. Mesela; aralarında d mesafesi bulunan iki paralel levha arasında akım konumunda ortalama hız V için, $Re_k = 1000$ olurken, geniş bir açık kanal akımında, ortalama hız V ve derinlik d için, $Re_k = 500$ ve d çaplı bir küreye yaklaşma hızı V alınarak hesaplanan $Re_k = 500$, ve d çaplı bir küreye yaklaşma hızı V alınarak hesaplanan $Re_k = 1$ civarında olmaktadır. Önemli bir gerçek de şudur ; Kritik Reynolds sayısı deneysel olarak hesaplanmalıdır. Türbülansın orijini tam manasıyla belli olmadığından, kritik Reynolds sayısını veren analitik bir metod geliştirilmiştir. [2]

III. 3. Laminar ve Türbülanslı Akım

Laminar akımda akışkan partiküllerinin titreşimi sadece moleküler davranış olup, bu partiküller viskozite etkisiyle, esas itibariyle, paralel yörüngelerde hareket etmeye zorlanır. Hareket eden komşu tabakalar arasındaki kayma gerilmesi Laminar akımda viskozite tarafından belirlenir ve tam anlamıyla ;

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (III.2)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Buna göre kayma gerilmesi viskozite ile hız gradyentinin çarpımından ibarettir. Türbülanslı akımda akışkan partikülleri tabakalar içerisinde muhafaza edilemez ve akım içerisinde heterojen bir tarzda hareket ederler.

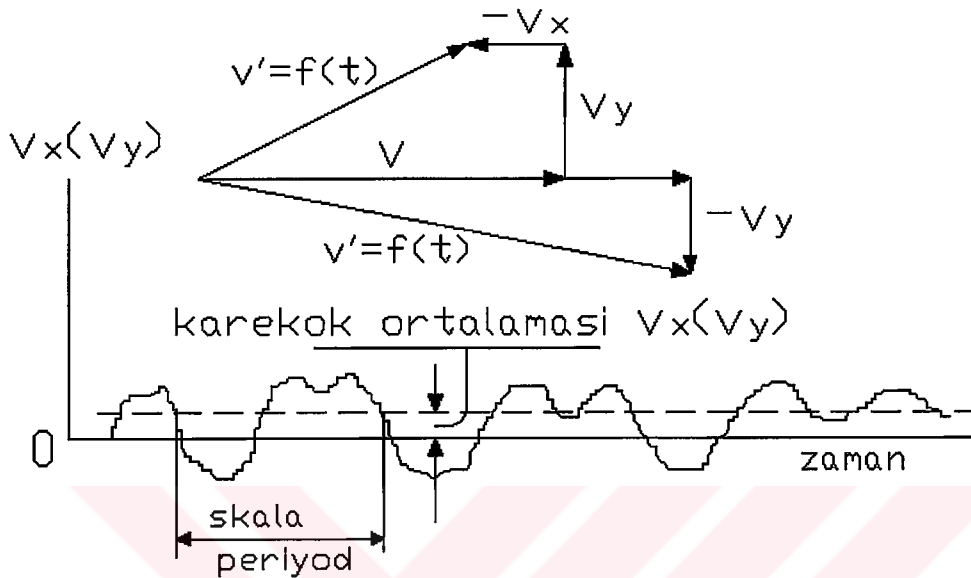


Şekil III.2. Hareket eden komşu tabakalar arasındaki kayma gerilmesi

Diğer partiküllerden kayarak geçer ve akım esnasında akışkan karışımı oluşturarak, tamamen geliş güzel bir şekilde ve diğer partiküllerle çarpışırlar. Bu geliş güzel hareket eden küçük alışkan kütleleri akım içerisinde herhangi bir noktada çabuk ve düzensiz bir hız dalgalanmalarına neden olurlar. Bu Şekil III.3'deki gibi gösterilebilir. Burada v , geçici ortalama hız, v ; zamanın fonksiyonu olarak ani hızdır. Ani hız v' ; zamanın fonksiyonu olarak ani hızdır. Ani hız v' ; Şekil III.3b'den izleneceği gibi, geçici ortalama hız, v , ile zamanın fonksiyonu olan dalgalanma hızının bileşenleri olan, v_x ve v_y 'nin vektörel toplamı olarak göz önünde bulundurulabilir. v_x ve v_y bu şekilde tanımlandığında türbülanslı akımın bu gelişigüzel karakteri nedeniyle davranış ve düzenli bir genlik ve periyod göstermese de, bu tesbitler belirli türbülans karakteristiklerinin tanımını mümkün kılar. Burada v_x ve v_y 'nin karekök ortalama değeri; türbülans çalkantı şiddetinin, yani ani hız v 'nin geçici hız v 'den sapma miktarının ölçüsüdür. Bu değer yaygın bir şekilde "Türbülansın şiddeti" olarak bilinir.

Burada v_x (veya v_y)nin işaret değiştirmesi arasında ortalama zaman aralığı türbülans skala (periyod)sının bir ölçüsüdür. Zira bu, o noktadan geçen türbülans gir-daplarının büyüklüğünün bir ölçüsüdür. Genellikle türbülansın şiddeti hızla ve skalası ise, sınır boyutları ile artar, buradaki ilk durum; Reynolds setinden, artan hızla boya ipçiklerinin daha hızlı dağılmasından kolayca izah edilir , ikinci durum ise, aynı hız

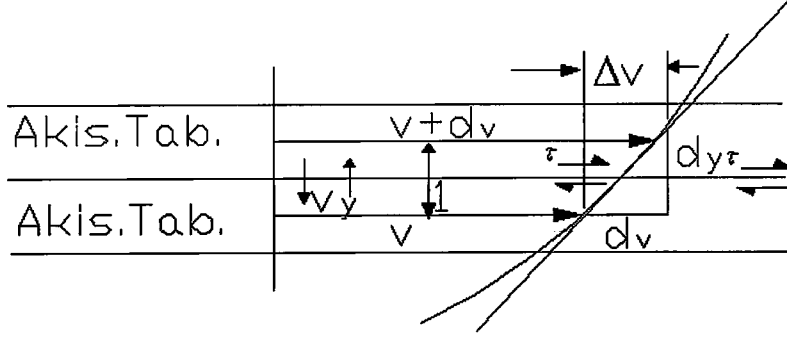
konumunda “türbülanslı girdapların” büyük bir kanalda küçük borudakinden daha büyük olur beklentisine dayanır.



Şekil III.3. Akım içindeki partiküllerin düzensiz hız pülsasyonları

Türbülans; akım esnasında akışkan partiküllerin kısa mesafede, her yönde, tamamen düzensiz bir hareketi olduğundan, akışkan partiküllerinin ferdi hareketlerini izlemek ve matematik olarak olayı karakterize etmek mümkün değildir. Fakat, akışkan partiküllerinin tümünün ortalama hareketi gözönünde bulundurularak veya istatistik metodlarla matematik bağıntılar elde edilebilir. [12]

Türbülanslı akımda kayma gerilmesi akıma dik kesitte iki komşu nokta alınarak ifade edilebilir. Şekil III.4’de gösterildiği gibi bu noktalardan birinde geçici ortalama hız v , diğerinde ise $v+\Delta v$ ’dir. Noktalar arasındaki küçük çapraz uzaklık 1 ise, geçici ortalama hız, hız gradyenti dv/dy ile ifade edilir.



Şekil III.4. Türbülanslı akımdaki iki komşu nokta arasındaki kayma gerilmesi

Bu durumda v ve $v+\Delta v$ hayali akışkan tabakalarının ortalama hızları olarak alındığında, türbülans hızı v_y , tabakalar arasındaki küçük akışkan kütlelerinin çapraz hareketini ifade eder. Böylece bir yönde kütle transferi oluşur. Zira, transferden önce sırasıyla V ve $V+\Delta V$ hızlarına sahip akışkan partikülleri transferden sonra $V+\Delta V$ ve V hızlarına sahip olacaklardır. Bunun anlamı; transfer olayı esnasında momentumlarının değiştiğidir. Yani; sanki aralarında bir kayma gerilmesi varmış gibi, hızı yüksek olan tabaka yavaşlamaya, hızı düşük olan tabaka ise hızlanmaya yönelecektir. Böylece, türbülanslı akımda kayma gerilmesi τ varlığının momentum kavramıyla yakın ilgisi olduğu görülür. Ancak bu, teorik bakımdan anlaşılabilir olsa da ölçülemez. Bu hayali gibi görünse de mühendislik uygulamalarında türbülanslı akım konusunda son derece faydalı bir kavramdır.

Bu değerlendirmeyeyle mevcudiyeti kesin olarak anlaşılan “Türbülanslı Kayma Gerilmesi” ifadesine matematik olarak ilk yaklaşım Boussinesq (1877) tarafından yapılmış ve laminar akım denklemi esas alınarak ;

$$\tau = \epsilon \frac{dv}{dy} \quad (III.3)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada “Eddi viskozitesi” olarak isimlendirilen ϵ ; esas itibarıyla türbülansın yapısına bağlı olarak, akımın bir özelliğidir. Tanımından anlaşıldığı gibi Eddi viskozitesinin akım içerisinde noktadan noktaya değişmesinin bir dezavantaj olduğu görülür. Buna rağmen türbülanslı kayma için yazılan bu ifade μ ve ϵ arasında bir

benzerlik oluşturduğundan, bugün bile kullanılmaktadır. Bir akımda hem viskoz ve hem de türbülans etki varsa, her iki konumu kapsayan denklem ;

$$\tau = (\mu + \epsilon) \frac{dv}{dy} \quad (\text{III.4})$$

şeklinde ifade edilebilir. Akımın tamamen laminar veya Türbülanslı olduğu limit konumlarında μ ve ϵ 'den biri sıfır alınacaktır.

Türbülans dolayısıyla hareket doğrultusunda ve harekete dik doğrultudaki akışkan hızları sarısayla v_x ve v_y olarak alınırsa, homojen bir türbülans veya $v_x = v_y$ kabul edilir. Bu kabulü kullanarak Reynolds; Türbülanslı akımda, hareket eden akışkan tabakalar arasında kayma gerilmesinin ;

$$\tau = \overline{v_x v_y} \quad (\text{III.5})$$

olarak belirtileceğini göstermiştir. Burada $v_x v_y$; v_x ile v_y çarpımının ortalama değeridir. Prandtl, genel akım karakteristiğine göre yukarıdaki türbülanslı hızlarla ilgili olarak; küçük akışkan partikülleri kümelerinin türbülans tarafından bir hız bölgesinden diğerine dönüştürüldüğü belli bir ortalama mesafe, l , tarif etmiştir. Prandtl, bu l mesafesini “Karışım yolu uzunluğu” olarak isimlendirmiş ve l boyunca hareket eden bir akışkan partikülün maruz kaldığı Δv hız değişimini $v_x v_y$ orantılı kabul etmiştir. Bu kabule göre türbülanslı akımda kayma gerilme ifadesi;

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (\text{III.6})$$

olarak elde edilir. Bu denklem birçok bakımdan tatmin edici ise de, bir takım dezavantajları da vardır. Mesela; karışım yolu uzunluğu 1, “y”nin bir fonksiyonu olduğundan, cidardan uzaklaştıkça büyümektedir. Bu dezavantaj;

$$\tau = \rho k^2 \frac{(dv/dy)^4}{(d^2v/dy^2)^2} \quad (\text{III.6a})$$

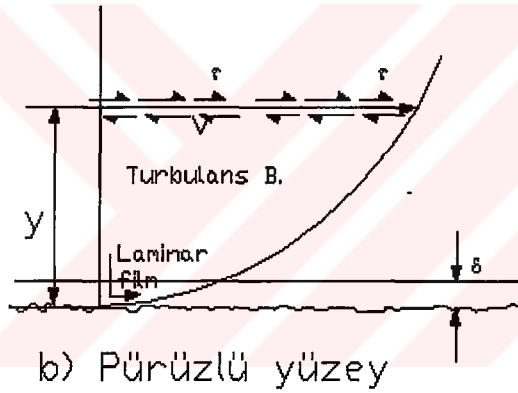
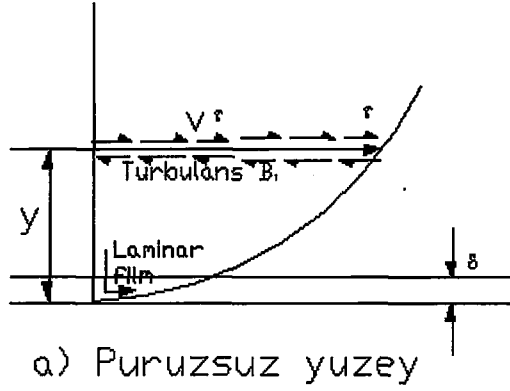
şeklinde Yon Karman yaklaşımıyla bir dereceye kadar giderilmiştir. Burada k; boyutsuz bir türbülans sabiti olup, yapılan deneysel ölçümler k’nın az da olsa değiştiğini göstermiştir. Yine de teoride bazı eksiklikler bulunduğu (III.6a) denkleminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlardan anlaşılmıştır. Buna rağmen, bu denklem, daha ziyade mühendislik uygulamalarında karşılaşılan türbülans kayma gerilmesi için, çok uygun ve diğerlerine nazaran basit bir yapıya sahiptir. “Prandtl Karman” denklemi olarak isimlendirilir.

III.4. Katı Cidar Etrafından Akışkan Akımı

Mühendislik problemlerinde katı bir cidar etrafında akım olayının çok iyi bilinmesi gerekir. Zira pratikte katı cidarlar kendileri etrafından oluşan akım davranışlarını bir dereceye kadar etkilemektedirler.

İdeal akışkanların katı yüzeye komşu bir tabakası bağıl olarak yüzeye göre hareket edebilirse de gerçek akışkanlarda bu mümkün değildir. Deneysel veriler yüzeye komşu tabakada hızın (yüzeye göre) sıfır olduğunu göstermektedir. Bunun manası klasik hız profilinin sınırda sıfır değerine sahip olmasıdır. Bir sınır yüzeyi üzerinde akış olayının gözlenmesinde; çok ince bir akışkan tabakası, birkaç molekülden ibaret bir kalınlık olabilir, yüzeye yapışmakta (hız sıfır olmakta) ve yüzeyden uzaklaştıkça akışkan tabakalarının hızı giderek artmakta ve hız gradyenti büyüklüğü akışkana uygulanan kayma gerilmesine bağlı olmaktadır. Pürüzlü yüzeylerde, akımdaki lokal düzensizlikler nede-

niyle, pürüz kesintisindeki form farklarından doğan küçük eddiler (çevrintiler) den dolayı bu basit tanım bir dereceye kadar geçerliğini korumaktadır.

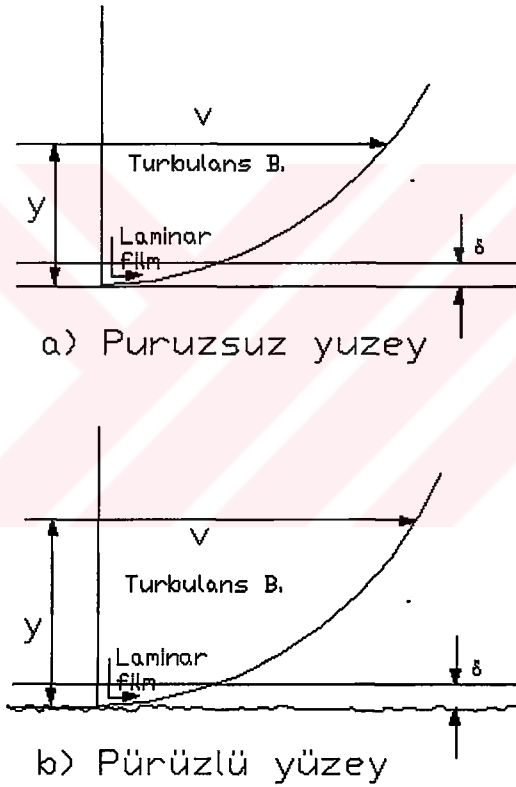


Şekil III.5. Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylerde oluşan laminar akım

Pürüzlü veya pürüzsüz yüzeyler üzerinde meydana gelen laminar akım (Şekil III.5) esas itibariyle aynı özelliklere sahip olmaktadır. Sınır yüzeyinde hız sıfır olmakta ve tüm akım boyunca kayma gerilmesi (III.2) denklemine uygun kalmaktadır. Böylece, laminar akımda yüzey pürüzlülüğünün akım davranışı üzerinde bir etkisi olmadığı sonucuna varılır.

Türbülanslı akıma gelince, sınır yüzeyinin pürüzlülüğü akışkan hareketinin fiziksel özelliğini etkileyecektir. Pürüzsüz bir katı cidar üzerinde türbülanslı akım meydana geldiğinde sınırdan itibaren bir laminar akım filmi (laminar alt tabaka) oluşur. Bu

laminar film deneysel olarak gözlenmiş ve mevcudiyeti bir takım basit nedenlere dayanarak teorik olarak da kanıtlanmıştır. Şöyle ki ; Türbülanslı bir akımda sınırın mevcudiyeti gerekli karışım yolu uzunluğunu azaltacak ve türbülans karışım işlemlerinin serbestisinin kısıtlayacaktır. Sınıra çok yakın bir bölgede geçerli karışım yolu uzunluğu sıfıra inecek, yani türbülans tamamıyla yok olacak ve sınır boyunca laminar bir akım filmi oluşacaktır. Böylece, katı yüzeyler üzerinde türbülanslı akım problemlerinde, mühendisler hem türbülans ve hem de laminar akım prensip ve denklemlerini kullanabileceklerdir.



Şekil III.6. Türbülanslı akım ve laminar alt tabaka oluşumu

Katı cidar etrafından akım konumunda oluşan laminar filmde kayma gerilmesi τ , (III.2) denklemi ile ve cidardan belli bir uzaklıkta türbülans tamamen oluştuğundan (III.6a) denklemi ile hesaplanır. Türbülansın tamamen oluştuğu, tam türbülanslı bölge ile laminar film arasında kalan geçiş bölgesinde, kayma gerilmesi; türbülans ve viskoz etkinin kompleks bir kombinezonundan elde edilir. Cidarın yakınlığından dolayı viskoz etkilerle, türbülanslı karışım önlenmiş olmaktadır. Gerçek şu ki, türbülansın olmadığı

sınır yüzey ile türbülansın tam olarak geliştiği bölge arasında bir geçiş bölgesinin mevcudiyeti laminar ve türbülanslı bölgeler arasında keskin bir ayırım yapmayı önler. Kolaylık için Şekil III.6'da gösterildiği gibi laminar tabaka gelişimi güzel bir δ kalınlığı ile belirtilmiş olsa bile, tabakalar arasında rijit bir ayırım yapmak mümkün değildir.

Yukarıda belirtildiği gibi, sınır yüzeyinin pürüzlülüğü türbülanslı akımın fiziksel özelliklerini etkileyecektir. Pürüzlülüğün bu etkisi; bağıl pürüz yüksekliğine ve laminar film kalınlığına bağlıdır. Bir cidardaki pürüz yüksekliği tamamen laminar film içerisinde kalıyor ise, böyle yüzeyler pürüzsüz kabul edilebilir (hidrolik pürüzsüz yüzeyler) ve bunlar türbülans davranışlarını etkilemezler. (Şekil III.6b). Ancak araştırmacılar pürüzlülüğün, film kalınlığının dörtte birinden daha yüksek olması halinde, türbülansı artıracak ve akım üzerine bazı ilave etkiler getireceğini göstermişlerdir. Böylece, laminar film kalınlığı etkileyici pürüzlülük için bir kriter olmakta ve bu film kalınlığı da belirli akım özelliğine bağlı olduğundan, Reynolds sayısı ve laminar filmin kalınlığına bağlı olarak aynı sınır yüzeyi “pürüzlü” veya “pürüzsüz” kabul edilebilmektedir. Yani; düşük Reynolds sayısında pürüzsüz olarak kabul edilen bir yüzey daha yüksek bir Reynolds sayısında, laminar film kalınlığı inceleyeceğinden, davranışı etkilemekte ve pürüzlü olarak kabul edilebilmektedir. [4]

Yüzey pürüzlülüğü bir akışkan akımından türbülansı arttırdığından ve dolayısıyla viskoz etkiyi azalttığından, bazı ön tahminler, enerji kayıpları üzerinde pürüzlülüğün etkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır. Pürüzlü bir yüzey üzerindeki türbülanslı akımda enerji, pürüzlü tümsekler tarafından sürekli olarak üretilen türbülans da yapılan iş tarafından tüketilir. Bu türbülans da kullanılan enerji, akışkan kütlelerinin kinetik enerjisi olduğundan ve bu da hızların kareleri ile orantılı bulunduğu yüzey pürüzlülüğünün neden olduğu enerji tüketimi ve kaybının, hızların karesiyle değişmesi gerektiği söylenebilir.

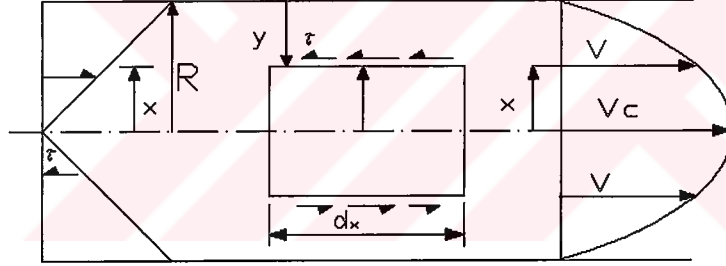
Pürüzsüz bir yüzey üzerinde türbülanslı akım meydana geldiğinde laminar filmdeki viskoz etkiden doğan kayma gerilmesine karşı, mevcut akışkan enerjisi hesabına iş yapılır. Türbülans ve viskoz etkinin mevcut olduğu bu konumda, enerji dönüşümleriyle hızlar arasında bir bağıntı öngörülmemiştir. Ancak, bir çok araştırmacı pürüzsüz yüzeylerde türbülanslı akım konumunda enerji israfı ve direncin; hızların 1,75-1,85 inci

kuvvetleriyle değiştiğini bildirmişlerdir. Sınır yüzeylerde laminar akım konumunda enerji israfı ve direnç, hızlarla doğru orantılıdır.

III.5. Borularda İç Akım

III.5.1. Laminar Akım (Hagen-Poiseuille Kanunu)

Bir boru içerisinde gerçek bir akışkan laminar akımında hız profili nasıl olacaktır. Hızın cidarda sıfır olduğunu ve cidardan uzaklaştıkça arttığını biliyoruz. Ancak bunun nasıl değiştiğini ve laminar ve türbülanslı akım konumlarında fonksiyonun ne olduğunu araştıralım.



Şekil III.7. Laminar akımda bir akışkan elemanı üzerine etkiyen kuvvetler

Önce; bir boruda laminar akım halinde bir akışkan elemanı üzerinde kuvvetlerin dengesini göz önüne alalım. Şekil III.7’de gösterildiği gibi, akışkan elemanı r yarıçapında ve dx uzunluğunda silindirik bir partikül olsun. Partikülün ön ve arka kesitlerinde basınçlar sırasıyla p ve $p + (\partial p / \partial x)dx$, yanal yüzeyinde ise teğetsel gerilme τ olduğuna göre, cebri bir boru sisteminde ağırlık (gravite) kuvveti etkimeyeceğinden, kuvvetler dengesi;

$$p \cdot \pi r^2 - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \pi r^2 - \tau \cdot 2\pi r dx = 0 \text{ den}$$

$$-r \frac{\partial p}{\partial x} - 2\tau = 0 \rightarrow \tau = -\frac{r}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{III.7})$$

bulunur. Laminar akımda kayma gerilmesi sadece vizkoziteden meydana geldiğinden (III.2) ifadesi ;

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = -\mu \frac{dv}{dr}$$

şeklinde yazılabilir. Bunu (III.7) denkleminde yerine koyarsak;

$$\mu \frac{dv}{dy} = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dx}$$

olur. Buradan hız ifadesini diferansiyel formda çeker ve integre edersek;

$$\int dv = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \int r dr \rightarrow v = \frac{-1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \frac{r^2}{2} + C$$



bulunur. Burada C integral sabiti olup sınır şartlarından hesaplanır. Katı cidar etrafındaki hareketden, gerçek akışkanların katı cidar üzerinde hızlarının (cidara göre) sıfır olduğunu ve cidardan uzaklaştıkça arttığını biliyoruz. Buna göre sınır şartları ;

$$r=R \text{ için } v=0 \text{ dan } 0 = \frac{-1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{2} + C \rightarrow C = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{2}$$

için integral sabiti yerine konursa

$$V = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (R^2 - r^2) \quad (\text{III.8})$$

olarak hız ifadesi bulunmuş olur. (III.8) ifadesi hız profilinin parabolik bir eğri olduğunu gösterir. Yine buradan hızın boru ekseninde ($r=0$ için) maksimum olduğu görülür. Böylece maksimum hız ;

$$V_c = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) R^2 \quad (\text{III.8a})$$

şekline gelir. Buradan birim boru boyunca basınç değişimi ;

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{4\mu \cdot v_c}{R^2} \quad (\text{III.8b})$$



olarak çekilir. Yukarıdaki (III.8) hız ifadesini debi hesaplamak için kullanacak olursak, boru ekseninden r kadar uzakta dr kalınlığındaki dA elemanter alanından geçen debi ;

$$dQ = 2\pi r \cdot v \cdot dr \quad (III.9)$$

olarak yazılır. Burada hız ifadesini yerine koyup integrasyon işlemi yaparsak;

$$Q = \frac{2\pi}{4\mu} \frac{dp}{dx} \int_0^R (r^2 - R^2) r dr \rightarrow Q = \frac{2\pi}{4\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{r^4}{4} - \frac{R^2 r^2}{2} \right) \Big|_0^R \quad (III.9a)$$

olur. Buradan sistemin debisi ;

$$Q = \frac{\pi}{2\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \cdot \frac{R^2}{4} \quad (III.9b)$$

olarak bulunmuş olur. V ortalama hız olmak kaydıyla;

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (III.10)$$

eşitliğinde debi ifadesi (III.9b) yerine konursa;

$$V = \frac{\frac{\pi}{8\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) R^4}{R^2} = \frac{1}{8\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) R^2 \quad (\text{III.11})$$

ortalama hız elde edilmiş olur. Buna göre ortalama hızın maksimum hıza oranı ;

$$\frac{V}{V_c} = \frac{1}{2} \quad (\text{III.12})$$

olarak elde edilir. Zaten bu bir parabol özelliğidir. Buradan birim boru boyunca basınç değişimi ;

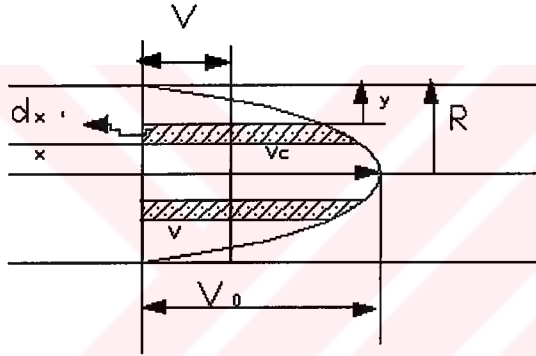
$$-\frac{dp}{dx} = \frac{8\mu V}{R^2} = \frac{32\mu V}{D^2} \quad (\text{III.13})$$

olarak bulunur. Burada D boru çapıdır.



III.5.1.1. Kinetik Enerji Katsayısı

Tek doğrultu için Bernoulli denklemini yazarken tüm akışkan bir akım borusu içerisinde kabul ederek kinetik enerji ifadesini ortalama hıza göre $V^2/2g$ şeklinde ifade etmiş idik. Halbuki bu, kesit boyunca alınan $V^2/2g$ 'lerin ortalaması olmayabilir. Bu durumda ortalama hıza dayanarak birim ağırlıktaki akışkan için yazılan kinetik enerji teriminin $\alpha.V^2/2g$ olması gerekir. Burada α ; kinetik enerji katsayısı olup, akım rejimine göre birden az veya çok farklı olabilir. Şimdi laminar akımda kinetik enerji katsayısı α 'yı hesaplayalım.



Şekil III.8. Laminar akım parabolik hız profili

Şekil III.8'deki parabolik hız profilinde, eksenden r kadar uzakta dr kalınlığında silindirik kabuk halindeki akışkan kütesinin her noktasında hız V 'dir. Buna göre birim zamandaki kinetik enerji ;

$$\frac{K.E}{T} = p2\pi \int rV \frac{V^2}{2} dr = p\pi \int rV^3 dr \quad (III.14)$$

olur. Burada hız, v , ifadesi (III.8) bağıntısından yerine konulursa;



$$\frac{K.E}{T} = p\pi \frac{1}{64\mu^3} \left(-\frac{dp}{dx} \right) \int_0^R (R^2 - r^2)^3 dr \quad (\text{III.14a})$$

olur. Buradan integrasyon sonucu birim zamandaki gerçek kinetik enerji ;

$$\frac{K.E}{T} = \frac{p\pi}{64\mu^3} \left(-\frac{dp}{dx} \right)^3 \frac{R^3}{8} \quad (\text{III.14b})$$

olarak bulunur. Halbuki ortalama hıza göre birim zamandaki kinetik enerjiyi yazacak olursak ;

$$\frac{K.E'}{T} = p\pi R^2 V \frac{V^2}{2} = p\pi R^2 \frac{V^3}{2} \quad (\text{III.15})$$

olur. Burada ortalama hızın değerini (III.11) ifadesinden yerine koyarsak ;

$$\frac{K.E'}{T} = \frac{p\pi}{64\mu^3} \left(-\frac{dp}{dx} \right)^3 \frac{R^8}{16} \quad (\text{III.15a})$$



bulunur. Gerçek kinetik enerjinin, ortalama hız ile hesaplanan kinetik enerjiye oranı “ α ” diyecek olursak ;

$$\alpha = \frac{K.E}{K.E'} = 2 \quad (\text{III.16})$$

elde edilir. Buna göre Laminar akım rejiminde kinetik enerji ifadesi ;

$$\frac{V^2}{2g} = \alpha \frac{V^2}{2g} = 2 \frac{V^2}{2g} = \frac{V^2}{g} \quad (\text{III.17})$$

olarak yazılır.

III.5.2. Türbülanslı Akım

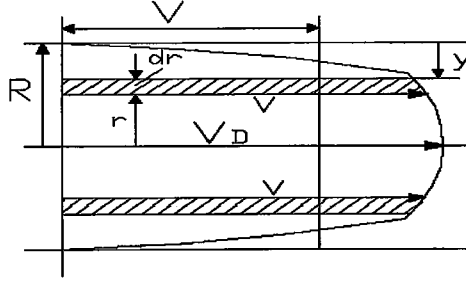
III.5.2.1. Hız Profili ve Ortalama Hızın Maksimum Hıza Oranı

Türbülanslı akımda pürüzsüz bir boruda hız dağılımının yaklaşık olarak Prandtl’in yedinci kök kanunuyla belirtilebileceği ifade edilmiştir. Buna göre ;

$$\frac{v}{v_c} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/7} = \left(\frac{R-h}{R} \right)^{1/7} \quad (\text{III.18})$$



olur. Bazı literatürlerde Reynolds Sayısının 10^5 değerine kadar yedinci kök, daha yukarı değerlerinde ise sekizinci kök tavsiye edilmektedir. Pürüzlü borular halinde ise kök farkı alınmak suretiyle aynı formül kullanabilir.



Şekil III.9. Türbülanslı akım parabolik hız profili

Denklem (III.18)'de $m = 1/7$ alırsak ;

$$\frac{v}{V_c} = \left(\frac{y}{R}\right)^m \quad v = V_c \left(\frac{R-h}{R}\right)^m \quad (\text{III.19})$$

olur. Debi ifadesinde ;

$$Q = 2\pi \int r v dr \quad (\text{III.20})$$

$$r = R - y \quad dr = -dy \quad \text{ve} \quad v = V_c \left(\frac{y}{R}\right)^m \quad (\text{III.21})$$

eşitlikleri yerine konursa ;



$$Q = 2\pi \int_R^0 (R-y) \cdot v_c \left(\frac{y}{R} \right)^m (-dy) = 2\pi \frac{V_c}{R^m} \int_0^R (R-y) \cdot y^m \cdot dy \quad (\text{III.22})$$

şekline gelir. Buradan integrasyon yapıp, sınırlar yerine konursa, debi ;

$$Q = \frac{2\pi V_c}{R^m} R^2 \left(\frac{R^m}{m+1} - \frac{R^m}{m+2} \right) = 2\pi V_c R^2 \frac{m+2-m-1}{(m+1)(m+2)} \quad (\text{III.22a})$$

bulunur. Bu eşitlik düzenlenirse ;

$$Q = 2\pi v_c R^2 \frac{1}{(m+1)(m+2)} \quad (\text{III.23})$$

olur. $m=1/7$ yerine konursa sistemin debisi ;

$$Q = \frac{2.49 \cdot \pi \cdot V_c R^2}{8.15} = \frac{49 \cdot \pi \cdot V_c R^2}{60} \quad (\text{III.23a})$$

bulunur. Aynı borudaki debi ortalama hız ile yazılacak olursa ;

$Q = \rho R^2 V$ olacaktır. Debiler aynı olduğuna göre, hızlar oranı, yani; ortalama hızın maksimum hıza oranı ;

$$\frac{V}{V_c} = \frac{2}{(m+1)(m+2)} = \frac{49}{60} \quad (\text{III.24})$$



olur. Buna göre; pürüzsüz bir boruda türbülanslı akım halinde hız profilinin yaklaşık olarak yedinci kök kanuna göre değiştiği kabul edildiğinde, ortalama hızın maksimum hıza oranı ;

$$\frac{V}{V_c} = \frac{49}{60} \quad (\text{III.24a})$$

olarak bulunur.

III.5.2.2. Kinetik Enerji Katsayısı

Türbülanslı akımda kinetik enerji katsayısı hesaplamak için, boru içerisindeki hız dağılımı yine yedinci kök kanuna göre kabul edildiğinde ;

$$\frac{v}{v_c} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/7} \Rightarrow r = R - y \quad dr = -dy \quad (\text{III.25})$$

için birim zamandaki kinetik enerji ;

$$\frac{K.E}{T} = \rho 2\pi \int r dr \cdot v \cdot \frac{v^2}{2} \quad (\text{III.26})$$

olur. yukarıdaki hız ve yarıçap ifadelerini yerine konursa ;

$$\frac{K.E}{T} = \rho \pi \int_0^R (R - y) \left[V_c \left(\frac{y}{R} \right)^m \right]^3 (-dy) = \rho \pi \int_0^R (R - y) V_c^3 \left(\frac{y}{R} \right)^{3m} dy \quad (\text{III.26a})$$

olur. İntegrasyon yapıp, sınırlar yerlerine konulduğunda, birim zamandaki gerçek kinetik enerji ;

$$\frac{K.E}{T} = \rho \pi R^2 V_c^3 \cdot R^2 \frac{1}{(3m+1)(3m+2)} \quad (\text{III.27})$$

olarak bulunur. Ortalama hıza dayandırarak kinetik enerjiyi birim zaman içinde yazacak olursak ;

$$\frac{K.E'}{T} = \rho \pi R^2 V \frac{V^2}{2} = \rho \pi R^2 \frac{V^3}{2} \quad (\text{III.28})$$

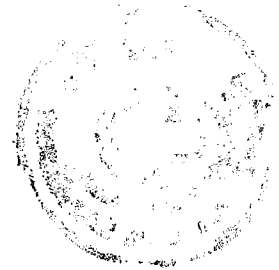
olur. Yine kinetik enerji katsayısı α olarak alınırsa ;

$$\alpha = \frac{K.E}{K.E'} = \left(\frac{V_c}{V} \right)^3 \frac{1}{(3m+1)(3m+2)} \quad (\text{III.29})$$

olarak elde edilir. Burada maksimum hızın ortalama hıza oranının (III.24a) ifadesinden 60/49 olduğu dikkate alınır ve $m=1/7$ kabul edilirse, türbülanslı akımda kinetik enerji katsayısı ;

$$\alpha = \left(\frac{60}{49} \right)^3 \frac{2.49}{10.17} = 1.058 \quad (\text{III.29a})$$

olarak bulunur. Buradan açıkça görüldüğü gibi pürüzsüz bir boruda türbülanslı akım halinde kinetik enerji katsayısı, α , birden çok az farklı çıkmaktadır. Bu durumda çok büyük bir yaklaşıklıkla kinetik enerji terimi Bernoulli Denkleminde olduğu gibi aynen kullanılabilir.



BÖLÜM IV

ENERJİ KAYIPLARININ TEORİK ANALİZİ

IV.1. Giriş

Gerçek akışkanların borularda akımı konumunda Bernoulli denkleminin “viskozitesiz akışkan” kabulüyle, kayma gerilmesinin meydana getirdiği direnci ihmal ederek, elde edildiği formda kullanılmayacağı aşikardır. Ayrıca; üniform akım veya akım borusu kesiti boyunca ortalama hız değerine dayalı olarak yazılan kinetik enerji teriminin de gerçek kinetik enerji aksettirmesi için bir düzeltme faktörü, α , ile çarpılması gerektiği daha önce ifade edildi. Böylece; dört farklı kabule dayalı olarak elde edilen Bernoulli Denkleminin gerçek akışkan akımı problemlerine, ancak bir takım düzeltmelerle, kullanılabilir hale getirilmesi mümkündür.

Buna göre; sıkıştırılmayan bir akışkan ortam, stasyoner akım konumunda bir akım borusu içerisinde hareket ederken 1 ve 2 kesitleri arasında Bernoulli Denklemi düzeltilmiş formuyla ;

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + H_{k1-2} \quad (IV.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada α_1 ve α_2 kinetik enerji katsayısı (düzeltme faktörü) olup, birçok bakımlardan ihmal edilebilir. Şöyle ki ;

1. Uygulamada, boru akımı problemlerinin çoğunda türbülanslı akım geçerli olduğundan, α katsayısı türbülanslı akımda 1'e çok yakın (1,058, denklem III.29a) olduğundan.

2. α 'nın büyük olduğu laminar akımda hız enerjisi (kinetik enerji) Bernoulli'nin diğer terimlerine nazaran ihmal edilebilir mertebededir.



3. Boru akımlarının çoğunda α 'nın dahil olduğu hız enerjileri terimleri varılan sonuçları çok az etkilemektedir.
4. α 'nın etkisi denklemin her iki tarafında mevcut olduğundan birbirini yok eder.
5. Mühendislik çözümleri, her zaman, denklemden α 'nın hesaba katılmasını gerektirecek hassasiyette değildir.

Böylece IV.1. denkleminin pratik problemlere uygulanması öncelikle enerji kaybını etkileyen faktörlerin değerlendirilmesi ve bu değerleri hesaplamak için geçerli metodların bilinmesine bağlıdır. Bu denklemden yukarıdaki değerlendirmelere göre kinetik enerji katsayısı, $\alpha=1$ alınabilir ve denklemin Bernoulli bağıntısından farklılığı giderilebilir. Ancak, hareket eden akışkanlarda ortaya çıkan viskozite ve katı cidar etkisinden doğan enerji kaybı terimini yok saymak veya ihmal etmek mümkün değildir. Hatta birçok pratik problemlerde mevcut enerjinin tamamı enerji kabına harcanabilir. IV.1. denkleminde görüldüğü gibi enerji kaybı terimi eşitliğin ikinci (sağ) tarafına pozitif olarak girmektedir. Bu çalışmada enerji kaybı ifadesini iki ana başlık altında inceleyeceğiz.

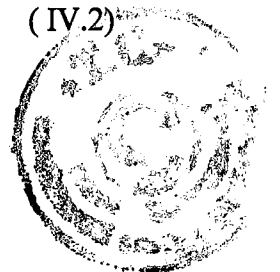
1. Sürekli (üniversal) kayıplar.
2. Lokal (yerel) kayıplar.

IV.2. Sürekli (Üniversal Kayıplar)

Bu tür kayıplara başka bir ifade ile düz boru kayıpları da diyoruz. Uzun, silindirik ve düz bir boruda su akımı üzerine ilk deneyler 1850 yılında yapılarak, düz bir boruda enerji kaybını hız enerjisi ve boru uzunluğu ile doğru orantılı, boru çapı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Sürtünme faktörü olarak isimlendirilen bir oran katsayısı λ kullanılarak enerji kaybı için Darcy, Weisbach ve diğer araştırmacılar ;

$$H_k = \lambda \frac{LV^2}{d2g}$$

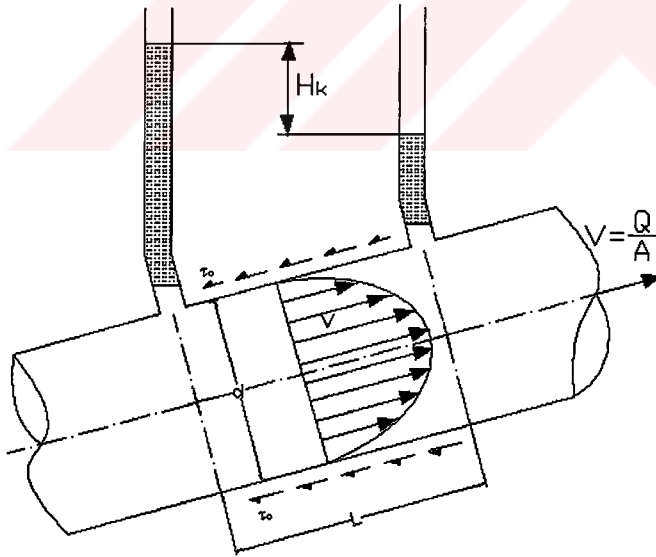
(IV.2)



bağıntısını önermişlerdir. Yapılan ilk gözlemler; sürtünme faktörü (üniversal enerji kayıp katsayısı) λ 'nın birinci derecede boru pürüzlülüğünden başka, hız ve boru çapına da bağlı olduğunu, son zamanlardaki gözlemler ise aynı zamanda akışkanın viskozitesine de bağlı olduğunu göstermiştir. Genellikle “Darcy Denklemi” olarak isimlendirilen bu ifade, uzun, düz ve üniform borularda boru sürtünmesinin meydana getirdiği enerji kaybı için halen de kullanılan temel bir bağıntıdır. IV.2. denklemi ile cidar kayma gerilmesi $\tau_0 = d \cdot \Delta p / 4L$ denklemleri, cidar kayma gerilmesi τ_0 ile düz boru enerji kayıp katsayısı (sürtünme faktörü) λ arasında temel bir bağıntı elde etmek için ($\Delta p = gH_k$ olduğu düşünülürse);

$$P_0 = \lambda \frac{\rho V^2}{8} \quad (IV.3)$$

şeklinde birleştirilebilir. Sürtünme faktörü, özgül kütle ve ortalama hızın bir fonksiyonu olan, cidar kayma gerilmesi (IV.3) bağıntısından çekilen ;



Şekil IV.1. Bir borudaki akımı etkileyen parametreler

$\sqrt{\tau_0 / \rho}$ ifadesi, λ boyutsuz olduğuna göre, hız boyutunda olacaktır. Bu ifadeye “sürtünme hızı” denir ve v^* ile gösterilirse;

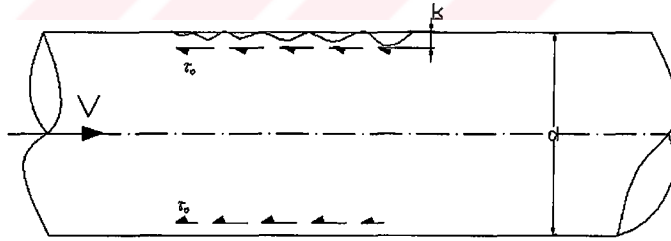


$$v^* = \sqrt{\tau_0 / \rho} = V \sqrt{\lambda / 8} \quad (\text{IV.4})$$

olur. Her ne kadar hızının fiziksel anlamı bu cebrik tanımlama ile bağımlı değilse de, sadece akışkan özgül kütlesi ve cidar kayma gerilmesi ile tarif edilen bir hız olduğundan, akım rejimi (türbülans ve laminar) veya sınır yüzeyi (pürüzlü veya pürüzsüz) ne olursa olsun tanım değişmez. İleri uygulamalarda geniş bir tatbikat alanı bulacağından bu ifadeyi genelleştirmek çok faydalıdır.

IV.2.1. Sürtünme Faktörüne Boyut Analizi Yaklaşımı

Sürtünme faktörü (üniversal yük kaybı katsayısı) λ için, boyut analizi yöntemiyle bir yaklaşım yapılabilir. Bu, probleme genel bir işlerlik kazandıracak ve sürtünme faktörüne bağlı değişkenleri gösterecektir. Her ne kadar böyle bir analiz tek başına kesin matematik bağıntıları vermese de önemli değişken kombinasyonlarını ortaya çıkaracak ve boru deney sonuçlarını verecek geçerli metodları sağlayacaktır.



Şekil IV.2. d çaplı bir borudaki akışkan akımı

Şekil IV.2’de, d çaplı bir boruda özgül kütlesi ρ ve vizkozitesi μ olan bir akışkan, V ortalama hızı ile akmaktadır. Boru cidarında ortalama pürüz yüksekliği k, boru cidarında her yerde aynı şekilde dağılmış olsun. Cidar kayma gerilmesi τ_0 yukarıdaki değişkenlere bağlı olduğuna göre olayı formüle etmek isteyelim. Buna göre;



$$\tau_0 = F(V, d, \rho, k, \mu) \quad (IV.5)$$

şeklinde yazılabilir. Boyut analizi metodlarıyla bunun ;

$$\tau_0 = (\rho V d / \mu) (k/d) \rho V^2 \quad (IV.6)$$

olduğu kolayca gösterilebilir. Bu da (IV.3) denklemiyle karşılaştırıldığında;

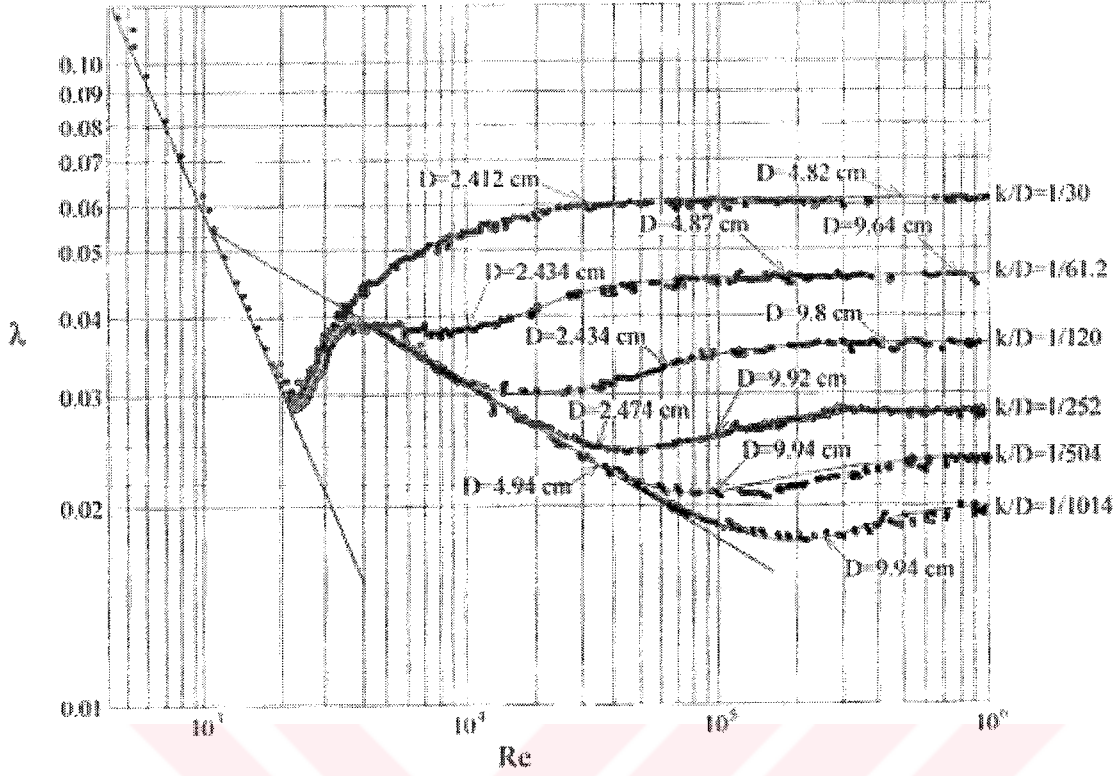
$$\lambda = F'(Re, \epsilon) \quad (IV.7)$$

bulunur. Burada $\epsilon(k/d)$ bağıl pürüzlülük olarak isimlendirilir. Böylece deneysel sonuçların önceki bilgileri dışında, universal kayıp katsayısı λ 'nın; sadece akımın Reynolds sayısı ve borunun izafi pürüzlülüğüne, bağımlı olduğu gösterilmiş olur. Buradan açıkça görüldüğü gibi, boyut analizi yöntemiyle dairesel borulardaki akımda tüm akışkanları kapsayan tek ve genel bir sonuç elde edilmiştir.

Bu bağıntının geçerliliği deneysel çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Pürüzsüz borularla yapılan deneylerde bulunan sonuçlar bu fonksiyonel bağıntıdan $\pm\%5$ sapma göstermiştir. Logaritmik ölçekli Reynolds sayısına karşılık sürtünme faktörü değişimine “Stanton Diyagramı” denir. Blasius pürüzsüz bir boruda türbülanslı akım konumunu ilk deneyen şahıs olup, kendi sonuçlarını, $Re = 100000$ değerine kadar, sağlayan ampirik bir formül önermiştir. Blasius formülü olarak isimlenen bu ifade ;

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (IV.8)$$

şeklinde olup, halen kullanılmaktadır.



Şekil IV.3. Nikuradse'nin deney sonuçları

Nikuradse, kumla pürüzlendirdiği borular ile yapılmış olduğu deneyde, değişik çaplı üç boru alarak, boru cidarını takriben aynı çaplı kum tanelerini yapıştırarak değişik borularda aynı k/d sağlayan pürüzlülük oluşturdu. Bu deneyler tek bir $\epsilon(k/d)$ değeri için λ - Re eğrisinin gerçek boru çapına bakmaksızın, sürekliliğini koruduğunu göstermiştir. Bu deneyler $\lambda=f(Re, \epsilon)$ değişiminin, tek bir pürüzlülük için, geçerliliğini de kanıtlamıştır. Nikuradse'nin sonuçları Şekil IV.3'de gösterilmiştir.

Kendiliğinden pürüzlü olan boruların incelenmesi son derece karmaşık olduğundan temel bağlantıların çıkarılması için yapılan deneylerin çoğu, yapay olarak pürüzlendirilmiş borularda sürtünme faktörünü veren en uygun diyagramlardan birini geliştirmiştir. Bu, λ 'yı; Reynolds ve bağıl pürüzlülüğünün değerleri Colebrook formülünde, deneye bulunan λ ve Reynolds'ların yerlerine konulmasıyla elde edilir, bu sonuçlar çok yakın bir şekilde tabii boru konumunu verir. Bu değerler Moody diyagramının (Şekil IV.4) sol alt köşesine tablo halinde verilmiştir. Colebrook formülü; geçiş bölgesin-

deki k/d =sabit eğrilerin formülünü belirtir. Nikuradse, pürüzsüz bir boruda laminar ve türbülanslı akım konumunda sürtünme faktörü λ 'nın;

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,86 \ln(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (\text{IV.9})$$

şeklinde ifade edilebileceğini göstermiştir. Pürüzlü borularda ise yine kendisinin yapmış olduğu kum taneleriyle pürüzlendirilmiş boru deneyiyle, türbülanslı bölgede sürtünme faktörü λ 'nın ;

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 0,86 \ln(k/d) \quad (\text{IV.10})$$

olarak değiştiğini ifade etmiştir. Kumla pürüzlendirilmiş borularda pürüz yüksekliği k ; ticari boruların pürüzlülüğünün bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Tam teşekkül etmiş türbülanslı bölgede λ 'nın değeri biliniyor ise, pürüz yüksekliği (IV.9) denkleminde hesaplanabilir. Geçiş bölgesinde λ ; Reynolds ve bağıl pürüzlülüğünün (k/d) fonksiyonu olduğundan, kum taneleriyle pürüzlendirilmiş borular ticari borulardan farklı sonuçlar vermektedir. Bu durum, (IV.9) ve (IV.10) bağıntıları kullanılarak, kum taneleriyle pürüzlendirilmiş ve ticari borularla yapılan testlerde elde edilen bir grafik ile tesbit edilmiştir. Buna göre (IV.10) bağıntısı yeniden düzenlenerek ve (IV.9) denklemiyle birleştirilerek;

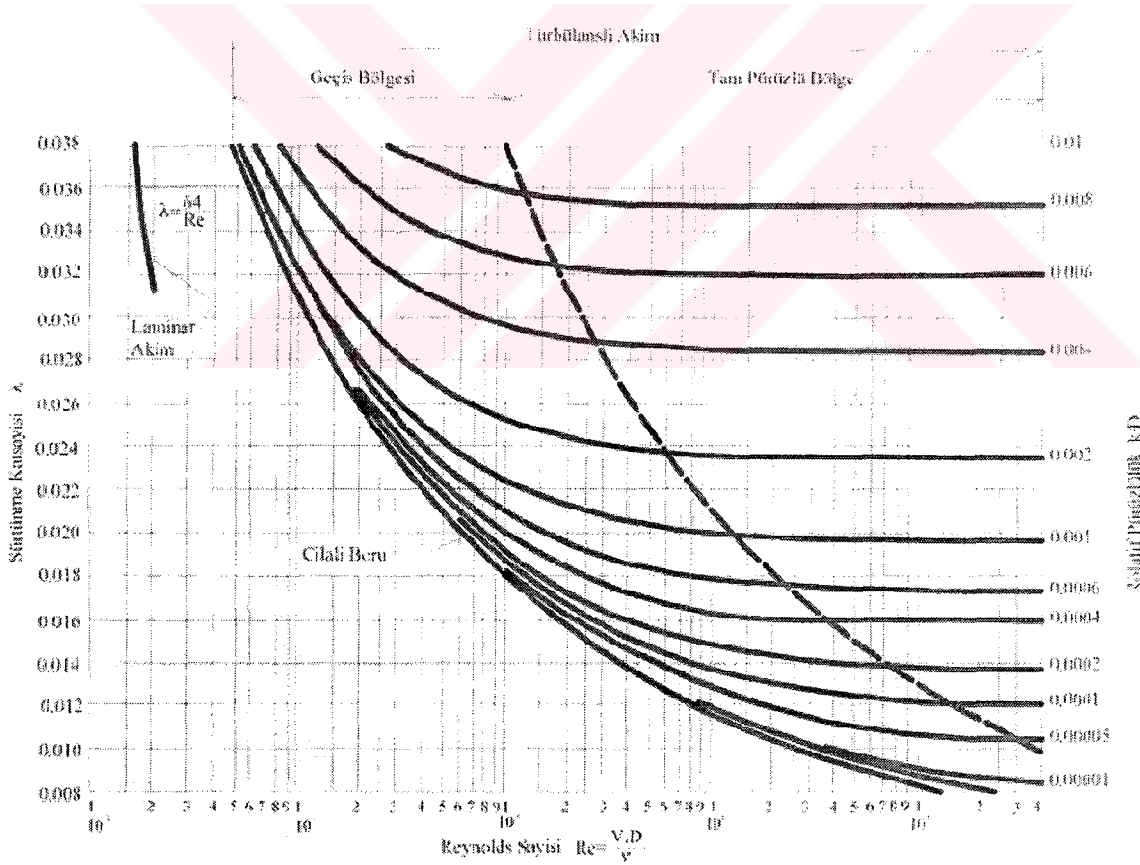
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,86 \ln(k/d) = 0,86 \ln(\text{Re} \sqrt{\lambda} k/d) - 0,8 \quad (\text{IV.11})$$

bağıntısı elde edilir. Burada; $1/\sqrt{\lambda} + 0,86 \ln(k/d)$ yi ordinat alıp, $\ln(\text{Re} \sqrt{\lambda} k/d)$ yi apsis almak suretiyle grafik haline getirildiğinde; pürüzsüz boru testi sonuçları; eğimi 0,86 olan bir doğru ve pürüzlü boru test sonuçları komple türbülanslı bölgede yatay bir doğru olarak elde edilir. Nikuradse'nin kum taneleriyle pürüzlendirilmiş boru testi; geçiş bölgesinde kesin uzun çizgilerle ve ticari boru test sonuçları ise dolu çizgi halinde bir eğri şeklinde ifade edilmiştir. (Şekil IV.3)

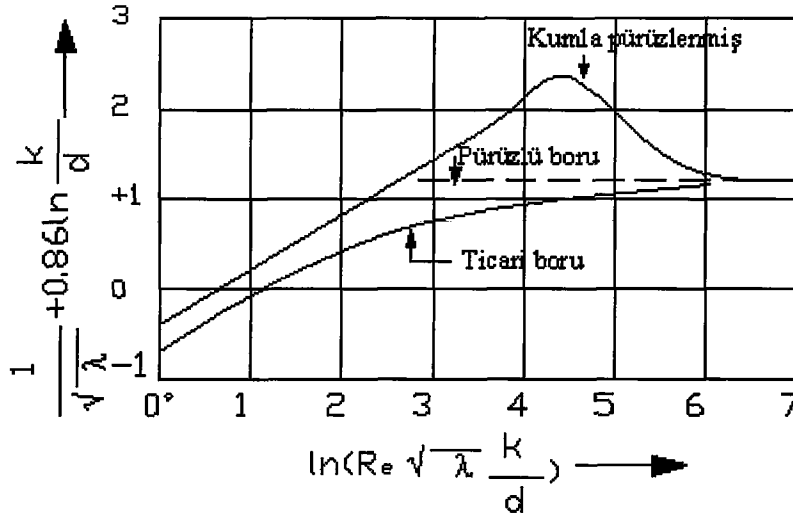
Ticari pürüzlü boru eğrisiyle Nikuradse'nin yapay pürüzlü eğrisi arasındaki büyük fark; laminar alt tabaka veya laminar filmin yapay pürüzlülüğün tamamını kapladığı veya film kalınlığı azalırken pürüzlerin üniform bir çıkıntı oluşturduğu şeklinde izah edilebilir. Üniformluğun büyük çapta bozulduğu ticari borularla yapılan testlerde, başlangıçtaki küçük parçalar, Reynolds sayısının artmasıyla film kalınlığı azalırken, genişlemektedir. Colebrook tarafından, pürüzsüz borular ve tam türbülans aralığındaki bölgede, ticari borular için ;

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,86 \ln \left(\frac{k/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (IV.12)$$

şeklinde bir bağıntı geliştirilmiştir.



Şekil IV.4. Moody Diyagramı



Şekil IV.5. Farklı boru tipleri için “Colebrook Geçiş Fonksiyonu”

Moody diyagramında, geçiş bölgesindeki k/d =sabit eğrilerinin şeklini bu Colebrook bağıntısı verir. Moody diyagramında laminar akım için gösterilen doğru hat ise, Hagen-posieuille denkleminin bir sonucudur. Bu denklem daha önce (III.11) bağıntısıyla ;

$$V = \frac{1}{8\mu} \left(-\frac{dp}{dx} \right) R^2 \quad (IV.13)$$

olarak verilmişti. Buradaki negatiflik basıncının hareket doğrultusunda azaldığını göstermektedir. Buna göre $-dp/dx$ 'i birim boru boyunda enerji kaybı olarak ifade eder ve gH_k/L gösterirsek, Hagen-Poiseuille denklemi ;

$$V = \frac{1}{8\mu} \frac{\gamma H_k}{L} R^2 \quad (IV.14)$$

şekline gelir. Buradan H_k 'yı çekip, yarıçap $R=D/2$ olarak ifade edilirse;

$$H_k = \frac{8\mu V L}{\gamma R^2} = \frac{64\mu L V}{\rho D D 2g} = \frac{64}{\gamma \rho V D / \mu} \frac{L V^2}{D 2g} \quad (IV.15)$$

olur. Buradan (IV.2) bağıntısını da gözönünde bulundurursak;

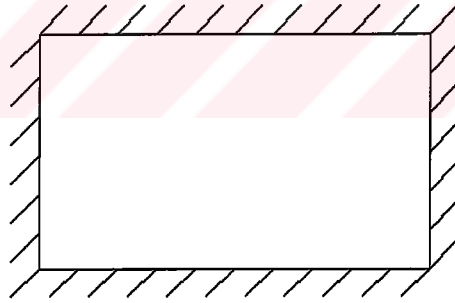
$$H_k = \lambda \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{IV.16})$$

bulunur. Buradan da ;

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{IV.17})$$

olacaktır. Pürüzlü borular için tam türbülanslı bölgeye girildiğinde; film kalınlığı pürüz yüksekliklerine nazaran ihmal edilebilir seviyeye inecek ve pürüzlerin tamamı türbülans oluşturacaktır. Bu bölgede, enerji kaybı üzerinde viskozitenin hiçbir etkisi kalmayacaktır. Zira; Reynolds sayısı ne kadar arttırılırsa arttırılsın sürtünme faktörü sabit kalmakta ve Reynolds değeri ile değişmemektedir. Bu bölgede enerji kaybı V^2 enerji kaybı kanununa tamamen uymakta ve enerji kaybı hızın karesi ile doğrudan değişmektedir.

IV.2.2. Dairesel Olmayan Borularda Enerji Kaybı ve Hidrolik Çap



Şekil IV.6. Dairesel kesitli olmayan boru

Mühendislik uygulamalarında genellikle dairesel borular kullanılsa da, bazı durumlarda dairesel olmayan veya dairesel borularda, tam dolu cebri bir akış olmadığı hallerle de karşılaşılabilir. Bu durumlarda boru çapı olarak hidrolik çap, D_h , kullanılır. Buna göre hidrolik çap ;

$$D_h = \frac{4.A}{\zeta} = \frac{4 \times \text{Kesit alanı}}{\text{Islak çevre}} \quad (\text{IV.18})$$

olarak tarif edilir. Böyle borularda D_h hidrolik çap hesaplanır ve Reynolds sayısı bu çapa göre, $Re=VD/v'$ 'den bulunur ve izafi pürüzlülük de, k/D_h 'dan hesaplanarak Moody diyagramından λ çekilir, ve ;

$$H_k = \lambda \frac{L}{D_k} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{IV.19})$$

şeklinde üniversal kayıp formülünde de çap yerine hidrolik çap kullanılır. Kesiti dairesel formdan çok uzak olmayan durumlarda D yerine D_k konulmakla, dairesel borular için elde edilmiş tüm diyagramlar kullanılabilmekte ve sonuçlar yakın düşmektedir.

IV.3. Lokal – Yerel Kayıplar

Bu tür kayıplar boru sistemlerinde; kesit değişimi, yön değiştirme, manşon, rakor, dirsek ve T gibi bağlantı elemanları, vana ve çek valf gibi tüm elemanlarda meydana gelir. Bir çok sistemlerde ihmal edilebilir mertebede kalmasına rağmen, bazı sistemlerde ihmal edilmez ve büyük önemi haizdir. Hemen hemen tüm konumlarda bu kayıplar deneyle tesbit edilir. Bunlar içerisinde en önemli istisnalardan birisi ani genişleme kaybı olup, bir takım basitleştirici kabullerle, aynı anda süreklilik, Bernoulli ve momentum prensiplerinin uygulanmasıyla elde edilen;

$$H_k = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (\text{IV.20})$$

bağıntısıdır. Ancak, Akışkanlar Mekaniğinde tüm lokal kayıp ifadeleri bir kayıp katsayısı ile, hızın çarpımı şeklinde belirtilmektedir. Hız enerji ise, sadece depo giriş konumu hariç, daima kayıp veren elemandan sonraki hıza göredir. Bu durumda (IV.20) bağıntısını, bu genel kurala göre yazmak istersek ;

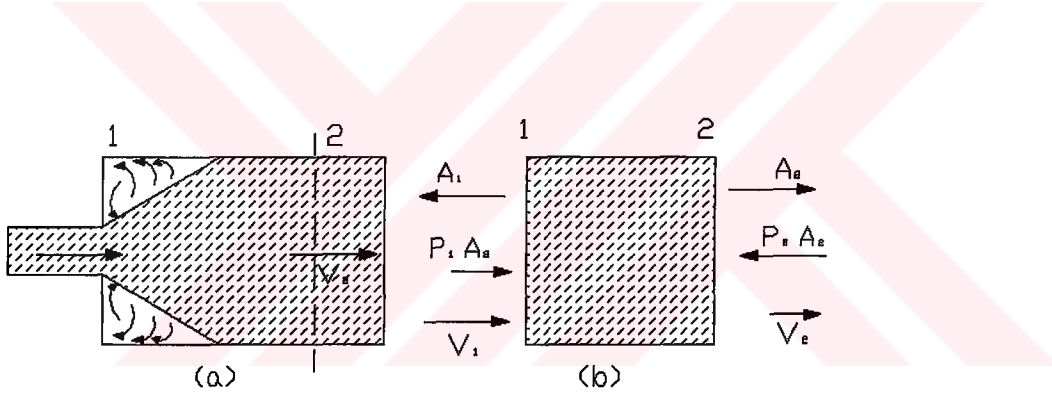
$$H_k = \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{IV.21})$$

olur. Süreklilik denkleminde $A_1 V_1 = A_2 V_2$ ve $V_1/V_2 = A_2/A_1 = (D_2/D_1)^2$ yukarıda yerlerine konursa ;

$$H_k = \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{IV.22})$$

elde edilir. Ani genişleme katsayısına “ K_g ” diyecek olursak ;

$$H_k = K_g \cdot \frac{V_2^2}{2g} \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]^2 \quad (\text{IV.22a})$$



Şekil IV.7. Boru hattındaki ani genişleme

şekline gelir. Denklem (IV.22a) dan açıkça görüldüğü gibi, enerji kayıpları hızın karesi ile değişmektedir. Bu, türbülanslı akım konumunda tüm lokal kayıplar için esas itiba-riyle gerçek bir husustur.

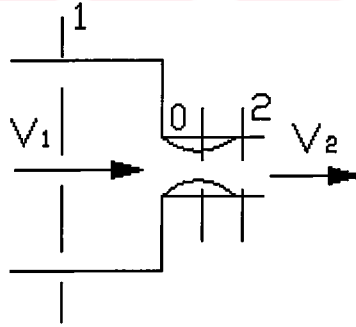
Eğer ani genişleme bir borudan bir depoya oluyorsa, bu durumda depodaki hız sıfır olacağından, borudaki hıza göre yukarıdaki değerlendirme yapılırsa;

$$H_k = K g \frac{V_1^2}{2g}, K = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (\text{IV.23})$$

olur. Boru kesitine göre depo kesiti sonsuz büyük olduğundan, $D_1/D_2=0$ dan $K=1$ ve depo giriş kaybı $V_1^2/2g$ olur. Böylece akışkanın tüm kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüşmüş olur.

IV.3.1. Ani Daralma Kaybı

Şekil IV.8’de gösterildiği gibi, boru kesitindeki ani daralmadan dolayı meydana gelen enerji kaybı; su jetindeki daralmanın bilinmesi kaydıyla, ani genişlemede yapılan hız enerjisine dönüşümü çok yüksek verimde gerçekleşir, dolayısıyla; 1 kesitindeki 0 vena Contrakta (en dar kesit) kesitine geçiş konumunda enerji kaybı; hız enerjisinin basınç enerjisine dönüştüğü 0 kesitinden 2 kesitine geçiş konumundaki enerji kaybına nazaran çok küçüktür ve daima ihmal edilebilir. Yani; daralma olayında enerji kaybı 0 kesiti ile 2 kesiti arasındaki genişlemeden meydana gelmektedir. Buna göre IV.20



Şekil IV.8. Boru hattında ani daralma

denklemini uygularsak, ani daralma kaybı ;



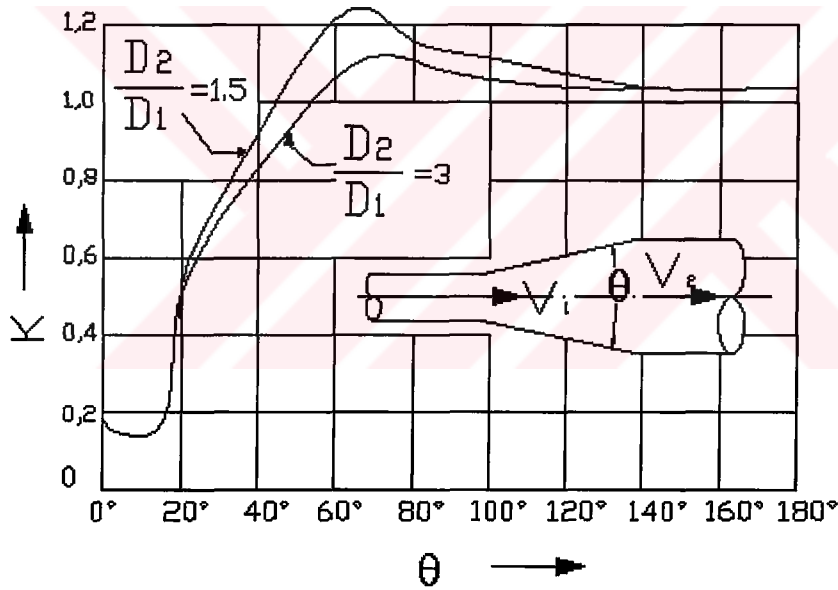
$$H_k = \frac{(V_0 - V_2)^2}{2g} \quad (\text{IV.24})$$

olur. Daralma katsayısı $C_d = A_0/A_2$ olarak tanımlanırsa, süreklilik denkleminde

$V_0 C_d A_2 = V_2 A_2$ yazılır. Buna göre yukarıdaki kayıp ifadesi ;

$$H_k = \left(\frac{1}{C_d} - 1 \right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{IV.25})$$

bulunmuş olur. Weisbach tarafından belirtilen su ortamı için, daralma katsayısı aşağıda tablo halinde verilmiştir.



Şekil IV.9. Boru hattındaki tedrici genişleme

A_2/A_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
C_d	0,624	0,632	0,653	0,659	0,681	0,712	0,755	0,813	0,892	1,0

IV.3.2. Depo Çıkış Kaybı

Bir deponun çıkışında eğer depodan boruya keskin köşeli bir çıkış oluyorsa, bu durumda depo çıkış kaybı; $0,5V^2/2g$ alınır. Eğer, güzel yuvarlatılmış bir çıkış mevcutsa, enerji kaybı $0,01V^2/2g$ ile, $0,05V^2/2g$ arasında alınabilir ve hatta ihmal de edilebilir. Boru deponun içerisine kadar uzanıyor ve çıkış o şekilde sağlanıyorsa, ince boru cidarı için, enerji kaybı $1,0V^2/2g$ alınmalıdır.

IV.3.3. Tedrici Genişleme Kaybı

Tedrici genişlemeden dolayı meydana gelen enerji kaybı (genişleme boyunca üniversal kayıplar da dahil) Gibson tarafından deneysel olarak araştırılmış ve sonuçlar Şekil IV.9'da gösterildiği gibi grafik halinde verilmiştir.

Bazı önemli bağlantı parçalarına ait lokal enerji kaybı katsayısı Crane Company tarafından yapılan yayından alınarak Tablo IV.1'de liste halinde verilmiştir.

Lokal kayıplar bazı hallerde aynı debide, m/N olarak, aynı eşdeğer boru uzunluğu L_e teriminde de ifade edilebilir. Bu durumda ;

$$\lambda \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g} = K \frac{V^2}{2g} \quad (IV.26)$$

olur. Burada K; bir elemanın lokal enerji kayıp katsayısı veya birçok kayıp katsayılarının toplamı olarak verilir. Buna göre ;

$$L_e = \frac{K.D}{\lambda} \quad (IV.27)$$

olur.



Bağlantı Parçaları	Kayıp Katsayıları (K)
Glob valf (tam açık)	10
Köşe vanası (tam açık)	5,0
Sürgülü Cekvalf (tam açık)	2,5
Sürgülü valf (tam açık)	0,19
Kapalı dönüş dirseği	2,2
Standart Te	1,8
Standart dirsek	0,9
Orta bükülmüş dirsek	0,75
Uzun bükülmüş dirsek	0,60

Tablo IV.1. Bazı önemli bağlantı parçalarına ait lokal enerji kayıp katsayıları.

IV.4. Boru Hattı Problemleri

Boru hatlarında stasyoner akım konumunda tüm problemler Bernoulli ve Süreklilik denklemleriyle çözülür. Yalnız Bernoulli denklemini kullanırken, gerçek akışkanlar için uygulanabilir formunu gözönünde bulundurmak gerekir. Çok büyük bir yaklaşıkla ki-

netik enerji katsayısının 1 alınabileceğini önceden ifade etmiştik. Enerji sistemlerde pompa basıncı H_m , Bernoulli denkleminin sol tarafına pozitif olarak girer.

$$\frac{P_1}{\rho} + z_1 \frac{V_1^2}{2g} + H_m = \frac{P_2}{\rho} + z_2 \frac{V_2^2}{2g} + H_0. \quad (IV.28)$$

Gerçek akışkanlarda ihmal edilmesi mümkün olmayan enerji kaybı terimi H_k 'nın da yine Bernoulli denkleminin sağ tarafına pozitif olarak girdiğini biliyoruz.

Bir boru hattında kayıp veren elemanlar, ya seri şekilde (peşpeşe) veya paralel (yanyana) bağlanmıştır. Şimdi bir boru hattında seri veya paralel veya hem seri hem paralel bağlanmış borular halinde enerji kaybının hesaplanacağını inceleyelim.

IV.4.1. Seri Bağlı Borularda Enerji Kaybı

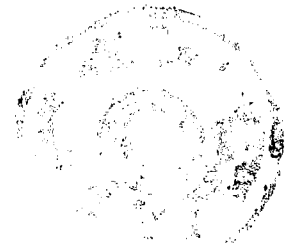
Birden fazla ve değişik çaplarda borunun seri olarak peşpeşe bağlandığı boru hatlarında enerji kaybı terimi; her boruda ve lokal elemanda meydana gelen enerji kaybının birbirine eklenmesinden teşekkül eder. Buna göre boru hattında meydana gelen toplam enerji kaybı ;

$$H_k = H_{k1} + H_{k2} + H_{k3} + \dots \quad (IV.29)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki her H_k 'da üniversal ve lokal kayıplardan meydana geleceğinden;

$$H_{k1} = \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + K_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

$$H_{k2} = \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g}$$

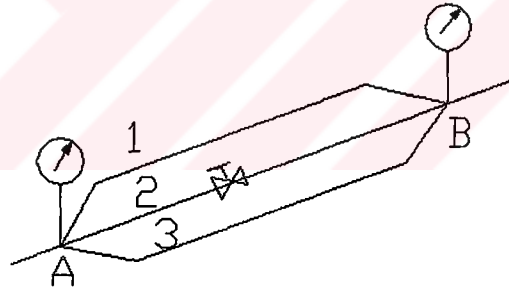


$$H_{k1} = \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + \dots K_1 \frac{V_1^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} + \dots \quad (\text{IV.29a})$$

şeklinde ifade edilebilir.

IV.4.2. Paralel Borularda Enerji Kaybı

Boru hatlarında, paralel borularda enerji kaybının hesaplanması, seri borular-dakine nazaran çok daha zor ve karmaşıktır. Zira bu durumda, bir borudan geçen debi diğerinden geçmeyecektir. Bernoulli denkleminin bir akım çizgisi boyunca yazdığımızdan, paralel konumda bir borudan geçen akım çizgisi diğer borudan geçemeyeceğine göre, her bir boru için ayrı Bernoulli denklemini yazmak gerekir. Süreklilik denklemi bu durumda değişecektir.



Şekil IV.10. Paralel bağlı boruların bağlanması.

Şimdi Şekil IV.10'da gösterildiği gibi, A ile B noktaları arasında, en genel şekilde, değişik çap, uzunluk ve pürüzlülüklerde boruların paralel konumda birbirine bağlanmış olduğunu kabul edelim. Hatta borulardan birinde bir de vana bulunsun. Bu durumda her bir borudaki hız ve debileri hesaplamak isteyelim.



Buna göre, Bernoulli ve süreklilik denklemlerini yazalım. Tabii ki Bernoulli denklemi bir akım çizgisi boyunca geçerli olduğundan her bir boru için ayrı denklem yazmak gerekir. Böylece ;

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \quad (1) \text{ borusu için,}$$

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + K_v \frac{V_2^2}{2g} \quad (2) \text{ borusu için}$$

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \lambda_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \quad (3) \text{ borusu için. (IV.30)}$$

olarak üç adet bernoulli denklemi yazılabilir. Her bir akım çizgisi için hem A ve hem B noktasındaki kot, basınç ve hızlar aynı olduğundan;

$$\lambda_1 \frac{L_1}{D_1} + \frac{V_1^2}{2g} = \lambda_2 + \frac{L_2}{D_2} + \frac{V_2^2}{2g} + \lambda_3 + \frac{L_3}{D_3} + \frac{V_3^2}{2g} \quad (IV.31)$$

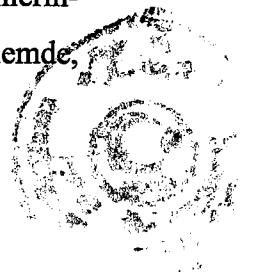
olmalıdır. İşte bu (IV.31) denklemine “paralellik şartı” denir, ve paralel borularda debiler, her bir boruda enerji kayıpları aynı olacak şekilde dağılır. Bu durumda süreklilik denklemi ise;

$$Q_A = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_B \quad (IV.32)$$

şeklinde yazılır, veya hızlar cinsinden;

$$\frac{\pi D_A^2}{4} V_A = \frac{\pi D_1^2}{4} V_1 + \frac{\pi D_2^2}{4} V_2 + \frac{\pi D_3^2}{4} V_3 = \frac{\pi D_B^2}{4} V_B \quad (IV.32a)$$

olarak yazılabilir. Bernoulli denklemi bir akım çizgisi boyunca geçerli olduğundan, o akım çizgisi, ya (1) yolunu, ya (2) yolunu veya (3) yolunu takip ederek A’dan B’ye gidecektir. Üçünden birden gitmesine imkan yoktur. O halde; Bernoulli denklemlerinden yalnız birisi (hangisi olursa olsun farketmez) kullanılacaktır. Böyle bir problemde,



görüldüğü gibi beş adet bilinmeyen (V_A , V_1 , V_2 , V_3 , V_B gibi) karşımıza çıkacaktır. Beş bilinmeyeni çözmek için beş denklem gerekir. Bunlardan birisi Bernoulli denklemlerinden herhangi biridir. İki adet paralellik şartı, iki adet de süreklilikten olmak üzere, görüldüğü gibi beş adet denklem mevcuttur. O halde, beş denklem beş bilinmeyen, çözülebilir. Paralel boru adedi arttığı takdirde bilinmeyen adedi de ona göre artacaktır. Ancak artan her paralel boru, paralellik şartına (IV.31 denklemi) göre bir denklem ilave edecektir. Böylece, her durumda bilinmeyen adedi kadar denklem karşımıza çıkacak ve çözüm mümkün olacaktır.

Özet olarak, paralel boruların çapları, uzunlukları ve üniversal kayıp katsayıları aynı olması halinde ve lokal kayıp elemanı olmadığı veya onlar da aynı olduğu takdirde, herbir borudaki debi ve hız aynı olacaktır.[6]



BÖLÜM V

ENERJİ KAYIPLARININ AZALTILMASI

Sözü edilen sebeplerden dolayı boru hatları boyunca akan akışkanın taşınmasında çok önemli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpların sistem için, masraf ve zaman açısından önemi küçümsenmeyecek miktardadır. Bu nedenle borulama sistemleri dizayn edilirken sürtünme ve lokal kayıplar asgariye indirilmelidir.

Sürekli yük kayıplarını asgariye indirmek için, universal enerji kayıp katsayısı λ' yı küçültmek gerekir. Bunun için pürüzlülüğü az olan borular kullanılmalı, pürüzsüzlük/boruçapı oranı uygun seçilmelidir. Enerji kayıp katsayısı aynı zamanda akışkanın viskozitesi ile de ilgilidir.

Lokal (yerel) kayıpları azaltmak için boru hattı dizaynının gereken hassasiyetle planlanması gerekir. Hat boyunca gereksiz dirsek dönüşlerinden, vana, çek valf v.s. gibi gerekli olmayan elemanlardan kaçınmak gerekir. Bu kayıpları azaltmak amacıyla, dar bir kesitten daha geniş bir kesite olabilecek boru çapındaki ani genişleme yerine tedrici bir artış tercih edilmelidir. Bunun aksine geniş bir kesitten dar bir kesite geçişte de tedrici ve yumuşak hatlı bir daralma tercih edilmelidir. Bir deponun çıkışında eğer depodan boruya keskin köşeli bir çıkış varsa meydana gelen enerji kaybı, güzel yuvarlatılmış bir çıkışa göre çok daha fazladır. Boru deponun içerisine kadar uzanmamalıdır. Enerji kayıplarının azaltılmasına alternatif bir yöntem olarak polimer zincirli kimyasal maddelerin, akıma belirli oranlarda ilave edilmesi son yıllarda kullanıla gelen bir örnektir. Özellikle petrol boru hatlarında, ham petrol ve petrole bağlı yan ürünlerin taşınmasında kullanılan bu yöntem %60 seviyelerinde enerji kazanımı sağlamıştır.[13]

Sürtünmenin azalması, boru hattı boyunca hiçbir işleme tabi tutulmadan pompalanan akışkanla, sabit akış oranında kimyasal madde içeren akışkanın pompalanması arasındaki basınç düşümündeki farklılık olarak belirlenir.



$$\%DR = \frac{(\Delta P_f)_{normal} - (\Delta P_f)_{polimerli}}{(\Delta P_f)_{normal}} \times 100 \quad (V.1)$$

ΔP_f : Sürtünme Basınç Düşümü

Akımdaki artış farklı pompalar için bir sabit varsayılarak şu şekilde hesaplanabilir ;

$$\%F1 = \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{\%DR}{100}} \right)^{0,55} - 1 \right] \times 100 \quad (V.2)$$

Sürtünme kayıplarının azalması, kimyasal madde enjekte edilir edilmez başlar ve boru hattındaki tüm akışkan kimyasal madde içerince büyük değerlere ulaşır. Bu noktada, sürtünme kayıplarının azalması sabit hale gelir.

Kimyasal madde enjeksiyonu durdurulduğunda, boru içindeki, kimyasal madde karışımı olmayan sıvı, polimer ilaveli sıvının yerini alacağından sürüklenme azalması aniden düşer. Sürtünme kayıplarının azalması, boru içindeki tüm polimer madde ilaveli sıvı, boru hattını terkedinceye kadar düşmeye devam eder.

V.1. Polimer Malzemeye Etki Eden Faktörler

Konsantrasyon : Polimer madde konsantrasyonun, sabit 8.0 ft/sec (2,44 m/dak)'lık akışkan hızında akım artışı üzerine etkisi Şekil V.1'de gösterilmiştir. Drag azalması (sabit basınçtaki akım artışı), artan polimer konsantrasyonuyla doğru orantılı olarak artar.

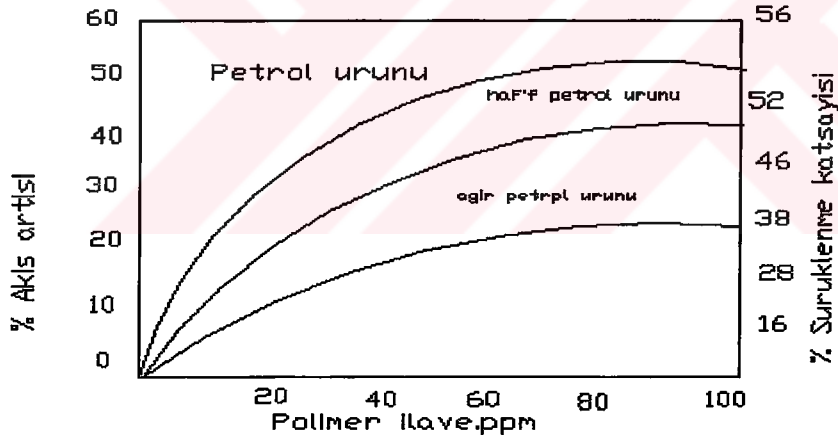
Akışkan Hızı : Polimer zincirli kimyasal maddenin etkisi, akışkan hızıyla artar. Daha yüksek hızlarda türbülansın neden olduğu enerji kaybı artar. Artan akışkan hızı, kimyasal maddenin faydalı etkilerini ortaya çıkarır.

Akışkan Viskozitesi : Polimer madde ile akışkanın viskozitesi arasındaki ilişki Şekil V.1'de gösterilmiştir. Polimer madde, düşük viskoziteli sıvılarda, yüksek viskoziteli

sıvılara göre daha etkindir. Sabit bir hızda, hafif bir sıvının türbülansı, ağır bir sıvının türbülansına göre daha çoktur ve polimer madde tarafından türbülansın azaltılması daha belirgindir.

Boru Çapı : Şekil V.1'deki veriler, iç çapı 8 inch (20,3 cm) ve daha büyük olan borulara uygulanabilir. İç çapı 8 inch (20.3 cm)'den daha küçük borularda, polimer malzemenin drag azaltma performansı azalan çapla birlikte artar. Böylece, daha küçük hatlar ve laboratuvar şartları, verilen polimer madde konsantrasyonları için daha yüksek sürüklenme azalması gösterilebilir.

Mekanik Makaslama : Normal boru akımları esnasında, polimer malzemenin etkisindeki bir azalmadan söz edilemez. Ancak, polimer ilaveli sıvı, santrifüj pompa, kontrol valfleri, istasyonlar vb. çok makaslamalı bölgelerden geçtiğinde, polimerin sürüklenme özelliği büyük ölçüde azalır.



Şekil V.1 Polimer zincirli maddenin akım gelişimi üzerine etkisi.

V.2.Deneyde Kullanılacak Polimer Maddenin Özellikleri

Polimer malzeme çok kalın, viskoz ve Newtonien olmayan bir sıvıdır. Çok viskoz olmasına rağmen taşınması ve sisteme enjekte edilmesi uygun ekipmanlar kullan-

mak suretiyle son derece kolaydır. Polimer malzemenin bazı önemli fiziksel özellikleri şunlardır.

Parlama Noktası : $^{\circ}\text{F} > 142$

$^{\circ}\text{C} > 61.1$

Yoğunluk : 6,8Lb/U.S.Gal

0,814 Kg/l

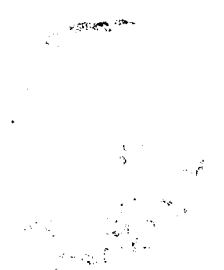
Boru hatlarındaki sıvılarda, türbülanslı akımın sebep olduğu sürüklenme kaybı, uzun polimer zincirli kimyasal maddeler kullanılarak önemli şekilde azaltılabilir. [9]

Özel olarak dizayn edilmiş ekipmanlar kullanılarak, jel kıvamındaki kimyasal madde direkt olarak boru hattı içerisine alçak konsantrasyonlarda enjekte edilir.

Pratikte bu yöntem 1979 yılından beri, 2-48 inch arasında sıralanan boru hatlarında ve borulama sistemlerinde başarıyla kullanılmaktadır. Türkiye’de BOTAŞ A.Ş. tarafından petrol boru hatlarında uygulanan bu yöntemin şu faydaları görülmüştür.

- * Mevsimlik yüksek talepleri karşılamak üzere, ham petrol akım oranı artmaktadır.
- * Mevsimlik değişken, petrol ürünleri talebinin karşılanmasında ürün hatlarındaki akım oranı artmaktadır. Polimer zincirli kimyasal madde; gazyağı, diesel, LPG ve NPG’de başarıyla kullanılmaktadır.
- * Boru hatlarının kapasiteleri dahilinde veya bu kapasitenin aşılması durumunda çalışma basıncını düşürmektedir.
- * Daha geniş boru, ilave pompa ve pompalama istasyonları için gerekecek olan harcamaları önlemekte veya geciktirmektedir.
- * Enerjinin korunması ve maliyetin azalmasıyla mevcut istasyonlar ve pompalar devre dışı bırakılabilir.

Polimer zincirli kimyasal madde, asgari enerji kayıplarıyla daha fazla ürünün boru hatları boyunca taşınmasını sağlamaktadır. Bu sayede aynı miktardaki akışkanın daha az enerji kullanılarak taşınması mümkün olmaktadır. Bu, sıvı akımı içerisindeki türbülansın neden olduğu sürtünme basıncının azaltılmasıyla sağlanır. Türbülans azaltıldıkça, akışkanın boru hattındaki hareketi boyunca daha az enerji, kayıp enerji olarak ortaya çıkar. Kimyasal madde boru hattı içerisine milyonda bir (ppm) miktarda enjekte edildikçe, türbülans ve sürtünme basınç düşümü % 60 seviyesine kadar azaltılabilir.[13]



BÖLÜM VI

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde kurulan deney setinde, bir model boru hattı sisteminde petrol akımına bazı fiziksel özellikleri bilinen uzun polimer zincirli kimyasal jel olan (ARCOPLA), belirli oranlarda katılarak deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan boru hattı 1/380 oranında modellenerek kurulmuştur. Modelleme yaparken Ceyhan Botaş şefliğinden alınan bilgilere göre hareket edilmiştir. Pazarcık Botaş şefliği ile Ceyhan Botaş şefliği arasındaki hat ana model olarak seçilmiştir. Yani Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesi ile Adana ili Ceyhan ilçesi arasındaki boru hattının uzunluğu ve çapı modelleme yapılırken ana hat olarak kabul edilmiştir.

Yapılan bu deneylerin amacı sistemdeki boru içerisinde akan petrole uzun polimer zincirli kimyasal maddelerin eklenmesiyle, enerji kayıplarında ortaya çıkacak azalmaların izlenmesidir.

Deney Setinde Kullanılan Araç ve Gereçler

Yapılan deneylerde aşağıdaki araçlar kullanılmıştır.

Pompa

Pompa sistem deney ölçümleri için santrifüj pompa kullanılmıştır. Pompanın devri 2900 d/d dır. Basma yüksekliği 20 mss dur. Deney sırasında vanalar tam açık vaziyette pompa çalıştırılmıştır. Santrifüj pompada deney sırasında oldukça sağlıklı işlem yapılmıştır.

Kimyasal Madde

Deneylerin tamamında kimyasal madde olarak Arcopla denilen uzun polimer zincirli kimyasal madde kullanılmıştır. Arcopla oldukça yapışkan ham petrol ve rafine edilmiş petrol ürünlerinde çok iyi çözünebilen bir ham petrol türevidir. Kimyasal madde aşırı yapışkan, jel halinde ve uzama miktarı oldukça büyük, yanıcıdır. Deney setinde kimyasal maddenin ham petrole oranı yaklaşık olarak 0,000001 olarak alınmıştır. Bu oran Ceyhan Botaş şefliğinden alınan değerlere göre hesaplanmıştır.

Plastik Boru

18 metre yere paralel 1 metre yere dik olarak 19 metre uzunluğunda 90 mm çapında bir boru hattı kullanılmıştır. Deney setinde plastik borunun kullanılmasının nedeni; gerçekte kullanılan petrol hattı boruları ile deney setinde kullanılan plastik boruların, modelleme sonucu pürüzlülük değerlerinin birbirine çok yakın olmasıdır.

Manometreler

Basınç değerlerini okuyabilmek amacıyla Pakkens marka ½" Ø100 mm ,0-10 bar ölçüm aralığına sahip %2 hassasiyetli iki adet manometre kullanılmıştır.

Debimetre

Debi değerlerini okuyabilmek için bir adet debimetre kullanılmıştır.

Tank

Kapalı sistemde yapılan deney için 1000 litre hacminde saç bir tank kullanılmıştır.

Vana

İki adet 90mm çapında küresel vana kullanılmıştır.

Deneyin Yapılışı

Yapılan deneyde Arcopla isimli uzun zincirli kimyasal polimer kullanılmıştır. Bu madde basınç altında petrol ürünlerinde iyi çözümlenebilen sudan daha az yoğun bir maddedir. Deneylerin tamamı pompalı sistem olarak yapılmıştır. Petrol ile deneylere başlanmadan önce su ile sızdırmazlık testi yapılmıştır. Test sonucunda herhangi bir noktadan sızma olmadığı gözlenmiştir. Bunun sonucunda petrol ile deneylere başlanmıştır.

Önce tank ve plastik borular ham petrol ile tamamen doldurulup bu şekilde sistem çalıştırılıp değerler okunmuştur. Deney seti üzerinde küresel vanalar yardımı ile akımın debisi ayarlanmıştır. Pompanın devrinin yeterli olması nedeniyle vanalar tamamen açılarak deneylere devam edilmiştir. Deney için tankın üst kısmına 90 mm çapında bir delik açılarak, 5 metre uzunluğunda 90 mm çapında bir plastik boru havalandırma sistemi olarak kullanılmıştır. Deney sırasında havalandırma sistemi yeterli olmuştur.

Sadece ham petrol ile sistemde pompa çalıştırılarak deney yapıp; gerekli bilgiler sayaçlardan okunmuştur. Debimetre üzerinden debi, manometrelerden de basınç değerleri okunmuştur.

Uzun polimer zincirli kimyasal maddeyi belirli oranlarda ham petrole karıştırarak tekrar deneyler yapılmıştır. Önce 250 gr Arcoplayı ham petrole ilave ederek sistem çalıştırılmış ve ölçümler yapılmıştır. Belirli bir zaman sonra Arcopla özelliğini kaybetmiştir. Sonra sisteme 500 gram Arcopla eklenmiştir. Bundan sonra da sisteme 625 gr Arcopla ve katları ilave edilerek deneye devam edilmiştir. En son yapılan deneyde ise sisteme 3125 gram Arcopla ilave edilmiştir. Okunan değerlerde bir değişiklik gözlenmeyince deneye son verilmiştir. Böylece deney sona erdirilmiştir.

Deney Sonucu

Irak-Türkiye petrol hattı göz önünde bulundurularak ve Pazarcık Ceyhan BOTAŞ şefliklerinden alınan bilgilerden yola çıkarak yapılan model deney düzeneği üzerinde uygulanan deneylerde, petrol boru hattı içerisinde akan ham petrole Arcopla isimli kimyasal maddenin eklenmesiyle akımda farklılıklar olduğu izlenmiştir. Özellikle

petrol boru hatlarında debinin artması için bu yöntem uygulanmaktadır. Maddi açıdan oldukça yüksek değerlerde faydalar sağlamaktadır. Bu kimyasal maddenin bir avantajı da, petrol türevi olduğundan dolayı petrolün yapısını bozmadan petrole dönüşmektedir. Yapılan deneyde görülmüştür ki 1875 gram kimyasal madde (Arcopla) ilavesinden sonra ölçülen değerlerde artık değişiklik olmamaktadır. Yani ham petrole ilave edilen kimyasal madde belirli miktarlarda kullanılmalıdır. Belirli bir değerin altında ve yine belirli bir değerin üstünde Arcopla'nın ham petrole hiçbir etkisi olmamaktadır. Yaklaşık olarak 0,000001 oranındaki kimyasal maddenin ilavesi ham petrolün debisini en yüksek değerlere çıkarmaktadır.

Bir petrol ürünü olan Arcopla isimli kimyasal madde ham petrole karıştırılınca debiyi bir miktar artırdığı izlenmiş ve uzunluğu belirli bir boru hattında etkili olmuştur. Kapalı bir devrede kimyasal maddenin oranını değiştirmeden yapılan ölçümlerde, karışımın boru hattında iki tur döndüğünde, kimyasal maddenin etkisini kaybetmeye başladığı görülmüştür. Gerçekte Botaş şefliği kimyasal maddenin ilavesini boru hattı üzerinde her 200 km'de bir yapmaktadır. Deney setinde bu değer modelleme sonucu 20 metre olarak hesaplanmıştır ve bu değerin deney sırasında da doğru bir seçim olduğu anlaşılmıştır.

Deney setinde debimetre ile hassas olarak ölçüm yapabilmek için kalibrasyon yapılmıştır. Belirli bir zaman aralığında borudan akan petrolün kaç litre olduğu ölçülüp, bu değer debimetrede okunan değer ile karşılaştırılmıştır. Okunan ve ölçülen değerlerin aynı olduğu görülmüş ve debimetrenin hassas ve doğru ölçüm yaptığı anlaşılmıştır. Özellikle su ve ham petrol için kalibrasyon işlemi ayrı ayrı yapılmıştır. Deneylerin bitiminde son kez kalibrasyon işlemi tekrarlanmış ve bütün deneyde debimetre üzerinden okunan değerlerin doğru olduğu anlaşılmıştır.

Ayrıca Grafik VI.1' de kimyasal madde ilave miktarı ile Reynolds sayısı arasındaki değişim görülmektedir. Bu grafikte ham petrole 625 gram ile 1875 gram aralığında Arcopla ilavesinde Reynolds sayısının arttığı daha fazla Arcopla ilavesinde ise Reynolds sayısında bir değişiklik olmadığı izlenmiştir. Grafik VI.2' de basınç farkı değeri ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki verilmiştir. 0,27 bar ile 0,38 bar basınç farkı aralığında Reynolds sayısının arttığı ve bu değerler dışında Reynolds sayısının bir değişikliğe uğ-

ramadığı görülmüştür. Grafik VI.3' de kimyasal maddenin ilave miktarı ile akışkan hızının değişimi izlenmiş ve ham petrole 500 grama kadar Arcopla ilavesinde hızda bir artma görülmemiş ama daha fazla Arcopla ilavesinde akışkanın hızında bir artma olduğu ve bu artmanın 1875 gram Arcopla ilavesine kadar arttığı tespit edilmiştir. Ancak daha fazla Arcopla ilavesinde akışkanın hızı değişmemekte ve sabit kalmaktadır. Grafik VI.4' de akışkanın debisi ile basınç farkı arasındaki değişim görülmektedir. 0,27 bar ile 0,38 bar basınç fark değerleri arasında debi artmaktadır. Deneyde en yüksek basınç fark değeri 0,38 bar olarak görülmüştür. Grafik VI.6' da ilave edilen kimyasal madde miktarı ile akışkanın debisi arasındaki değişim verilmiştir. Ham petrole 625 gram kimyasal madde ilavesinden itibaren debide bir artma izlenmeye başlanmıştır ve debideki bu artış 1875 gram kimyasal madde ilavesine kadar devam etmiştir. Ancak daha fazla kimyasal madde ilavesinde debide bir artma olmadığı görülmüştür. Tüm grafiklerde görüldüğü gibi ham petrole kimyasal madde ilavesi akışkan debisinde artış sağlamıştır. Ayrıca aynı debideki ham petrole kimyasal madde ilavesinin daha düşük pompa güçlerinde çalışma imkanı sağlayacağı da göz ardı edilmemelidir.

Günümüzde enerjinin çok önemli olduğu düşünülerek bu yöntemin kullanılması oldukça faydalıdır. Petrol boru hatlarının daha fazla işleve sahip olması için de bu yöntem tercih edilebilir.



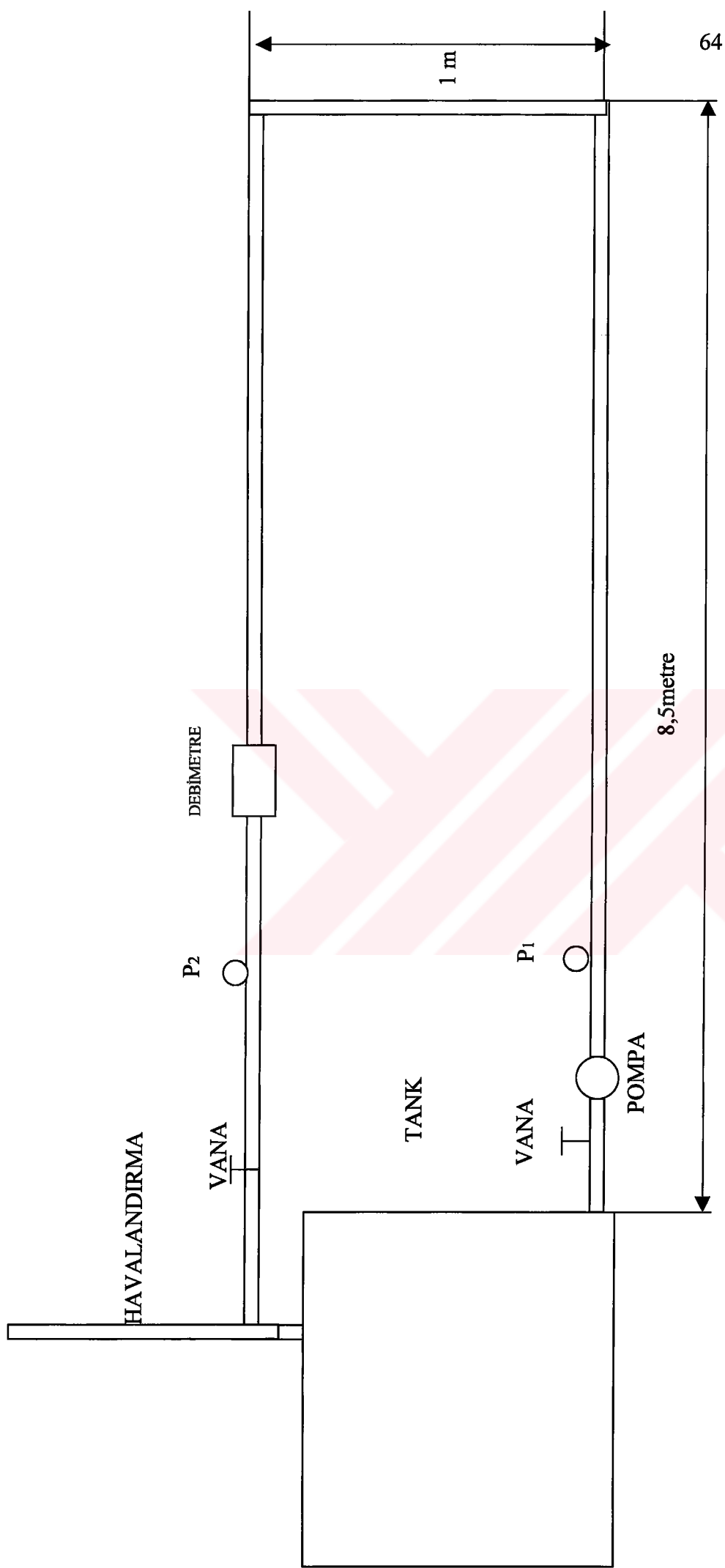
Debi (litre/dakika)	P ₁ (Bar)	P ₂ (bar)	ΔP	Hız (metre/saniye)	Reynolds sayısı	Debideki % değişim	Akışkan
179,7	0,64	0,38	0,26	0,471	43255,10		Saf ham petrol
179,7	0,63	0,38	0,25	0,471	43255,10		Ham petrol+250gram kimya- sal madde
179,8	0,65	0,38	0,27	0,471	43255,10		Ham petrol+500 gram kimya- sal madde
183,2	0,72	0,43	0,29	0,480	44081,63	2,0	Ham petrol+625 gram kimya- sal madde
187,7	0,83	0,46	0,37	0,492	45183,67	4,5	Ham petrol+1250gram kimya- sal madde
188,2	0,85	0,47	0,38	0,493	45275,5	4,8	Ham petrol+1875gram kimya- sal madde
188,3	0,86	0,47	0,39	0,494	45278,5	4,8	Ham petrol+2500gram kimya- sal madde
188,3	0,86	0,47	0,39	0,494	45278,5	4,8	Ham petrol+3125gram kimya- sal madde

KULLANILAN AKIŞKAN : HAM PETROL
 YOĞUNLUĞU : 890 kilogram/ metre³
 KİMYASAL MADDE YOĞUNLUĞU : 814 kilogram/ metre³
 BORU ÇAPı : 90 milimetre

Tablo 6.1. Deney Sonuçları

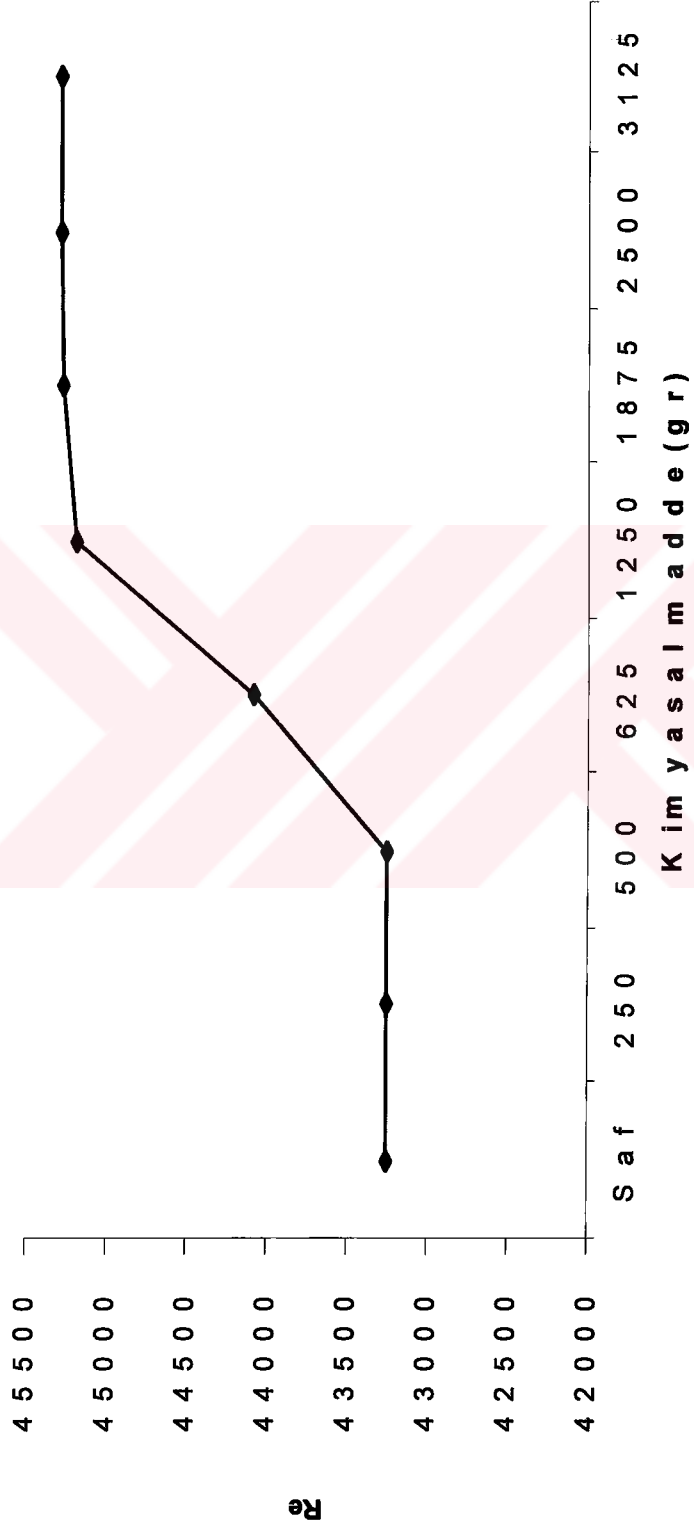
	Debi (lt/ d)	P1 (bar)	P2 (bar)
HAM PETROL	179,7	0,64	0,38
HAM PETROL+250 GRAM POLİMER	179,7	0,64	0,38
HAM PETROL+500GRAM POLİMER	179,8	0,65	0,38
HAM PETROL + 625 GRAM POLİMER	183,20	0,72	0,43
HAM PETROL + 1250 GRAM POLİMER	187,70	0,83	0,46
HAM PETROL + 1875 GRAM POLİMER	188,2	0,85	0,47
HAM PETROL+2500 GRAM POLİMER	188,3	0,86	0,47
HAM PETROL+3125 GRAM POLİMER	188,3	0,86	0,47

Tablo 6.2. Ölçüm Sonuçları



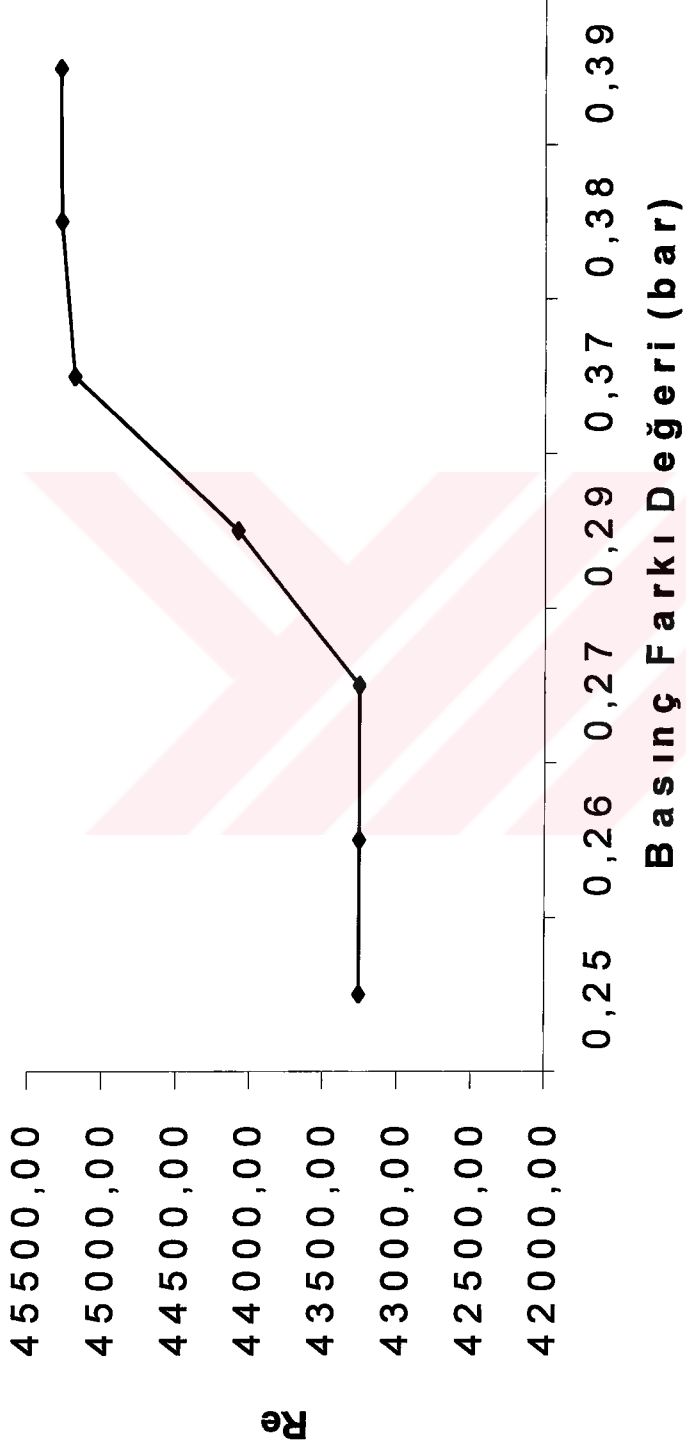
P₁ ile P₂ arası 16,5 metre

Şekil 6.1 Deney Tesisat Şeması

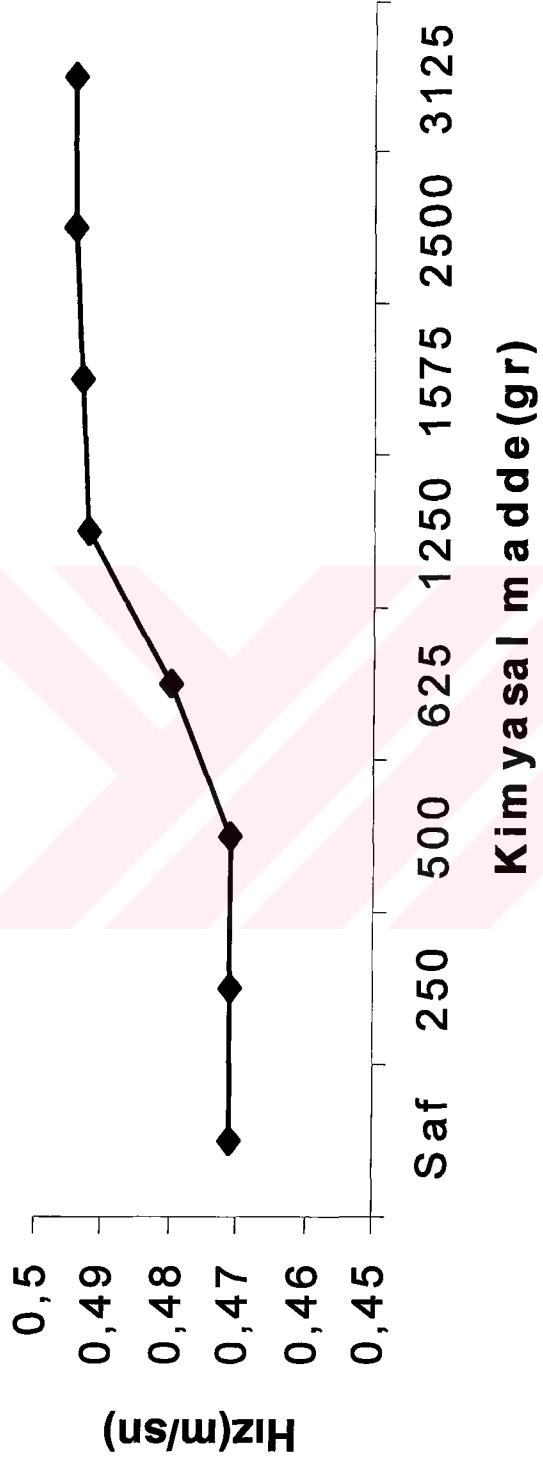


Grafik VI.1 Reynolds sayısı-Kimyasal madde miktarı

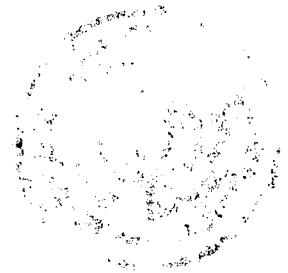


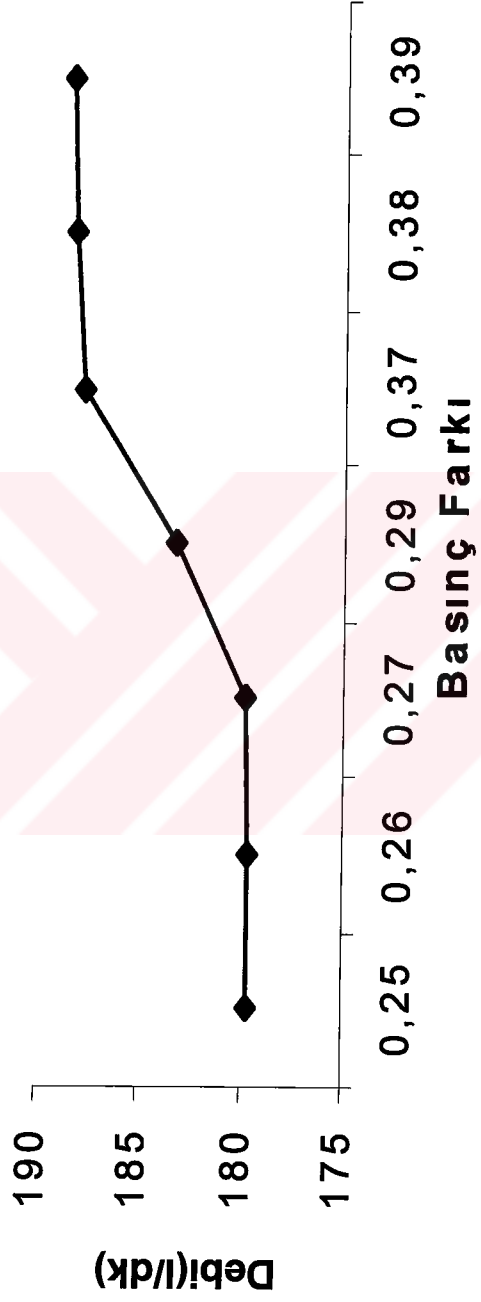
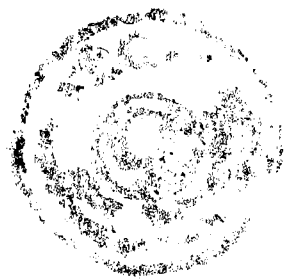


Grafik VI.2 Reynolds sayısı- Basınç farkı

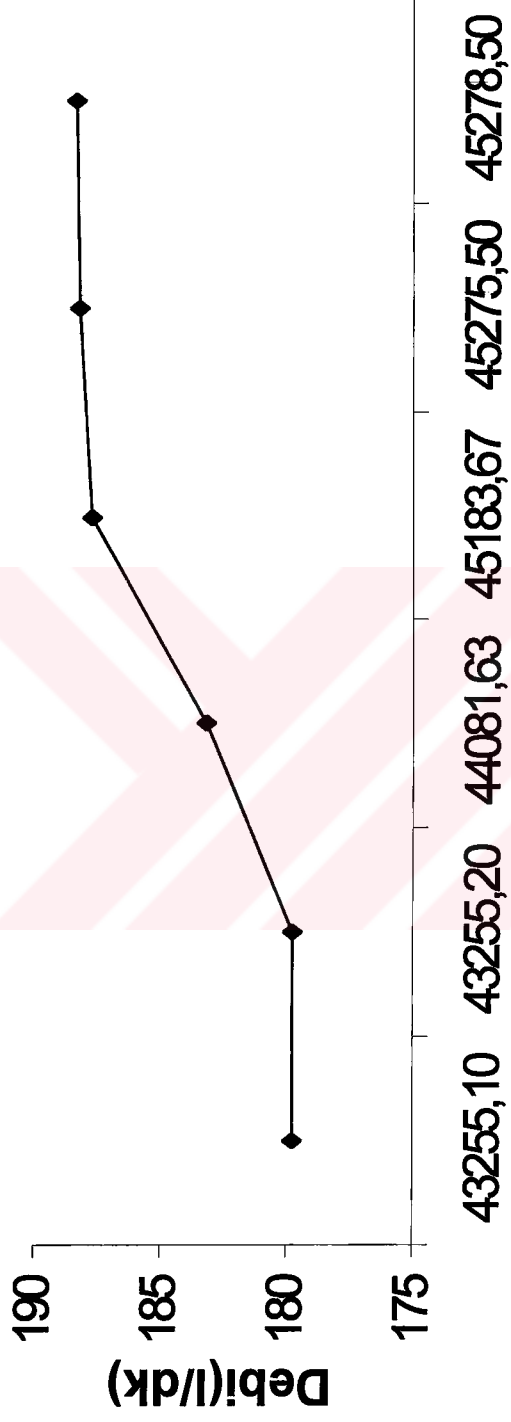


Grafik VI.3 Hız-Kimyasal madde miktarı





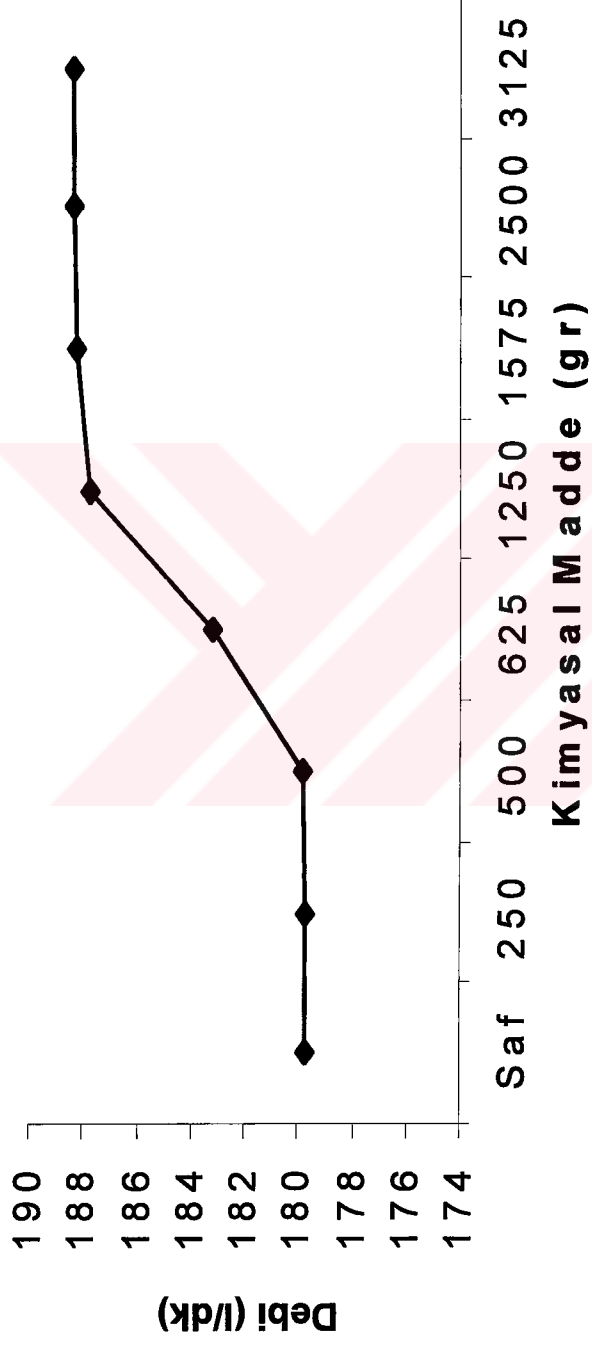
Grafik VI.4 Debi-Basınç farkı



Re

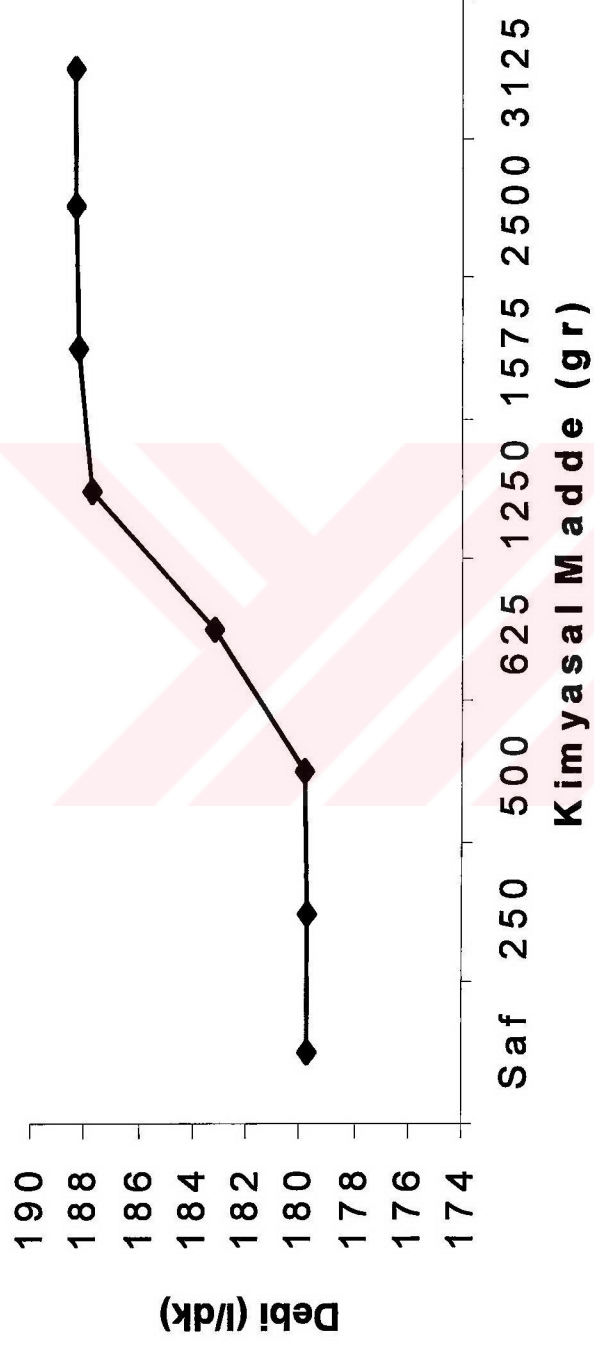
Grafik VI.5 Debi-Reynolds sayısı





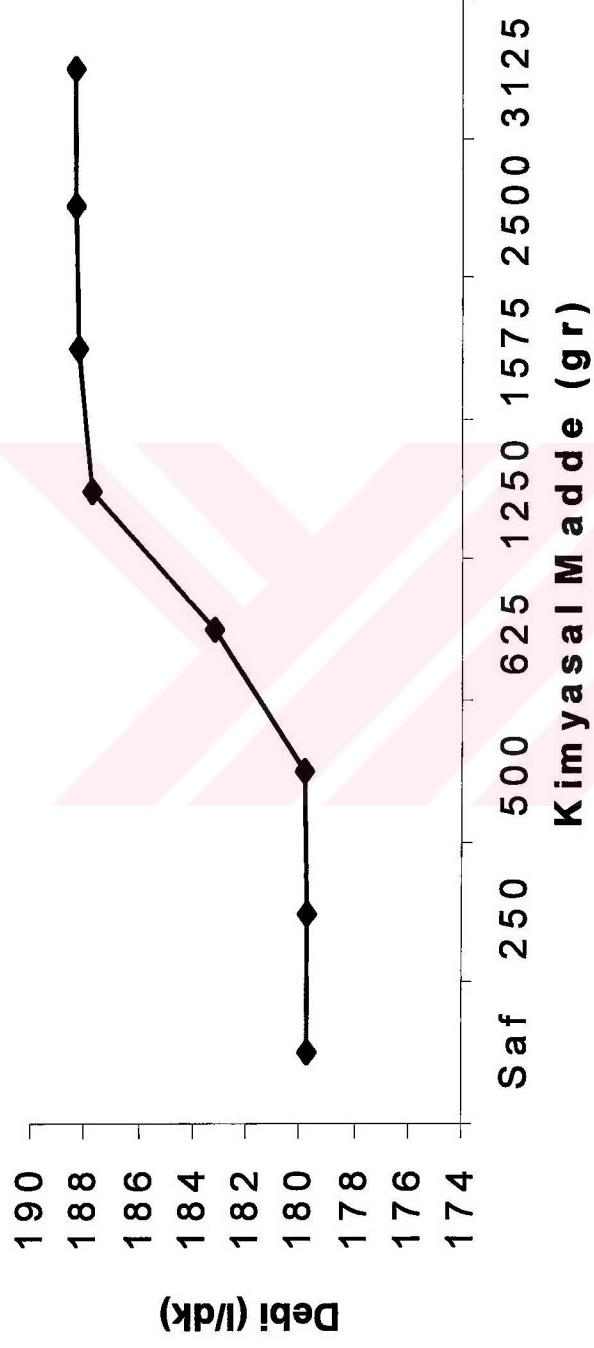
Grafik VI.6 Debi-Kimyasal madde miktarı





Grafik VI.6 Debi-Kimyasal madde miktarı





Grafik VI.6 Debi-Kimyasal madde miktarı

